

超高壓送電系統에 적용할 高速度再閉路方式의 비교검토

기술해설
20~6~2

A Comparision for High-Speed Redosing on EHV System

이 주 희*
(Choo Hie Lee)

1937年 부터 送電系統의 最高電壓으로 運轉을 하는 154,000 volt 는 최근 수년간에 급격한 成長을 持續하고 있는 電力需要와, 漸次 大容量化하는 單位發電機에 의하여 앞으로 수년내에 建設될 것으로 展望되는 超高壓 送電電壓에 의하여 最高電壓 階級에서 脫落할 것으로 생각된다.

超高壓系統의 必要性을 認識하고 本格的인 檢討를 시작하는 것은 1968年 8月 韓國電力과 美國 Commonwealth Ass. Inc 間에 "345 KV 送電系統의 計劃과 設計基準에 대한 研究"의 用役契約을 체결함으로써 첫 出發을 하였다. 또한 최근에 345KV 送電系統의 資料에 대한 借款先(Siemens 및 English Electric Co, Balfour Beatty 등)의 交渉을 進行하므로써 具體化의 段階에까지 接近하였으므로 멀지않은 장래에 電力系統 近代化의 象徴으로 表現되는 超高壓系統을 運轉할 수 있을것으로 전망된다.

超高壓送電系統의 主要 仕様중에서 특히 高速度再閉路方式은, 線路開閉異常電壓의 크기에 關聯되는 遮斷器의 仕様과 系統信賴度를 決定하는 保護繼電裝置의 主要한 決定要素가 된다. 따라서 가장 合理的인 再閉路方式을 選擇하려면 系統發展의 初期狀態에서 부터 最終段階의 系統規模와 系統運用基準을 充分히 檢討하여야 한다.

本稿에서는 超高壓系統에 適用되는 最近의 再閉路方式 傾向과 우리가 發展시키려는 系統規模에 適合한 再閉路方式을 比較檢討한다.

1. 高速度再閉路의 필요성

超高壓系統의 信賴度를 向上시키는 가장 適合한 經濟的이며 技術的인 方法은 高速度再閉路方式으로 周知되고 있다.

美國의 IEEE-EEI 委員會에서 美國과 Canada 地域의 超高壓系統에 대하여 15年間(1950.1~1964.12)의 停電事故를 調査分析한 報告書⁽¹⁾(1967)에 의하면 345KV~

360KV 超高壓電線의 全體事故 件數(停電은 除外함 中에서 81.3%는 再閉路를 試圖할 수 있는 瞬間事故이며 이 瞬間事故 中에서 一線地路事故는 全體事故의 69.8%를 占하고 있으므로, 一線地路을 除外한 其他의 瞬間事故는 11.5%이다. 또한 全體 瞬間事故 中에서 一線地路事故는 86%를 占有하므로 其他의 瞬間事故는 14%가 된다.

표 1. 345KV~360KV 送電線의 事故率 (%)

Fault Type	L-G	L-L	LL-G	LLL	LLL-G	Unknown	Total
Temporary	69.82	6.07	2.02	1.52	1.01	0.84	81.28
Permanent	11.13	2.02	1.35	0.17	1.35	2.19	18.21
Not reported	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51
Total	81.46	8.09	3.37	1.69	2.36	3.03	100.00

高速度再閉路는 瞬間事故가 高速度遮斷할 때 再投入을 成功시키므로, 系統은 事故發生 以前의 狀態와 同樣으로 連續送電을 할 수 있다. 따라서 系統發展의 初期段階는 系統網의 構造가 빈약한 것과 建設初期의 人爲的인 事故率이 上昇하는 것 등을 勘案하면 再閉路의 價値는 높게 評價된다. 더욱이 高速度繼電器 方式을 適用하는 系統은 繼電器의 誤動作에 의한 系統의 擾亂을 Cover 할 수 있는 利點을 찾을 수 있다.

그러나 系統連系가 發展하여 完全한 Loop化 또는 Mesh化를 形成하는 견고한 系統構造에서는 高速度再閉路를 實施할 必要性은 없고 低速度再閉路의 適用만으로 充分하다. 이것은 系統安定度の 向上에 目的이 있는것 보다 系統運用의 自動化를 期하는데 意義가 있다.

2. 高速度再閉路方式의 종류

再閉路를 實施하는 相數에 따라 三相再閉路, 單相再閉路 및 多相再閉路의 세가지로 分類된다. 超高壓系統의 高速度再閉路는 一回 再閉路를 適用하고 35 cycles⁽²⁾ 이하의 Reclosing time(Trip Coile 勵磁時間부터 一次 Arc Contact 의 閉路時間)을 基準으로 한다.

* 정회원 : 한전 기획관리부 계전기 담당역

送電線에 高速度再閉路를 처음 試圖한 것은 1933年 Griscom 氏와 Torok 氏가 三相再閉路의 適用 可能性을 實驗한 것이며 實系統에 適用한 것은 1936年 American Gas & Electric Co.의 138KV 送電系統⁽⁹⁾이다. 三相再閉路方式은 三相의 對稱操作이므로 無電壓時間중의 2次 Arc에 依한 영향이 적고 繼電方式이 簡單하며, 또한 모든 瞬時故障를 再閉路할 수 있는 利點 등이 있으므로 超高壓系統은 壓倒의으로 많이 적용하고 있다. 특히 美國은 一般의인 原則처럼 이 再閉路方式을 사용하고 있으며, 其他 地域 역시 線路의 過渡安定度維持에 問題가 되는 1回線系統(Loop가 없을때)을 除外하고는 大部分 三相再閉路方式을 適用하고 있다.

