

張 種 根 金 正 夫 David R. Smith

The Application of Neutral Reactors to Limit Through Fault Duty on Substation Transformer.

J. K. JANG J. B. KIM David R. Smith
Research Center KEPCO P. T. I USA

Abstract—This paper presents the countermeasure to prevent the main transformer of distribution substation from deteriorating and failing due to repeated magnetic force of the transformer winding by ground fault current in 22.9kV multi grounded distribution system.

The winding strength to the short circuit current is designed to be durable to the stress of overcurrent But this design is related to the manufactures.

In this paper we examine the application of shunt reactor to the neutral point of the low side of the transformer to reduce fault current due to the fault in the distribution lines we have analyzed the fault characteristics of the system and calculated the optimum ohmic values of the neutral reactor.

그림 1에서 故障點의 正常임피던스 Z_{1Fz} 는 變壓器의 자냉定格에 있어서 變電所에서 부스측으로 본 正常임피던스 Z_{1Bz} 와 變壓器 自 냉定格에 있어서 故障點과 變電所 사이의 配電線路의 正常임피던스의 합이다.

$$Z_{1Fz} = Z_{1Bz} + l \frac{100 \text{ MVA}_T}{kV_{MV}^2} Z_{1L} \text{ in percent} \quad (1)$$

$$Z_{1Fz} = Z_{1Bz} + l Z_{1Lz} \quad (2)$$

$$Z_{0Fz} = Z_{0Bz} + l \frac{100 \text{ MVA}_T}{kV_{MV}^2} Z_{0L} \text{ in percent} \quad (3)$$

여기서 l = 變電所에서 故障點까지의 距離 [mile]
 Z_{1L} = 變電所과 故障點사이의 3상線路의 正常 임피던스 [Ω /miles]
 MVA_T = 主變壓器의 自 냉定格容量 [MVA]
 kV_{MV} = 主變壓器 Y結線의 상간定格 電壓 [kV]
 식 (2)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Z_{0Fz} = Z_{0Bz} + l Z_{0Lz} \quad (4)$$

$$Z_{1Lz} = \frac{100 \text{ MVA}_T}{kV_{MV}^2} Z_{1L}$$

Z_{0Lz} : 主變壓器의 自 냉定格에 있어 mile당 配電線의 零相임피던스 [%]로 그림 1에 그 抵抗分 R_{0Lz} 과 리액턴스분 X_{0Lz} 으로 나누어져 있다. 식 (3)와 식 (4)에 있는 Z_{0Bz} 는 主變壓器의 卷線에서 본 變壓器의 自 냉定格容量 [MVA]에 대한 零相임피던스 [%]이다.

低壓卷線의 中性點이 直接接地되어 있을 때 Z_{0Bz} 이면 中性點 리액터가 設置된 후 Z_{0Bz} 의 값은, 설치되지 않았을 때의 값과 Z_{Nz} 의 합이 된다.

여기서 Z_{Nz} : 變壓器 自 냉容量에 있어 中性點 리액터의 임피던스 [%]가 變電所 主變壓器의 卷線이 D-Y, Y-D-gY, D-gY 어느 것이든지 適用된다. 식 (2)와 식 (4)을 사용하여 Z_{0Fz} 와 Z_{1Fz} 를 계산하는데 主變壓器 定格電流의 per unit로 的 3상 故障電流 (I_{3F}) 및 1선 地絡電流 (I_{SLG})는 아래식 (5), 식 (6)으로 나타내어진다.

$$I_{3F} = \frac{100}{Z_{1Fz}} \text{ per unit} \quad (5)$$

$$I_{SLG} = \frac{300}{2Z_{1Fz} + Z_{0Fz}} \text{ per unit} \quad (6)$$

1. 序論

22.9kV-Y 다중접지 시스템은 타 供給防式에 比較하여 故障電流가 크고, 그 故障로 配電所에 설치된 大容量 電力用 變壓器의 卷線에 地絡 혹은 短絡으로 인한 電流가 증가되고 印加되는 電壓과 크기가 증가, 反復되에 따라 主變壓器 사고로 발전하게 된다.

變電所 主變壓器의 卷線은 D-gY, Y-D-gY, gY-D-gY 등의 結線을 사용한다. 이와같은 結果가 直接接地된 中性點 系統에서 變電所 22.9kV 母線에 地絡 事故時 變壓器에 흐르는 電流는 一般으로 三相 短絡電流보다도 크다.

