

消弧線輪을 設置한 送電系統에 있어 中性點電壓上昇에 關하여

千 昌 根

緒 論

消弧線輪을 送電系統 中性點에 接續한 系統에
 入어 消弧線輪의 Reactance (ωL)는 補償될 系統
 의 Suceptance ($1/3 \omega C$)에 對하여 一線接地事故時
 의 消弧를 完全하게 하기 爲하여 大體으로 같
 은 값을 가지도록 消弧線輪의 Tap가 選定된다.
 萬若 이 系統에 入어 送電線路의 對地靜電容量
 의 不均衡度가 甚할 境遇에 나타나는 殘留電壓
 開閉 및 遮斷裝置의 一相開放 또는 送電線路의
 一線斷線事故 등으로 因하여 不均衡電壓이 中性
 點에 加壓되는 때에는 消弧線輪의 Reactance와
 線路靜電容量間에 直列共振現象이 發生하여 消
 弧線輪의 電壓을 많이 上昇시켜 線路 및 機器의
 絕緣을 破損할 憂慮가 있다.

이러한 直列共振現象이 發生할 時에 中性點電
 壓의 甚한 上昇을 抑制하는 要素는 消弧線輪의
 補償差의 Reactance (即 過 또는 不足補償으로 因
 한 Reactance), 消弧線輪, 變壓器의 損失分의 等
 價抵抗, 送電線路의 抵抗 그리고 消弧線輪鐵心
 의 飽和이다.

本文에서는 虛川江第一送電線, 東興南送電線
 을 虛川江第二發電所에서 24,000 KVA 消弧線輪
 으로서 補償할 時를 例로 들어 殘留電壓, 一線斷
 線等事故時 中性點電壓이 如何한 程度로 上昇하
 는지 檢討하고자 한다.

殘留電壓

第 1 圖의 送電系統에서 各線의 大地에 對한
 靜電容量을 C_a, C_b, C_c 로하고 中性點에 나타나는
 殘留電壓을 求하면 第 1 式과 같이.

$$E_o = - \frac{C_a E_a + C_b E_b + C_c E_c}{C_a + C_b + C_c} \dots \dots \dots (1)$$

絕對値는

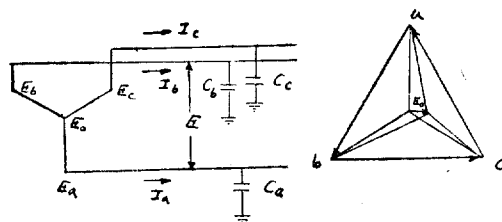
$$E_o = \frac{\sqrt{C_a(C_a - C_b)} + C_b \sqrt{C_b - C_c} + C_c \sqrt{C_c - C_a}}{C_a + C_b + C_c} \times \frac{E}{\sqrt{3}}$$

$$= U \times \frac{E}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (1)'$$

여기서 E는 線間電壓이며, U는 非對稱度라
 한다. 一相이 開放될 境遇, U는 50% 二相이
 開放될 境遇에는 100%가 된다. 線路의 非對稱
 度가 常時 클 境遇에는 어떤 相의 碍子에 過大
 한 電壓이 加壓되고 또 接地繼電器를 誤動作시
 킬 念慮가 있다.

殘留電壓을 작게 하기 爲하여서는 線路燃架를
 充分하게 많이 하여야 된다는 것인데 독일 VDE
 規定에서는 導線이 三角形配置일 境遇 亘長 80
 KM마다 1回, 水平配置일 時에는 40 KM마다
 1回의 燃架가 必要하다.

殘留電壓의 計算;



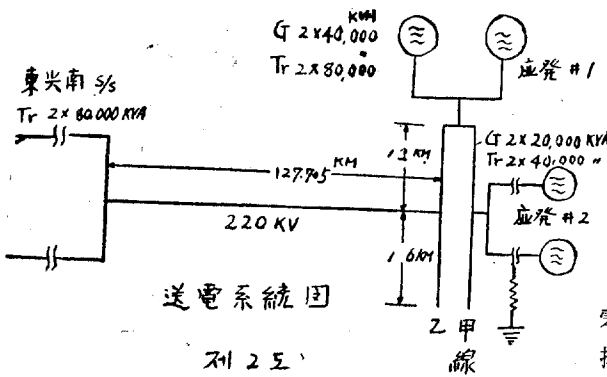
제 1 도

本送電系統에 入어 無負荷時에 虛川江 第 2 發
 電所에서 東興南送電線 또는 虛川江 第 3 發電
 所까지의 線路一相을 開放할 時의 殘留電壓을
 (1) 式에 依하여 求하면 第 1 表와 같다.