單相再閉路는 처음 美國에서 1941年 Public Service Co. of Indiana의 132KV 送電線에 適用된 이후, 독일을 中心으로 하는 구라파의 一部地域에서 現在 適用되고 있다. 一部地域을 除外하고는 Loop化 되지 않은 1回線送電線에 適用하여 過渡安定度の 向上을 위하여 使用하는 것을 原則으로 하고 있다. 地絡된 한相만을 選擇하고 再閉路하므로 2次 Arc電流의 持續時間과 無電壓時間 중의 通信線誘導障害 및 後備保護繼電器의 誤動作, 大單位出力發電機의 欠相運轉限界등의 問題點이 있다. 興味있는 것은 單相再閉路의 始發地인 美國에서는, 現在 特殊한 一部地域을 除外하고는, 單相再閉路方式을 適用하지 않은 것이며, 이것은 前記의 問題點에 依하여 忌避하는 것으로 생각된다.

從前까지의 高速度再閉路는 單相 또는 三相중에서 選擇되었으나, 최근 2回線送電線에서 兩回線의 同時故障가 많으므로 이것을 處理하는 觀點에서 各回線의 故障相을 選擇遮斷하고 再閉路를 施行하여 系統安定度を 向上하고 또한 再閉路의 成功率를 높히려는 새로운 概念이 多相再閉路方式이다⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 2回線 送電線의 多重故障는 多相再閉路의 適用으로 完全停電을 避할수 있는 可能性이 日本의 275KV 系統⁽⁷⁾에서 實證되었고, 現在 日本과 Canada의 一部系統은 實用하고 있다. 또한 日本의 500KV 送電系統은 多相再閉路方式을 適用하기 위하여 具體的인 研究가 進行되고 있다. 이 方式은 前記한 單相再閉路의 欠點 외에, 故障相을 確實하고 選擇하기 위한 特別한 繼電方式의 研究가 必要하므로 現段階에서는 一般의으로 適用하지 않은 傾向이다.

各國의 代表的인 系統에서 使用하는 高速度再閉路方式을 比較하면 표2와 같다. 美國과 Sweden, England 系統은 3相再閉路가 適用되고, France와 Germany 系統은 3相과 單相을 共用하고 있다.

표 2. 高速度再閉路의 實施狀況

國名 및 系統	再閉路	最大遮斷距離 (km)	遮斷時間 (초)	無電壓時間 (초)
USA ⁽⁸⁾ AEP 345KV 및 OVE 345KV	3相	250	4	18
	BPA 230KV	3相	—	6
⁽⁹⁾ Keystone 500KV	3相	480	—	25~30
Sweden ⁽¹⁰⁾ 400KV System	3相	—	3	12~15
England ⁽¹²⁾ 400KV grid System	3相	—	—	18
	⁽¹²⁾ 400KV Radial Feeder	1相	—	—
France ⁽¹⁰⁾ 400KV System	3相과 1相	173	6	18~180
Germany ⁽¹¹⁾ 380KV System	3相과 1相	340	6	72以下
Rhodesia ⁽¹³⁾⁽²⁷⁾ 330KV Kariba System	1相	305	6	42
Japan 275KV System	3相 및 多相	—	6	18~24

註: ∞은 60 cycle 基準인

3. 高速度再閉路의 決定要素

高速度再閉路는 正確한 動作과 再閉路중에 系統의 他要素에 미치는 영향이 없것끔 適用할려는 系統條件에 의하여 規定되는 無電壓時間중의 保護繼電器 誤動作 및 通信線의 誘導障害, 發電機의 欠相運轉特性을 充分히 檢討하여야 한다.

또한 再閉路에 의한 過渡安定度の 向上限界는 再閉路方式의 主要한 選定基準이므로 이 要素와 前記한 無電壓時間중의 要素들은 超高壓系統의 高速度再閉路方式을 決定할 때 主要한 決定要素가 된다.

가. 無電壓時間의 限界

高速度再閉路는 無電壓時間이 짧을수록 效果의이며 이 最少無電壓時間을 規定하는 要素는 遮斷器의 無電壓時間과 故障電流에 의한 殘留 Ion을 消滅하고 故障部分의 絕緣을 回復하는 絕緣回復時間, 2次 Arc電流의 持續時間 등이다.

(a) 遮斷器의 最少無電壓時間; 이것은 遮斷器의 機械的인 機構에 의하여 決定되는데, 最近의 超高壓系統에서 使用하는 高速度遮斷器의 無電壓時間은 0.2秒程度가 된다. 따라서 後述하는 要素들의 無電壓時間에 比하여 無視할 수 있으므로 超高壓系統에서는 無電壓時間의 決定要素로서 考慮하지 않는 것이 一般的이다.

(b) 絕緣回復時間; 故障線路를 開放한 후 故障電流에 의하여 發生된 殘留 Ion이 完全하게 消滅되는 時間이므로, 三相再閉路에서는 無電壓時間을 法定하는 要素가 된다. 그러나 單相再閉路와 多相再閉路의 경우는 絕緣回復時間 보다 2次 Arc電流의 持續時間이 훨씬 長時間이므로 無電壓時間의 選定要素로서 絕緣回復時間을 考慮하지 않고 대신 2次 Arc電流의 消滅時間을

使用한다.

絶緣回復時間은 各國에서 理論的 또는 實驗的으로 研究하고 있으나 많은 要素들 때문에 確定된 基準値는 없다. 一般的으로 超高壓系統은 표3과 같은 IEEE 委員會의 추천 數值⁽¹⁶⁾를 基準하고 있다. 대체로 系統電壓과 故障電流의 크기에 比例하여 絶緣回復時間은 길다.