물론 變電所 主變壓器의 事故가 電流로 過電流로 인해 발생한다고는 보기 어려우니 過電流를 줄일 수 있는 方案을 검토하므로 過電流 Stress로 인해 發生되는 系統設備 事故에 對한 部分的인 豫防對策으로 이 技法을 適用코자 한다.

2. 故障計算

2.1 I_{3F} I_{SLG} 의 計算

故障計算에 사용되는 方程式은 變電所 主變壓器 定格(OA) 電流의 per unit 電流로 나타내는데, 이것은 主變壓器에서 알 수 있는 故障責任에 있어 中性點 리액터의 影響을 계산하는 데 있어서 유용하다.

Z_{1Fz} Z_{1Bz} : 主變壓器의 OA定格에서 故障點 正常임피던스 [%] 및 零相임피던스 [%]

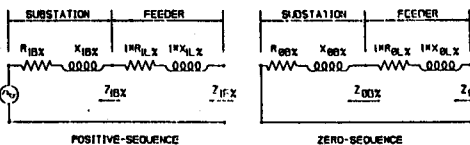


그림 1. Radial 配電系統의 故障에 對한 正常, 零相임피던스

2.2 變電所 母線事故時短絡電流 및 地絡電流

다음 表 1의 資料는 韓電系統 8개 變電所에 對한 變電所 22.9kV 母線에서 三相, 地絡事故과 一線 地絡 故障時 計算 가능한 故障電流에 對한 計算值을 列擧하고 있다. 이 計算치로부터 地絡 故障電流는 102%와 122% 사이에 있다.

Y-gY 變壓器가 있는 變電所만 고려하면 이 比率은 1.12와 1.22 사이에 있다. D-Y 結線을 가진 變壓器에서 三相 短絡電流에 對한 一線 地絡電流의 計算된 값의 比率은 表 1에서와 같이 1.02~1.03이다. 이러한 것들은 D-Y 結線 變壓器의 零相임피던스와 正常임피던스와 같다는 假定下에서 計算된 것이다.

表 1 韓電 變電所 變壓器, 故障電流, 過電壓 資料

Substation	MVA	Connections	Transformer Impedance			Short Circuit Currents			Unfaulted Phase Voltages	
			Res. (%)	Reac. (%)	Z (%)	Three-Phase Amps (X/R)	Line-To-Ground Amps (X/R)	Ratio	SLG Fault (PU)	DLG (PU)
Pyungtaeg	45/60	D-Y	0.42	15.1	15.1	7050(30.5)	7185(32.1)	1.02	0.99	0.98
Juan	45/60	Y-D-Y	0.42	14.4	14.4	7582(31.8)	8519(29.0)	1.12	0.94	0.86
Naminchom	45/60	Y-D-Y	0.42	14.3	14.3	7580(30.5)	9020(31.7)	1.19	0.92	0.77
Yongin	30/40	Y-D-Y	0.39	11.4	11.4	6187(22.7)	7524(23.7)	1.22	0.91	0.72
Mora	45/60	Y-D-Y	0.51	14.6	14.6	7113(21.7)	8561(18.3)	1.20	0.92	0.74
Nongong	45/60	Y-D-Y	0.51	14.7	14.7	6724(20.9)	8190(22.1)	1.22	0.91	0.72
Pohang	30/40	D-Y	0.59	11.9	11.9	5986(19.50)	6089(19.8)	1.02	0.99	0.98
Changwon	45/60	D-Y	0.51	14.7	14.7	7071(25.3)	7267(26.3)	1.03	0.99	0.97

2.3 故障点에서 健全相의 電位上昇

1선 地絡事故 또는 2선 地絡事故가 多重接地 系統에 發生되면 健全상의 대지간 電壓이 上昇한다. 一般的으로 1선 地絡事故時 故障点에서 健全相 B와 C相의 대지간 電壓은 각각 式(7)과 式(8)로 表現된다.

$$V_b = a^2 + \frac{Z_{1m} - Z_{0m}}{2Z_{1m} + Z_{0m}} \text{ per unit} \quad (7)$$

$$V_c = a + \frac{Z_{1m} - Z_{0m}}{2Z_{1m} + Z_{0m}} \text{ per unit} \quad (8)$$

式(7), (8)에서 a와 a²는 복소수이다. B相과 C相과 C相 2선 地絡事故에 있어서, 故障点에서 A相의 대지간 전압은 아래식

$$V_a = \frac{3 Z_{0m}}{Z_{1m} + 2Z_{0m}} \quad (9)$$

式(7), (8), (9)은 Z_{1m}과 Z_{0m}가 같은 크기 및 동상의 경우 故障点에서 健全相의 대지간 電壓은 나타나지 않는다.