(第 1 表) 殘留電壓計算値

事故有無	C_a μF	C_b μF	C_c μF	同調度 %	殘留電壓 V	線路狀態
無	1.09211	1.09393	7.09614	0.10651	142	東興南線 및 虛川江 2回 線使用時
"	0.91653	0.91712	0.91395	0.10625	141	東興南線 및 虛川江 乙回線吐 使用時
一相開放	7.0921	7.0921	0.35635	22.457	29.822	東興南線 一相開放時
"	7.0921	7.0921	7.0083	2.559	3.398	虛川江 #2~3間 一相開放時

相電壓 230 KV



제 2 도

參考로 長津江 110 KV 送電系統에서 1939 年 3 月 1 日 實測한 殘留電壓은 各 地點에서 第 2 表와 같다.

時刻	周波數	長津江 #1	長津江 #2	清 津	赴戰江 #1	赴戰江 #2
15H45'	59.91	60V	138V	200V	447V	—
17H15'	60.03	60V	164.2V	235.6V	480V	184V

第 2 表 殘流電壓測定值

無負荷時直列共振

여기에서는 消弧線輪의 tap 가 完全히 線路靜電容量하고 맞도록 選定되었을 時에 直列共振이 發生하였다고 假定하고 이때에 直列共振電流를 制限하는 抵抗을 R_s 라하면

$$R_s = -\frac{\omega L}{100} (W_L + W_T \frac{KVA_L}{KVA_T} + W_G) + R$$

但 ωL : 消弧線輪의 Reactance.

KVA_L : " " 의 容量,

W_L : KVA_L 를 規準으로한 消弧線輪의 損失%,

KVA_T : 變壓器의 容量,

W_T : " " 의 損失,

W_G : KVA_L 를 規準으로한 線路의 漏洩損失%,

R : 送電線抵抗, 接地抵抗 等의 直列抵抗.

이 制限抵抗 R_s 는 작을 수록 消弧에 對하여 좋고, 直列共振防止의 見地로 보아서는 클수록 좋다.

殘留電壓을 E_0 , 制限抵抗을 R_s , 消弧線輪에 흐르는 電流를 I_N 라하면 直列共振時의 中性點電壓 上昇 E_L 은

$$E_N = \pm \sqrt{E_0^2 - (R_s I_N)^2} + \frac{I_N}{3\omega C} \dots \dots \dots (2)$$

上記와 如히 表示되고, $\omega L = \frac{1}{3\omega C}$ 일 境遇

$$E_N = \frac{E_0}{R_s} \omega L$$

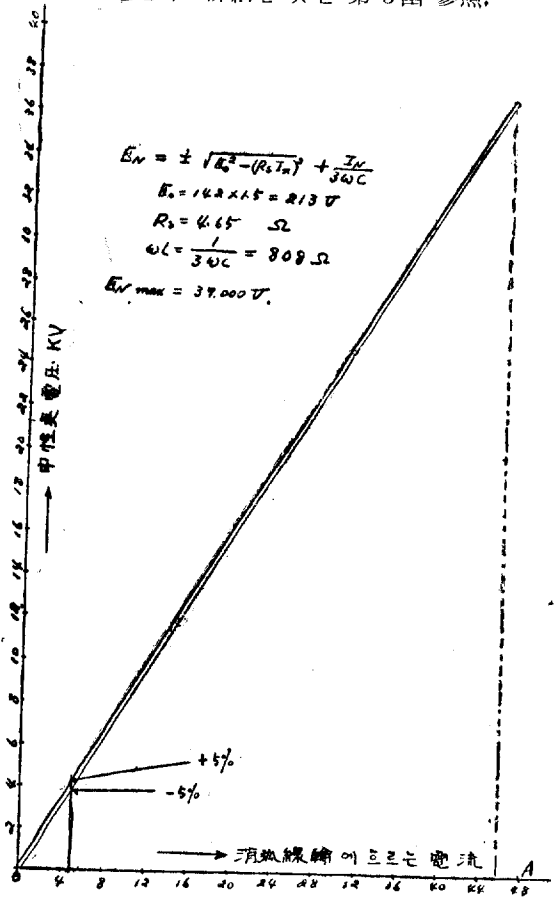
로 表示되고 E_N 는 最大值가 된다.