표 3. 三相再閉路에 必要한 最少無電壓時間

系統電壓 (KV)	最少無電壓時間(∞)	
	試驗결과	運轉經驗
115	9	14
132	9.5	14.5
230	12.5	17
345	15.5	20.5
400	17	22
500	20	25

註 ∞은 60 cycle 基準인

2回線送電線에서 한 回線만 3相再閉路를 하고 다른 健全線路는 계속送電할때 再閉路하는 線路의 絶緣回復時間은 健全線路의 영향을 적게 받는다. Boissau氏⁽¹⁴⁾가 230KV 線路에서 健全線路에 의한 絶緣回復時間의 영향을 測定한바에 의하면, 2回線送電線에서 한 回線만 再閉路하는 경우는 1回線만 있는 送電線의 再閉路時間보다 1~2 cycle 程度길다. 따라서 絶緣回復時間은 健全線路의 영향을 無視할 수 있다.

(c) 2次 Arc 電流의 持續時間; 地路相과 健全相의 靜電 및 電磁結合電壓에 의하여 故障點에 2次 Arc 電流가 흐른다. 따라서 再閉路는 絶緣回復時間에 關係없이 2次 Arc 電流의 消滅후에 施行하여야 成功을 할수 있다.

三相再閉路는 三相을 對稱된 遮斷과 再投入을 하므로 2次 Arc 電流의 發生을 考慮할 수 없으나, 만약 遮斷器의 機構不良으로 순간적인 不平衡操作을 하던 操作중에 2次 Arc 電流가 發生할수 있다. 그러나 극히 순간적이므로 無視된다.

그러나 單相再閉路의 경우는 非對稱된 遮斷이므로, 遮斷時間중에 地路相(開放相)에 健全相의 靜電 및 電磁結合電壓의 합인 $V_f = -\frac{C_m}{2C_m + C_o} \cdot E$ 가 加壓되고, 또한 V_f 에 의하여 2次 Arc 電流 $I_f = -j\omega C_m E$ 가 흐른다. 이 現象은 單相再閉路 또는 多相再閉路에서 發生될 수 있으며 健全相 誘起起電力의 實數部에 의하여 決定된다. 一般的으로 起高壓系統의 $\frac{C_o}{C}$ 은, 0.47~0.75 範圍內에 있으므로 V_f 는 系統 相電壓의 15%, I_f 는 遮斷線路의 正相充電電流에 대한 13.3% 程度로 概算할

수 있다.

2次 Arc 電流의 持續時間을 定하는 2次 Arc 電流의 消弧限界에 對한 說明은 두 主張으로 分流되어 있으므로, 一定한 基準値는 없고 各國은 實驗과 經驗에 의하여 適當한 數值를 推定하여 使用한다. 이것은 周知하는바 같이 Arc 電流의 消滅條件이 氣象條件과 電氣的狀態의 복잡한 要素로 決定되고 또한 試驗條件이 각각 틀리는 理由이다. 첫째 主張은 2次 Arc 電流의 消弧는 大氣중에서 消弧現象이므로 바람, 습기와 같은 氣象條件과 Arc 길이와 故障電流의 殘留 Ion 등에 의하여 영향을 받으므로 原理的으로는 遮斷器의 遮斷現象과 同一하게 생각하여 消弧現象은 2次 Arc 電流와 2次回復電壓으로 法定된다는 說明이다. 即 2次 Arc 電流의 持續時間은 주로 2次 Arc 電流와 2次回復電壓의 크기의 函數로 表現하였으며, 尾崎氏⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾가 400KV 級の 消弧特性實驗에 얻은 結果와 같다. 둘째 主張은 Sweden의 380KV 送電線 現場試驗에서 얻은 結論이다. 即 2次 Arc 電流의 消弧狀態는 주로 2次 Arc 電流의 크기에 의하여 決定되고 2次回復電壓은 2次的인 要素가 되므로, 2次 Arc 電流의 持續時間은 系統電壓과 遮斷亘長의 函數가 된다는 主張이다.

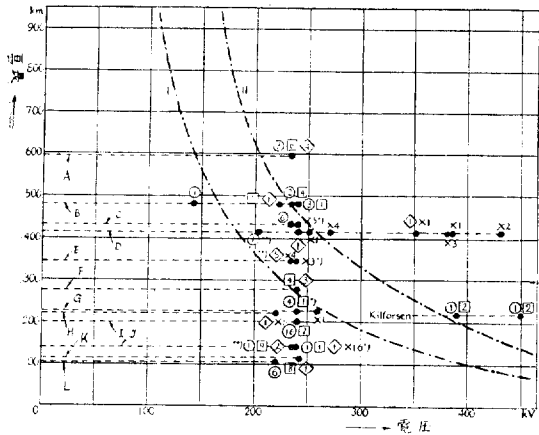
2次 Arc의 自然消弧現象에 尾崎氏의 試驗報告⁽¹⁵⁾에 의하면 一次故障電流에 比例하여 故障 Arc 길이는 增加하므로, 2次 Arc로 移動되었을때 一次故障電流가 클수록 2次 Arc의 消弧時間은 短縮된다. 安生氏의 試驗報告⁽¹⁶⁾에서 2次 Arc는 時間의 經過에 따라 Arc 電磁力으로 Arc 길이가 延長되고 比例하여 Arc 電壓이 높아지므로, 回路條件으로 決定되는 入力の Arc 電力이 不足할때 Arc는 消滅됨을 說明하였고, 또한 Arc 길이의 增加過程에서 Arc 電力이 最大值에 到達하면 1~2 cycle 후에 Arc는 自然消弧된다는 計數까지 提示하였다.

單相再閉路때 2次 Arc 電流가 흐르는 동안 一次故障電流의 殘留 Ion은 消滅되고 있으므로, 故障電流의 絶緣回復時間은 最少無電壓時間에 加算할 必要가 없으나, 2次 Arc 電流의 絶緣回復時間은 最少無電壓 時間에 加算하여야 한다는 主張이 있다. Wilcox氏⁽¹³⁾는 330KV 系統의 實驗에서 零 cycle을 報告하였고 尾崎氏⁽¹⁵⁾의 400KV 系統 實驗에서는 1 cycle을 使用하였다.