表 2 零相임피던스와 健全相 相電壓 電位上昇

Substation	Sequence Fault Current Ratio (I ₀ /I _{ph})	Impedance Ratio (Z ₀ /Z ₁)	Unfaulted Phase-to-Ground Voltages	
			SLG Fault (PU)	DLG Fault (PU)
0	1.0	1.0	1.000	1.000
	0.95	1.16	1.026	1.048
	0.90	1.33	1.054	1.091
	0.85	1.53	1.083	1.130
	0.80	1.75	1.114	1.167
	0.75	2.00	1.146	1.200
	0.70	2.29	1.180	1.231
	0.65	2.62	1.213	1.259
	0.60	3.00	1.249	1.286

3. 中性点 리액터의 適用

中性点 리액터가 多重接地 中性線 配電系統에서 地絡 故障電流를 制限하기 위하여 設置될때 리액터의 리액턴스 값이 너무 크지 않아야 한다. 만약 리액터가 크게 되면 有効接地 系統에 대한 要求條件이 만족되지 않고 健全相의 對地電壓이 너무 높게 된다. 中性点 리액터가 多重接地 中性線 配電系統에 電力을 供給하는 變電所에 適用할 때 리액턴스는 變電所에서 對地電壓의 比가 2.0을 넘지 않도록 適擇되어야 한다.

變電所에서 R에 대한 X의 比가 何때를 假定하고 對地電壓에 대한 比가 2.0이 될때 이 系統은 有効接地 系統에 대한 要求條件을 滿足하고 여기서 有効接地 系統에 대한 要求條件은 (4), (5)式으로 주어지는 시퀀스 임피던스에 의해 주어진다. 追加해서 一相地絡 故障電流는 가 와 같을때 三相 故障電流의 75%가 된다.

$$X_0/X_1 \leq 3$$

$$R_0/X_1 \leq 1$$

리액터의 저항값을 增加하면 地絡故障時 主變壓器에 흐르는 電流를 줄일 수 있으나 리액턴스가 너무 크면 地絡故障時 健全相의 對地電壓이 너무 높게 된다. 表 2에 資料는 22.9kV 각 變電所 母線에 三相 故障電流에 대한 地絡電流의 比, 여기에 對應하는 시퀀스 임피던스 比와 故障중 健全상의 電位上昇을 나타내고 있다

3.1 計算

3.1.1 ohmic value

變電所에서의 中性点 리액터는 變電所에서의 地絡電流가 3상 故障電流보다 적도록 擇하여야 한다. 變電所 主變壓器의 임피던스보다 순수한 인덕턴스분으로 가정하면 리액터의 임피던스는 다음식으로 주어진다. 이 임피던스가 순수 인덕턴스가 아닐지라도 X/R 比가 매우 높아 리액턴스로 본다. $Z_m = \frac{1}{3}(Z_{1m} + Z_m)(\frac{3}{3} - 2) - \frac{Z_{0m}}{3}$ (10)

단 Z_m : 主 變壓器의 自定定格에서 中性点 리액터의 % 임피던스

Z_{1mv} : 主 變壓器의 自定定格에 있어 系統의 % 임피던스

S : 變電所 부스에 있어 3상 故障電流에 대한 1선 地絡電流의 比

Z_{0T}% : 主 變壓器의 自定定格에 있어 變電所 變壓器의 零相 % 임피던스

釜山 모라變電所에 있는 主 變壓器는 45/60MVA, Y-D-gV로 定格은 23kV이다. 45MVA 기준으로 變壓器 명판 임피던스는 14.63%, 中壓卷線에서 低壓卷線의 임피던스 7.8%이다.