第 2 圖의 送電系統에서 R_s 를 求하면

$$R_s = \frac{808}{100} (0.5 + \frac{0.55}{2} \times \frac{21,800}{40,000 \times 2} + 0) + 0 = 4.65 \Omega$$

여기에서는 苛酷한 條件을 取하기 爲하여 R 는 零으로 하고 以下 必要한 計算에 이 數値를 採擇하였다.

公式 (2) 를 使用하여 第 2 圖 系統에서 直列共振으로 因하여 發生하는 中性點電壓을 求하면 5% 過保價時에는 4.2 KV 5% 不足補償時에는 3.8 KV, 完全同調時에 直列共振이 發生하면 37 KV 에 達한다. 詳細한 것은 第 3 圖 參照.



제 3 도

平常時直列共振中性點電壓

遮斷器故障時의 直列共振

線路投入時 遮斷器의 한 相이 故障이 發生하

여 2 상만 充電되고 나머지 한 상은 充電되지 않은 故障를 假想하였으나 이러한 境遇는 稀有하며, 遮斷器의 3 相이 同時에 들어가지 않은 境遇는 많다고 生覺할 수 있다.

a) 虛川江 第二發電所에서 遮斷器의 한 相이 늦게 들어갔을 時의 中性點電壓上昇 (E_N)은

(a) 東興南線一相이 充電되지 않을 境遇

(第 3 表)

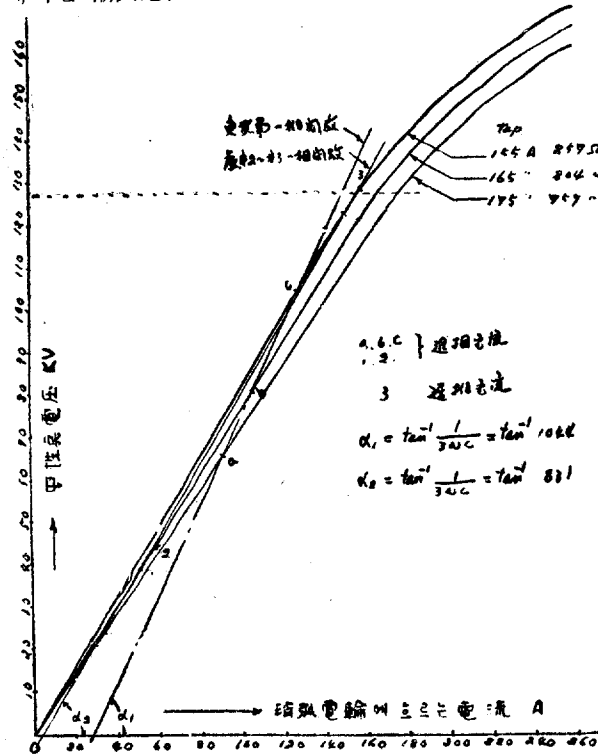
Tap	補償度	I_N	E_N	備考 殘留電壓은
155A	-5.5%	134A	110KV	29,822V 임
165 "	+0.61%	110A	85 "	
175 "	+6.7%	95A	69 "	

(b) 虛川江 第 2~ 第 3 發間 1 相이 充電되지 않을 境遇

(第 4 表)

Tap	補償度	I_N	E_N	備考 殘留電壓은
155A	-5.5%	160A	129.5KV	
165 "	+0.61%	58 "	44.6 "	3,398V 임
175 "	+6.7%	34 "	25.0 "	

第 3 第 4 表와 같다. 여기서 E_N 의 값은 消弧線輪의 飽和曲線을 規定電壓 230 KV/ $\sqrt{3}$ 以上에서는 漸次飽和하여진다고 假定하여 第 4 圖에



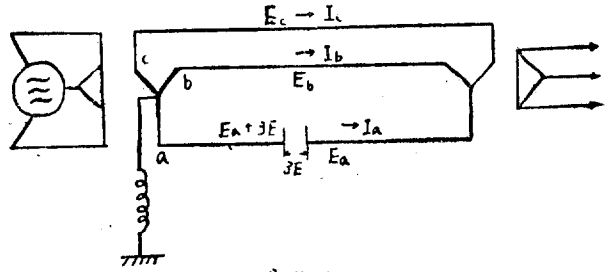
제 4 도

無負荷一線開放時直列共振中性點電壓

依하여 求할 것이다.