(d) 2次 Arc 電流에 의한 單相再閉路의 適用限界; 前述한바 같이 2次 Arc 電流의 持續時間은 現在 不明確한 狀態에 있으므로 그 適用限界를 正確히 決定할수는 없으나 代表的인 系統에서 適用되는 예는 표4와 같다.

BBC社의 M.Müller氏, F. Gygaz氏⁽¹⁸⁾등은 無電壓時間 0.4秒의 單相再閉路가 成功할 수 있는 限界를, 2次

Arc 電流의 持續時間은 系統電壓과 遮斷亘長의 函數가 된다는 前提下에서 그림1을 作成하였는데, 이것은 大體의인 概算值를 決定할때 간편하여 超高壓系統에서 흔히 使用된다. 그림1에 의하면 345KV 送電系統은 0.4秒의 無電壓時間에서 單相再閉路를 適用할수 있는 亘長은 240km 以下가 된다.



- A : Fontenay-Chevilly-Breuil-La Mole-Eguzon
- B : Alfta
- C : Fontenay-Chevilly-Breaul
- D : Storfinnforsen
- E : Fontenay-Eguzon I
- F : Fontenay-Eguzon II
- G : Fontenay-Marmagne
- H : Shawinigan Co
- I : Hydro-Electric Power of Ontario
- J : Fontenay-Chaingy I
- K : Fontenay-Chaingy II
- L : Erstfeld

그림 1. EHV 계통의 각종 전압과 선로공장에 대한 단상 재폐로때 2차 Arc 전류상태를 실험한 결과

- 註 (1) ○ : 2차 Arc 전류지속시간 (0~0.1S.)
 □ : " (0.1~0.2S.)
 ◇ : 2차 전류 지속시간 (0.2~0.3S.)
 × : " (0.3S. Dead time) 0.535
- (2) 기호 ○□◇×의 안 또는 옆에 기입된 숫자는 시험 회수
- (3) ☆ 120cm 高水壓 Arc Horn 간의 Arc(바람에 대한 Shield가 있는 경우)
 ☆☆ 磚子 String에서의閃絡(바람에 대한 Shield가 없는 경우)
- (4) 곡선 I의 좌측영역 : 재폐로 성공영역
 곡선 II의 우측영역 : 재폐로 실패영역
 곡선 I, II의 중간 : 재폐로의 성공 불확실 영역(Dead time을 길게하면 성공이 가능한 범위)

Sweden의 400KV 系長⁽¹⁰⁾은 0.4~08秒의, 無電壓時

間에서 單相再閉路를 適用할 수 있는 亘長을 240km 以下로 結論하고 있다.

Rhodesia의 330KV Kariba 系統⁽¹³⁾⁽²⁷⁾은 單相再閉路를 使用하고 있는데, 無電壓時間 0.7秒를 305km의 遮斷거리에 適用하고 있다. 建設後 2年동안의 事故統計에 의하면 총순간 事故의 60%가 單相再閉路에 의하여 成功하였다.

표 4. 成功할 수 있는 單相再閉路時間

	系統電壓 (kv)	最大遮斷 亘長 (km)	再閉路時間 (sec)
Müller 調査	350	192	0.54
Sweden 記錄	380	240	0.54~0.94
Rhodesia 記錄	330	304	0.84
South Austria 記錄	275	289	0.64
尾崎의 400KV實驗	—	200	0.55
武山試驗場實驗	500	200	1.14

註 : 再閉路時間은 無電壓時間에 0.14 sec 가산함

South Austria의 275KV⁽¹⁹⁾ 系統에서는, 0.5秒의 無電壓時間을 適用한 單相再閉路를 288km의 送電線에서 實驗하여 成功을 하였고, 305km 送電線에 適用하고 있다.

日本武山試驗場の 500KV 實驗⁽²⁰⁾結果에 의하면 單相再閉路를 適用할 수 있는 限界는 最大 遮斷亘開 160 km에서 無電壓時間은 0.8秒, 또한 200km에서 1.0秒이다.

韓電에서 計劃하고 있는 345KV 系統의 建設初期에 最長遮斷亘長은 220km 程度이므로, 一線地路電流는 7.6KA~6.1KA, 最大 2次 Arc 電流는 31.3Amp, 最大 2次 回復電壓은 37.3KV로 計算된다. 이 數值를 표4의 各 系統과 比較하면, 韓電에서 建設할려는 最大 遮斷亘長은 Sweden 380KV 系統과 類似하므로, 再閉路時間은 0.54~0.94秒로 推定할수 있다. 따라서 韓電의 最大遮斷亘長 系統은 單相再閉路의 許容限界內에 있음을 알 수 있다.

나. 單相再閉路때 無電壓時間중의 保護繼電器 誤動作

a. 故障相選擇繼電器; 3相再閉路는 故障區間의 遮斷器에 의하여 故障線路가 三相同시에 開放되므로 繼電裝置는 故障點이 保護區間의 內部에 있는지 如否를 判斷하는 것으로 充分하다. 그러나 單相再閉路는 故障相간의 遮斷과 再閉路를 하므로, 單相再閉路를 實施하기 위하여는 故障區間의 判定에 追加하여 保護區間의 故障時 故障相의 正確한 區別을 하여야 한다. 一般의으로 單相再閉路에서는 地路相을 識別하기 위한 相選擇繼電器⁽²¹⁾를 使用한다.