地絡電流를 3相 故障電流의 85%로 하고, 中性点 리액터의 값을 計算하면 다음과 같다.

$$Z_{T\%} = 14.63\%$$

$$Z_{0T\%} = 7.8\%$$

$$S = 0.85$$

Z_{1mv}를 0로 가정하면 식에서

$$Z_{4\%} = \frac{1}{3} \times 14.63 (3/0.85 - 2) - 7.8/3 = 4.85\% [45MVA, 23kV 기준]$$

中性点 리액터의 [Ω] 값은 基準임피던스를 使用하여 換算한다.

우리 시스템에서는 地絡故障 電流가 三相 故障電流의 85%가 되도록 리액터 값을 정한다. 이것은 Z_0 에 대한 Z_0 의 비가 1.53에 해당된다. 이러한 條件下에서 表 2 資料에 보인 바와같이 一線 地絡事故 (2 相地絡) 時 健全相의 對地電位가 事故電 對地電位의 1.13배가 넘지 않는다. 이것은 系統運轉 電壓 (相間: 22.9kV)의 20%를 超過 ($13.2 \times 1.13 \times 1.2 = 17.93kV$) 하지 않을 때 18kV 피뢰기 사용도 가능하게 된다.

地絡故障 電流를 三相 短絡 故障電流의 85%로 制限하기 위하여 中性點 리액터의 값을 選擇할 때 變電所 主 變壓器의 高壓卷線은 無限母線 (0 인 임피던스) 電源에 連結될 것으로 假定한 것이다.

3.1.2 計算結果

中性點 리액터가 系統에 미치는 影響을 보여주기 위하여 變電所와 配電線路에 일어난는 故障에 대하여 그림 1부터 그림 5에 曲線들을 釜山에 있는 모라變電所에 대하여 그린 것이다. 이 變電所는 Y-g-Y-D로 되어 있으며 正相임피던스는 $0.51 + j14.62\%$ 이고 零相임피던스는 23kV에 45MVA를 基準으로 하여 7.8%이다. 그림은 다음의 條件으로 計算된 것이다.

가. 無限母線 154kV 系統

나. 336kcmil ACSR (170mm²)의 配電線 相導體와 3/0 ACSR 中性點 導體 (85 mm²) 相導體의 機何平均 距離는 4.86피트 (1.48m)이고 相導體와 中性點 導體間 機何平均 距離는 12피트 (3.66m)이다. 對地抵抗은 100 Ω-m로 한다.

다. 中性點 리액터는 0.57Ω로 한다. 이 값은 45 MVA, 23kV 基準으로 4.86%의 임피던스에 해당하고 Z_0 에 대한 Z_0 의 비는 變電所 22.9kV 母線에서 1.53이다.

라. 22.9kV 系統에서 故障前 相間電壓은 23kV이다.

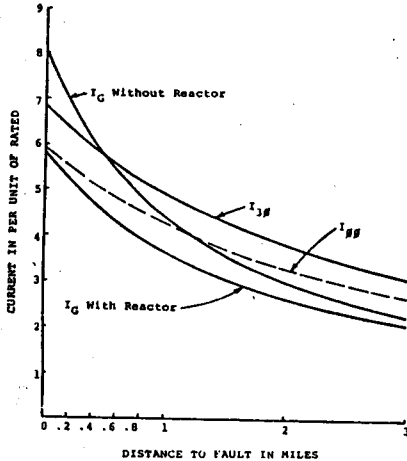


그림 1. 釜山 모라 S/S 0A 定格電流의 有效電流 P.U 值

變電所에서 부터 中性點 리액터가 없는 單相 地絡故障 및 中性點 리액터가 있는 單相地絡 故障時 電流값을 보여주고 있다. 點線은 非接地 相間故障에 대한 電流를 나타낸다. 이 曲線들은 變電所로 부터 故障點까지 Mile 單位로 된 距離와 變壓器 定格(OA) 電流의 P.U로 나타난 關係를 나타낸다. 中性點 리액터가 없으면 地絡電流는 三相故障 電流와 相間故障電流보다 각각 0.5 Mile (0.8 km) 과 1.2 Mile (1.93 km) 거리까지는 크다.

위에서 中性點 리액터는 變電所에서 2 miles 떨어진 地絡事故에 있어 故障電流를 per unit로 2.69로 (約 13%정도) 줄인다. 事故가 變電所에 가까울수록, 中性點 리액터는 故障電流를 줄이는데 더 큰 影響을 갖는다.