斷線事故發生時的 直列共振

理論: 1 線斷線時에 있어 中性點의 電壓上昇 問題를 解決하기 爲하여 第 5 圖에 示한 故障點의 負荷側의 各相電壓을 E_a, E_b 및 E_c 로 定하고, 斷線線條間의 電壓을 $3E$ 라하면 故障點 및 電源側에 있어 各相의 電壓은 $E_a + 3E, E_b, E_c$ 가 된다. 故障點의 兩側의 電流에는 變化가 없다.



제 5 도

故障點에 있어 電流의 對稱分을 I_0, I_1 및 I_2 라 하면 故障點의 電源側에 있어 對稱分電壓은

$$\begin{aligned} E_0 + E &= Z_{0A} I_0 \\ E_1 + E &= E_a - Z_{1A} I_1 \\ E_2 + E &= -Z_{2A} I_2 \end{aligned} \quad \dots (3)$$

故障點의 負荷側에 있어 對稱分電壓은

$$\begin{aligned} E_0 &= Z_{0B} I_0 \\ E_1 &= Z_{1B} I_1 \\ E_2 &= Z_{2B} I_2 \end{aligned} \quad \dots (4)$$

(但 A의 記號는 電源側, B의 記號는 負荷側을 表示하는 것이고, 例를 들면 Z_{0A} 는 故障點부터 電源側을 向하여 本 零相 Impedance를 表示한다

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad \dots (5)$$

임으로 上記 (3) (4) 및 (5) 式으로부터

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{-(Z_{2A} + Z_{2B}) E_a}{\Delta} \\ I_1 &= \frac{\{(Z_{0A} + Z_{0B}) + (Z_{2A} + Z_{2B})\} E_a}{\Delta} \\ I_2 &= \frac{-(Z_{0A} + Z_{0B}) E_a}{\Delta} \\ E &= \frac{(Z_{0A} + Z_{0B})(Z_{2A} + Z_{2B}) E_a}{\Delta} \end{aligned} \quad \dots (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= (Z_{0A} + Z_{0B})(Z_{1A} + Z_{1B}) + (Z_{1A} + Z_{1B})(Z_{2A} + Z_{2B}) \\ &+ (Z_{2A} + Z_{2B})(Z_{0A} + Z_{0B}) \\ &= (Z_{0A} + Z_{0B}) \{(Z_{1A} + Z_{1B}) + (Z_{2A} + Z_{2B})\} \\ &+ (Z_{1A} + Z_{1B})(Z_{2A} + Z_{2B}) \end{aligned}$$

(6)식에 의하여 故障點에 있어 各對稱分電流을 求할 수 있다. 따라서 此로부터 零相回路的 電流分布를 求하고, 送電端에 있어 그 電流값을 3倍로 하고, 여기에 消孤線輪의 Impedance Z를 乘하면 中性點電壓은 求할 수 있다.

故障點을 送電端으로 하고, 正相 Impedance와 逆相 Impedance가 過渡狀態에 있어 그 값이 같다고 하고 또 簡單하게 하기 爲하여

$$Z_{oA} + Z_{oB} = 0 \text{라 하면,}$$

$$\left. \begin{aligned} I_o &= -\frac{E_o}{Z_{1A} + Z_{1B}} \\ I_1 &= -I_o \\ I_2 &= 0 \\ E &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

따라서 線路的 對線間容量을 無視하면 無負荷 充電狀態에 있어 一線이 切斷되었을 때에는 零相電流은 一相의 對地充電電流과 같아지고 中性點電壓은 接地故障의 境遇와 같이 相電壓까지 上昇하게 된다. 또 斷線線條間에는 조금도 電壓이 나타나지 않는다. 實際問題로서는 對線間容量을 無視할 수 없는故로 假令 無負荷充電狀態에서 斷線하여도 中性點은 相電壓以上の 電壓이 發生한다. 萬一 負荷가 걸리면 負荷에 比例하여 中性點電壓은 한層더 上昇하게 된다. 勿論 故障點의 位置에도 影響을 받고, 消孤線輪이 送電端에 設置된 境遇에는 故障點이 送電端으로부터 멀리 멀어짐에 따라 電壓上昇은 낮아지고, 受電端에 가서는 零이 된다.