相選擇繼電器는 系統에 따라 單純한 過電流繼電器

또는 不足電壓繼電器를 使用할 수 있다. 또한 零相電流와 逆相 혹은 正相電流를 比較하거나, 各相電壓의 位相을 比較하는 것과, 各相電壓의 平衡狀態에 依하여 動作되는 것등을 製作하고 있다. 그러나 最近에 一般의 所以로 使用되는 것은, 地路距離繼電器의 方向要素, Impedance 形 電流補償不足電壓繼電器 및 各相의 位相比較繼電器 등이다.

相選擇繼電器는 外部事故때 不動作하거나, 多重事故를 考慮하지 않을때 相選擇의 錯誤가 있어도 支障은 없는데 이것은 繼電裝置 中에서 故障區間을 判別하는 部分은 Trip 指令을 하지않은 때문이다. 그러나 內部事故때 相選擇은 正確하여야 한다. 零相電流와 다른 電氣量의 位相을 比較하는 相選擇繼電器는 單相再閉路의 過程에서 誤動作하는 경우가 있으므로 各種의 Inter-Lock 裝置를 追加하여야 한다. 그러나 故障狀態에 따라 Cover 할 수 없고 또한 構造가 複雜하므로 使用할 수 없는 경우가 있다.

b. 後備保護繼電器의 誤動作; 單相再閉路 過程중 系統의 한相은 開放되고 各部分에 負荷電流가 흐르면 그림2와 같이 逆相 및 零相電流가 화살方向에 흐른다.

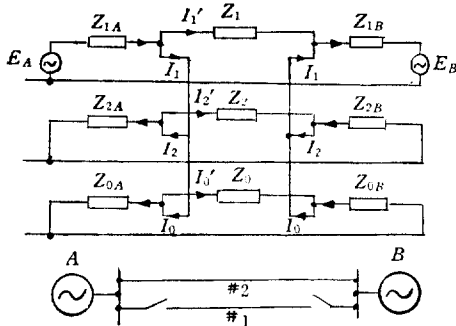


그림 2. 無電壓時間중의 對稱分電氣量

斷線된 線路의 零相電流와 그 背後線路의 零相電流가 흐르는 方向은 保護區間 內部事故때와 同一하다. 이것은 斷線된 相의 回線의 兩端에 있는 모든 方向地路繼電器는 充分히 動作할 可能性이 있음을 말한다. 方向地路繼電器가 內部事故로 判定하고 動作할때 方向比較搬送繼電方式을 使用하면, 方向地路繼電器는 內部事故로 判斷한 다음, 地路相의 選擇繼電器에 의하여 遮斷器는 Trip 될 수 있다. 만약 斷線때 健全相의 動作을 沮止하는 相選擇繼電器를 使用하면 相選擇繼電器에 의한 誤動作은 抑制할 수 있다. 그러나 零相電流의 位相角으로 動作 Torque 를 얻는 相選擇繼電器를 使用하면 斷線狀態에서 健全相의 相選擇繼電器는 誤動作을 할 수 있다. 反對로 斷線事故때 動作 Torque 를 얻을 수 없는 距離繼電器, 不足電壓繼電器 또는 兩端 各相의

電流位相角을 比較하는 것등을 使用하면 誤動作을 抑制할 수 있으나 故障相을 選擇遮斷하여야 할 경우에 誤動作할 可能性이 있다.

斷線狀態에서 搬送距離繼電器의 誤動作은 없으나 後備保護에 零相電氣量으로 驅動되는 地路繼電器를 使用하면 誤動作을 할 수 있다. 斷線중에 系統의 各分岐에서 零相電流가 흐르므로 많은 分岐點의 地路繼電器가 誤動作을 할 수 있다.

그림 3은 再閉路過程에서 A相만 開放되고 또한 遮斷된 相에 地路事故가 發生하는 경우이다. 그림 3의 各電流는 그림 2에서 分流되는 電流에 事故電流가 重첩된 경우와 같다.

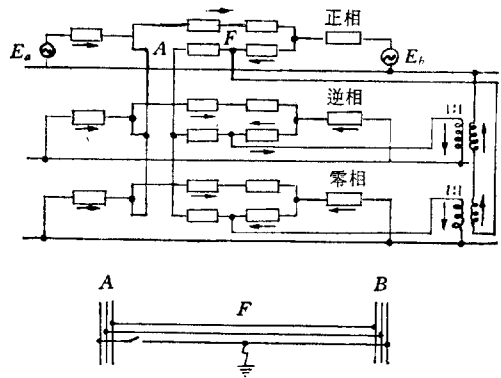


그림 3. 同相 一線 斷線 一線地路

電氣量은 系統條件과 免荷電流에 의하여 決定되므로 方向地路繼電器 및 零相電流와 他電氣量의 位相角으로 驅動하는 相選擇繼電器는 充分히 誤動作할 수 있다.

c. 短絡距離電器의 一線地路때 動作; 直接接地系統에서는 一線地路故障때 短絡繼電器가 動作할 수 있다.

표 5. 短絡距離繼電器가 보는 Impedance

驅動量	三相短絡	b-c 相短絡	a 相地路
$\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$	$Z_1' + \frac{R_F}{C_1}$	$Z_1' - j\sqrt{3}Z_{x1}$ $-\frac{aR_F}{C_1}$	$Z_1' + \frac{\sqrt{3}}{3}Z_{x1}$ $+\frac{(1-a^2)(Z_0+3R_F)}{3C_1}$
$\frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}$	$Z_1' + \frac{R_F}{C_1}$	$Z_1' + \frac{R_F}{2C_1}$	∞
$\frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$	$Z_1' + \frac{R_F}{C_1}$	$Z_1' + j\sqrt{3}Z_{x1}$ $-\frac{a^2R_F}{C_1}$	$Z_1' - \frac{\sqrt{3}}{3}Z_{x1}$ $-\frac{(a-1)(Z_0+3R_F)}{3C_1}$

註: ab 相 $I_a - I_b$, $V_{ab} = V_a - V_b$
bc 相 $I_b - I_c$, $V_{bc} = V_b - V_c$
ca 相 $I_c - I_a$, $V_{ca} = V_c - V_a$

a相 地絡때 표 5의 Impedance에 의하여 負荷電流를 無視하고, 繼電器 設置點 근처의 Δ Impedance를 作圖하면 그림 4와 같고, 또한 FA에 대하여 30° 의 線이 된다. 이 結果는 그림 5와 같이, 繼電器 設置點 근처의 一線地絡때 地絡相을 包含하는 短絡距離繼電器는 動作할 可能性이 있음을 表示한다. 即 健全相繼電器가 動作할 可能性은 없고, 地絡相을 包含하는 短絡

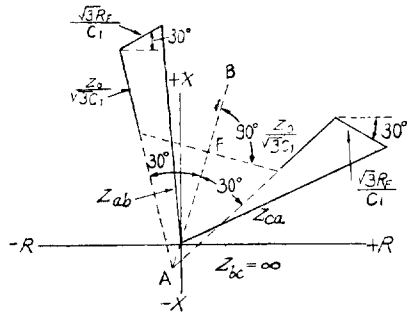


그림 4. a相 1線 地絡時 인근점의 Δ Impedance

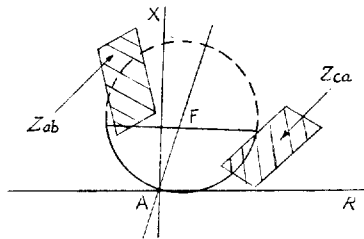


그림 5. a相 1線 地絡時 短絡距離繼電器가 보는 Impedance

距離繼電器의 整定範圍內에서 一線地絡이 發生할때 短絡繼電器는 動作을 한다. 單相再閉路는 地絡된 한相간의 再閉路가 絶對條件이므로, 一線地絡時는 短絡 Trip 回路를 開放하는 相選擇繼電器를 使用하여야 한다. 그러나 A相 地絡繼電器와 A-C相 短絡繼電器가 同時에 動作되는 多重事故에 A-C相의 故障除去時間은 遲延되므로 高速遮斷을 할수 없는 欠點을 갖고 있다.

다. 單相再閉路중의 出力發電器 特性

三相再閉路時는 對稱遮斷과 再投入이므로 非對稱 電氣量에 對한 影響을 받을수 없다. 그러나 單相再閉路를 出力系統에 適用할때, 無電壓時間중에 單相運轉을 하므로 發電機에 逆相電流를 흘려서 回轉子表面을 加熱하거나, 또는 再閉路時의 投入位相角으로 直流分의 振動을 隨伴한 動搖電流에 의하여 機器에 振動과 其他機械의인 충격을 發生시킬 憂려가 있다.

實際로 Turbine 發電機는 無電壓時間 一秒程度의 短時間 동안은 單相運轉을 許容하고 있으므로 回轉子表

面의 加熱은 큰 問題가 없다. 그러나 Turbine의 慣性이 큰 大容量 出力發電機는 單相再閉路時에 前述한 發電機의 位相角과 發電機에서 본 系統 Impedance의 急變等으로 振動成分을 包含하는 過渡 Torque를 發生하여 發電機를 危險限界點에 이르게 할 可能性이 있다. 이 過渡 Torque는 Turbine 發電機 結合系의 Torsion 共振과 軸의 許容應力, 혹은 軸 Coupling Spring Bar의 應力, 電機子 Coil-end部分의 電磁力, Bushing의 振動 등을 發生할 可能性이 있으므로, 製作社會에 따라 單相再閉路를 기피(20)하는 경우가 있다. 反面 東芝Co.의 有働氏 實驗(21)에서는 實際로 過渡 Torque의 影響이 적다고 報告하고 있다.

그러나 大容量 單位機를 運轉하는 超高壓系統에서는 單相再閉路의 實施에 앞서 發電機의 製作會社와 共同으로 그 影響에 대하여 慎重한 檢討를 하여야 한다는 것이 一般의인 見解이다.

韓電의 系統은 345KV 送電線과 154KV 系統을 完全히 Loop 運轉을 하는 Mesh系이므로 單相再閉路時 發電機의 過渡 Torque는 Unit單一送電線에 連結된 경우보다 현저히 輕減할것으로 期待된다.

라. 通信線의 誘導障害

三相再閉路時 故障電流를 遮斷할 수 있는 時間은 0.05~0.07秒 程度이며 또한 三相對稱再閉路이므로 通信線의 誘導障害에 대하여 特別한 考慮을 할 必要가 없으나, 單相再閉路時는 경우에 따라 影響(22)이 크다. 一線地絡電流를 遮斷하는 時間은 三相再閉路와 같은 時間程度이므로 一次地絡電流에 의한 影響은 無視할 수 있으나, 單相再閉路期間 중의 無電壓時間에 흐르는 2次 Arc 電流와 그 持續時間은 誘導障害의 直接的인 要素가 된다.

韓電 345KV 系統의 最大 2次 Arc 電流는 31.3Amp가 豫想되므로, Arc 電流의 持續時間을 0.80秒로 假定할때 通信線의 誘導障害은 매우 적으므로 誘導障害은 없을 것으로 생각된다. 經驗值에 의하여 通信線의 誘導電壓을 計算하면 (電力線과 通信線의 離隔距離는 500m, 並行距離는 10km로 假定) 20volts가 된다.