斷線線條間에 나타나는 電壓 3E는 故障點의 位置에 依한 影響이 없다. 따라서 恒常大體로 一定한 값을 가지고 있으며 線間電壓보다 若干 크다.

또 萬若 消孤線輪이 受電端에 設置되었을 때에는 中性點의 電壓上昇은 送電端에서 斷線事故 때에는 相電壓의 拆半이 되고 故障點이 受電端에 가까와 질수록 커진다.

假令 斷線事故時에 計算에 있어 過度值를 取扱한다면 正相分, 逆相分의 Impedance가 같다고 할 수 있음으로 (6)式은

$$\left. \begin{aligned} I_o &= \frac{E_a}{2(Z_{oA} + Z_{oB}) + (Z_{1A} + Z_{1B})} \\ I_1 &= \frac{(Z_{oA} + Z_{oB} + Z_{1A} + Z_{1B}) E_a}{\{2(Z_{oA} + Z_{oB}) + Z_{1A} + Z_{1B}\} (Z_{1A} + Z_{1B})} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= \frac{-(Z_{oA} + Z_{oB}) E_a}{\{2(Z_{oA} + Z_{oB}) + (Z_{1A} + Z_{1B})\} (Z_{1A} + Z_{1B})} \\ E &= \frac{(Z_{oA} + Z_{oB}) E_a}{2(Z_{oA} + Z_{oB}) + (Z_{1A} + Z_{1B})} \end{aligned} \right\} (8)$$

로 되고, 萬一 $(Z_{1A} + Z_{1B})$ 가 $(Z_{oA} + Z_{oB})$ 에 比하여 그 값이 작을 境遇에는

$$E \approx \frac{E_a}{2} \dots\dots\dots (9)$$

로 되고, 斷線線條間에 나타나는 電壓은

$$3E = \frac{3}{2} E_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt{3} E_a \dots\dots\dots (10)$$

이 되고 線間電壓의 86.6%에 該當한다.

計算:—

1) 東興南變電所를 向하여 109,500 KW (p.f. 0.8)의 負荷를 送電하고 있는 狀態에서 東興南變電所에서 5 KM 떨어진 地點에서 一相斷線事故가 發生하였다고 假定할 時에 中性點電壓上昇을 求하면 如下하다.

$$Z_{oA} = \frac{1}{0.0026369 - j0.037367} \times 10^3 = (1.8792 + j26.630) \times 10^3$$

$$Z_{2A} = Z_{1B} = \frac{1}{0.19665 - j3.5632} \times 10^3 = (0.015442 + j0.2798) \times 10^3$$

$$Z_{oB} = \frac{1}{0 + j0.010829} \times 10^3 = -j92.345 \times 10^3$$

$$Z_{2B} = Z_{1B} = \frac{1}{1.6574 - j1.7333} \times 10^3 = (0.28818 + j0.30139) \times 10^3$$

$$2(Z_{oA} + Z_{oB}) + (Z_{1A} + Z_{1B}) = (3.8544 - j130.843) \times 10^3 = /130.9 / \times 10^3$$

즉

$$I_o = \frac{-E_a}{2(Z_{oA} + Z_{oB}) + (Z_{1A} + Z_{1B})} = \frac{-E_a}{(3.8544 - j130.843) \times 10^3} = \frac{E_a}{/130.90 / \times 10^3}$$

따라서 中性點電壓上昇 (E_N) 은

$$E_N = 3ZI_o = 3 \times 430.06 \times \frac{230,000}{\sqrt{3}} = 2.526 \text{ V}$$

2), 1). 과 같은 送電狀態에서 虛川江 第2發電所에서 東興南變電所를 向하여 50 KM 地點에서 一相斷線故障이 發生하였을 時에 對하여서도 1)과 如히 計算하면 中性點의 電壓上昇은 279.4 KV가 되고, 또 같은 負荷狀態에서 虛川江 第2發電所에서 東興南送電所一相斷線時에는 中性點電壓上昇은 726.4 KV가 된다.