마. 高速度再閉路時의 過渡安定度 向上限異

一回線送電系統의 再閉路를 實施할때 三相再閉路方式에 比하여 單相再閉路方式은 故障線路의 再閉路期間중에 殘存한 健全相의 殘存同期化力에 의하여, 過渡安全極限 送電電力은 현저하게 增加시킬 수 있음은 周知의 事實이다. 그러나 Mesh化 系統 또는 2回線送電線에서 單相再閉路를 할때 殘存同期化力은, 故障回線의 健全相과 Loop 運轉중의 健全回線에 의하여 維持되므로 過渡安全極限送電電力은 三相再閉路에 比하여 큰 增加가 없다. 따라서 實系統에서 過渡安全極限 送電電力

은 系統網狀態와 系統의 慣性定數, 再閉路중의 無電壓 時間등으로 決定할 수 있으므로, 實系統의 摸似回路에 대하여 計算機處理를 하므로써 再閉路方式의 效果를 評價할 수 있다.

韓電의 建設初期 345KV 系統에 대한 過渡安定度 計算을 A.C. Board-Com-27(發電機 18機)을 使用하여

가. 瞬間故障에 系統信賴度를 向上하기 위하여 高速度再閉路方式을 適用하여야 하며, 또한 系統의 過渡安定度面에서는 三相再閉路 또는 單相再閉路의 어떤 方式을 適用하여도 系統安定度는 維持할 수 있다.

나. 그러나 IEEE-EEI 報告書(1967)의 事故率을 前提하면, 單相再閉路方式은 總 瞬間故障의 86%만 再閉

표 5. 過渡安定渡의 計算結果

Study Case No.	계통구성	고 장 상 태			제 폐 로 간	발전기간의 최대 위상차차				안정도		
		발생장소	종류	차단선로		고 장 전	제 폐 로 때	고장중의 1 slip cycle		안정	탈조	
								최 대	최 소			
1-1		서울	3φ	서울-대전	23.5(3)	G01~G04 =44°	G01~G04 =77°	G01~G04= 83°(31)	G04~G05= 34°(51∞)	○	○	
1-2		대전	"	대전-여수	28.0(3)	"	"=135°	"=180°(46)	G14~G16= 30°(66∞)	○		
1-3		여수	"	"	23.5(3)	"	"=116°	G04~G08= 167°(37)	G01~G16= 44°(57∞)	○		
1-4		(서울)	"	"	28.0(3)	"	"=150°	-	-	○		
1-5		(여수)	울산	"	대전-울산	23.5(3)	"	"=51°	G01~G04= 56°(15)	G01~G04= 38°(35∞)		○
2-1		서울	3φ	서울-대전	29.0(4)	G04~G15 =43°	G01~G15 =50°	G01~G15= 53°(35)	G01~G15= 36°(44∞)	○	○	
2-4		여수	"	대전-여수	23.5(3)	"	G04~G05 =115°	-	-	○		
2-6		(서울)	"	1φ	"	93.0(3)	"	G04~G15 =43°	G04~G15= 52°(22)	G04~G15= 42°(46∞)		○
2-7		(여수)	울산	3φ	대전-울산	29.0(4)	"	G04~G10 =63°	G04~G10= 65°(30)	G04~G15= 25°(50∞)		○
3-1		(서울)	(여수)	3φ	대전-여수	23.5(3)	G04~G05 =35°	G04~G05 =91°	G04~G05= 113°(34)	G01~G05= 23°(51∞)		○

註 *1 ; G01; 서울 #4, #5 G04; 여수 #1 G05; 영월 #2, G08; 경인 #1, #2 G10; 원자력 #1 G14; 호남 #1, #2 G15; 부산 #3, #4 G16; 동해 #1, #2

*2 ; () 안은 차단 cycle.

*3 ; () 안은 1 slip cycle 과정 angle 때 cycle.

實施한바 표5와 같은 結果를 얻었다.

前記의 檢討結果에서 說明된바와 같이 系統의 過渡安定度 特性은 三相再閉路 또는 單相再閉路의 모든 경우에 대하여 良好하다. 이것은 345KV 送電線과 既히 Loop化된 154KV 送電線을 Loop 運轉을 하므로써 系統은 完全히 Mesh化되어 健全線路의 殘存同期化力이 매우 견고한 것 외에, 大部分의 發電機는 154KV 母線에 連結되어 있으므로 345KV 線路가 三相開放될때 154KV 系統을 통한 發電機間의 電氣的인 等價距離는 짧은 것 등을 理由로 들수 있다.

4. 要 約

앞으로 建設될 345KV 送電系統에 對하여 適用할수 있는 再閉路方式의 長短點은 前記한바와 같이, 比較檢討하였다. 이것을 要約하면 다음과 같다.

路를 試圖할 수 있고 殘餘의 14%는 再閉路가 不可能한 欠點이 있다.

다. 3相再閉路方式의 最少無電壓時間은 15.5~20.5 cycles로 豫想할 수 있고, 또한 2回線送電線系統에서 健全回線에 依한 無電壓時間의 영향은 無視할수 있다.

라. 單相再閉路때 2次 Arc 電流의 持續時間은, 2次 Arc 電流와 2次回復電壓의 函數로 決定하는 理論과 2次 Arc 電流와 遮斷互長의 函數로 法定하는 理論으로 分流되어 있으므로, 韓電 345KV 系統의 最大互長(約 220KM 假定) 線路에 대한 것은 正確하게 推定할 수 없다.

그러나 두 理論의 中間值를 選擇하면 最小無電壓時間은 0.54~0.94秒 範圍로 假定할 수 있다.