以上の 計算으로서 消孤線輪의 鐵心の 飽和를

繼線位置	零相 Impedance (Ω)	正逆相 Impedance (Ω)	中性點電壓上升(KV)
東興南 —x— 虛# 1 # 2 # 3	$Z_{0A} = (1,8792 + j26.63) \times 10^3$ $Z_{0B} = (0 - j92.345) \times 10^3$	$KM = Z_{2A} = (0.015442 + j0.2798) \times 10^3$ $Z_{1B} = Z_{2B} = (0.28818 + j0.30138) \times 10^3$	2.5
東興南 —x— 50KM 虛# 1 # 2 # 3	$Z_{0A} = (0.072118 + j5.0803) \times 10^3$ $Z_{0B} = (0 - j5.9018 \times 10^3)$	$Z_{1A} = Z_{2A} = (0.0078501 + j0.22723) \times 10^3$ $Z_{1B} = Z_{2A} = (0.3413 + j0.34011) \times 10^3$	279.4
東興南 —x— 虛# 1 # 2 # 3	$Z_{0A} = (0.028272 + j3.2188) \times 10^3$ $Z_{0B} = (0 - j3.5422) \times 10^3$	$Z_{1A} = Z_{2A} = (0.0032055 + j0.19443) \times 10^3$ $Z_{1B} = Z_{2B} = (0.38691 + j0.36458) \times 10^3$	736.4

考慮하지 않는 狀態에서 一線斷線時 消孤線輪의 中性點電壓이 瞬間의으로 莫大한 數値에 達하는 것을 理解할 수 있다.

結 論

上記 2, 3, 및 4의 項目에서 計算한 것을 綜合하여 보면 第 6表와 같다.

第 6 表 ※ 鐵心飽和不顧慮

線路狀態	補償狀態	殘留電壓	中性點電流	中性點電壓上升
平常時	同調 5% 過	$\Delta 142 \times 1.5v$	45.8A 5.2 "	37KV 4.2 "
無負荷時 東興南線一相 開放	5.5% 不足 0.61% 過 6.7% 過	29.822V	134A 110 " 95 "	110KV 85 " 69 "
無負荷時 虛# 2~# 3間 一相開放	5.5% 不足 0.61% 過 6.7% 過	3.398V	160A 58 " 38 "	129.5KV 44.6 " 25.0 "
虛# 2에서 東 線斷線 虛# 2 부터 50km斷線 東興南 부터 5km斷線	16.6% 過	—	292A ※ 112.5 " ※ 1.01 " ※	726.4kv 279.4 " 2.5 "

△ 50% 追加함

即 無負荷時의 殘留電壓에 依하여 直列共振이 發生할 境遇에는 中性點電壓은 最大 37 KV 까지 上昇하나 機器 및 線路絕緣에 對하여서는 아무런 障害가 없다.

無負荷時에 있어 遮斷器 또는 開閉器의 故障이 發生하여 一相이 閉路되지 않으나 또는 時間的으로 늦게 閉路되었을 時에는 中性點電壓이 相電壓까지 上昇하나 線路 2相의 對地電壓은 最大線間電壓까지 達하나 機器絕緣에 對하여서는 亦是 憂慮되는 點이 없다. 그러나 東興變電所에 負荷를 送電하고 있을 時에 線路一相이 斷線되었을 時에는 그 故障地點에 따라 左右되 지마는 最大 726 KV(理論值)에 達하는 結果가 되니 電氣機器의 絕緣等 破壞할 念慮가 多分이 存在한다. 그러나 上昇最大値는 消孤線輪의 鐵心飽和를 考慮하지 않은 條件下에서 求하였음으로 實地的으로 相當히 낮은 數値라는 것이 豫想되나 그래도 線路斷線事故에 對하여서는 警戒하여야 된다는 結論을 얻을 수 있다.