마. 單相再閉路때의 無電壓時間을 短縮하려면 E.W. Kimbark의 Shunt Reactor 方法⁽²⁴⁾과 H.A. Peterson의 直列 Condens 方法⁽²⁵⁾, Water-Jet Ejector로 強制接地

하는 방법 등을 適用한 경우를 찾아볼수 있으나, 超高 壓系統에서는 保守의 不便과 設置費의 高價 및 事故의 波及 등의 理由로 一般의인 方法으로 適用하지 않는다

바. 單相再閉路때의 無電壓時間중에 遮斷區간의 健全線 方向地絡繼電器와 系統의 後備保護地 絡繼電器가 誤動作하거나 또한 一線地絡때 短絡用 距離繼電器가 誤動作할 可能性이 있으므로, 地絡相의 選擇繼電器와 繼電方式을 追加하는 方法을 特別히 考慮하여야 한다. 그러나 繼電方式이 複雜하고 正確한 相選擇을 할수 없는 경우가 있으므로 繼電方式의 信賴도는 低下된다.

사. 2次 Arc 電流의 最大値는 31.3 Amp. 程度이므로 無電壓時間중의 通線線 誘導障害는 無視할수 있다.

아. 單相再閉路의 無電壓時間에 大容量 出力發電機는 過渡 Torque의 發生으로 危險限界點에 到達할 수 있으므로 發電機製作所의 慎重한 檢討가 必要하다.

참 고 문 헌

- (1) IEEE-EEI Committee, Extra High Voltage Line Outages, IEEE Vol. PAS-86 No.5 (1967), pp. 547~562.
- (2) S.B. Griscom J.J. Torok, Keeping the Line in Service by Reclosing, Elec. Jour. Vol. 30 (May 1933), pp. 201~4.
- (3) Philip Sporn D.C. Prince, Ultra High Speed Reclosing of High-Voltage Transmission Line, AIEE Trans. Vol. 56 (Jan. 1937), pp. 81~90.
- (4) J.J. Trainor, J.E. Hobson H.N. Müller Jr., High-Speed Single-pole Reclosing, AIEE Trans. Vol. (Feb. 1942), pp.81~87.
- (5) A.B. Sturton, One, Two and Three Phase Automatic Reclosing of 230KV and 345KV Lines, IEEE Paper No. 63-993 (May. 1963)
- (6) 三上一郎, 平行多回線 送電線의 多相同時再閉路方式, JIEEJ Vol. 82 (Oct. 1962), pp.1437-1446
- (7) 久保木 實, 主要送電系統의 再閉路方式 採用實績 Elec. Power Vol. 48-7 (1964) pp. 26-30
- (8) IEEE Working Group, Arc Deionization Times on High Speed Three-pole Reclosing, IEEE Paper No. 63-938 (April. 1963)
- (9) IEEE Committee Report, Relaying the Keystone 500KV System, IEEE Vol. PAS-87 No.6 (1968), pp. 1434~1439
- (10) R.A. Lerner, Protective Relaying Practices for EHV System in Western Europe, IEEE Vol. PAS-81 No.2 (1963), pp. 1020-1028,
- (11) 電氣協同研究會, 400KV 級 送電, 電氣協同研究 Vol. 18 No.2 (196) pp. 73
- (12) G.Lyon D.J. Miller, IEEE Conference on Design Criteria and Equip. for Transmission at 400KV and Higher Voltages (1965), pp.17
- (13) T.W. Wilcox R.A. Hore, Single Phase Autoreclosure on the 330KV Kariba Transmission System, IEEE Vol. PAS-81 No.2 (1963) pp. 990~1006.
- (14) A.C. Boissau, Insulator Flashover Deionization Times as a Factor in Applying High Speed Reclosing Circuit Breakers, AIEE Trans. Vol. 68 (1949), pp. 1058~1067.
- (15) 尾崎勇造, 單相再閉路方式에서 2次 Arc의 消弧特性, JIEEJ Vol. 84-6 (1964), pp. 135~144.
- (16) 安生, 寺瀬, 川口, 長 gap 氣中 Arc의 自然消弧機構에 對한 研究, JIEEJ Vol. 88-4 (1968),
- (17) 尾崎勇造, 氣中交流 Arc의 諸特性, JIEEJ Vol. 87-7 (1967), pp. 1430~1438.
- (18) M. Müller, F.Gygax, C. Hahn P. Baltensperger, Protection of EHV Systems Taking into Account Single-Phase Automatic Reclosing on Long Lines, Brown Boveri Review Vol. 45 No. 6(1958), pp. 243~253
- (19) K.H. Mille, Single-pole Reclosing Tests on Long 275KV Transmission Lines, AIEE Trans. Vol. PAS-82 (Oct. 1963), pp. 658~661
- (20) 梅津. 尾崎, 巨大 Energy 輸送과 500KV 送電, OHM Vol. 58-1 (1971),
- (21) S.L. Goldsborough & A.W. Hill, Relays and Breakers for High-speed Single-pole Tripping and Reclosing, AIEE Trans. Vol. PAS-61 (1942), pp. 77~81
- (22) 有働宗幸, 單相再閉路時의 過渡 Torque 에 對하여, JIEEJ Vol. 84-2 No. 905 (1964), pp. 113~122.
- (23) E.W. Kimbark, Power System Stability Vol. II (1950), pp. 234
- (24) E.W. Kimbark, Suppression of Ground Fault Arcs on Single-pole Switched EHV Lines, IEEE Vol. PAS-83 (1964), pp. 285~290.
- (25) H.A. Peterson, A Methode for Reducing Dead Time for Single-Phase Reclosing in EHV Transmission, IEEE Vol. PAS 88-4 (1969), pp. 286~292
- (26) R.B. Shipley, H.J. Holley and D.W. Coleman, Digital Analysis of Single-pole Switching on EHV Lines, IEEE Vol. PAS 87-8 (1968), pp. 1679~1687.
- (27) F.C. Winfield, T.W. Wilcox & G.Lyon, The Design of the 330KV Transmission System for Rhodesia IEE Proc. Pt. A. Vol. 105 (1958), pp. 580~604