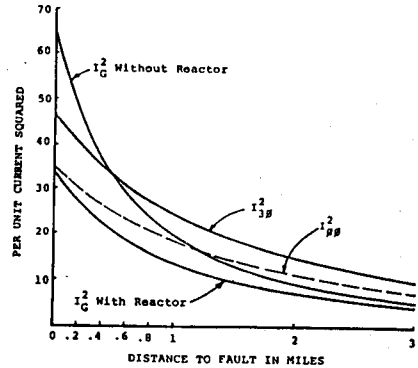


그림 2. 釜山 모라 S/S의 22.9kV 配電線 故障電流에 대한 P.U 值

變壓器 卷線에 있어 機械的 힘은 電流의 자승에 比例함으로 그림 2는 變電所에서 事故點까지 距離와 電流의 자승의 關係를 보여주기 위하여 그린 것이다. 이 曲線으로 부터 中性點 리액터의 利點을 알 수 있고 다음의 內容이 檢討되었다.

가. 對地 故障만을 고려하면 中性點 리액터가 없는 경우에 대하여 있는 경우의 卷線에 미치는 機械的 힘의 크기가 變電所로 부터 2 Mile (3.2 km) 地點의 故障點에서 각각 0.52와 0.77이다. 많은 系統에서 故障의 대부분을 차지하고 있는 地絡故障에 대하여 리액터는 變壓器 卷線에 電磁力을 줄이는데 效果가 있고 變電所 主 變壓器의 責務를 줄이는데도 아주 效果的이다.

나. 變電所 母線 故障時 變壓器에 最大 힘이 가해질 수 있다. 系統에 리액터가 없을 경우 地絡故障時 變壓器에 가해지는 最大 힘은 三相 故障時 最大 힘보다 1.4 배나 된다. 이 경우 리액터를 設置하면 變壓器에 가해지는 最大 힘이 리액터가 없는 境遇보다 71% 까지 줄일 수 있다.

다. 變電所 母線으로 0.5 Mile (0.8 km) 이상 떨어진 故障에 대하여 三相 故障電流는 中性點 리액터가 없는 경우 地絡 故障電流보다 크다. 結果적으로 0.5 Mile 이상 떨어진 故障에 대하여는 리액터는 變壓器 卷線에 最大로 미칠 수 있는 힘을 줄여주지 못한다. 그러나 變電所로 부터 0.5 Mile 이상 떨어진 三相 故障에 대하여는 變壓器에 미치는 最大 힘은 變電所 母線에 三相 故障에 대한 最大 힘의 70% 보다 항상 적다.

라. 리액터가 設置될 경우 變電所 母線의 地絡事故에 의한 힘은 三相故障에 의한 힘의 72%이다. 變電所로 부터 0.5 Mile 떨어진 地點에서 地絡故障에 의한 힘은 三相故障에 의한 힘의 62%이다. 이와 對照적으로 리액터가 設置되지 않을 때 地絡故障과 三相故障에 의한 힘은 變電所로 부터 0.5 Mile 떨어진 地點에서는 같다.

表 2에서 보인 바와같이 變電所에 中性點 리액터의 設置는 變電所에 地絡故障時 變電所에서 健全相의 對地 電壓이 보다 높게 된다. 三相 配電線路에 따라서 어는 고장점에서 中性點 리액터 設置는 配電線路의 地絡 故障시 健全相의 對地電壓이 보다 높게 된다. 그러나 보통 配電線路의 끝에서 最大로 可能한 對地電壓은 리액터 變電所에서 Z_0 에 대한 Z_0 의 비가 1.53으로 選擇될 때 中性點 리액터에 影響을 받지 않는다. 이 理由는 故障點이 變電所로 부터 떨어져 감에 따라 配電線路의 正相, 逆相임피던스는 變電所에서 그들 값보다 훨씬 크기 때문이다.

架空配電線(암길이 8foot)의 Z_1 에 대한 Z_0 의 비는 변電所에서 그들 값보다 더 크므로 配電線路의 末端 附近에서 健全相의 最大 對地電壓을 결정하는 것은 配電線路의 正相, 逆相임피던스이다. 全配電線路에 따라서 같은 電壓의 定格피뢰기를 適用하는 일반적인 方法을 감안하면 配電線路에 취부하는 피뢰기에 최소 電壓定格을 결정하는 것은 위의 最大 可能 對地電壓이다. 이와 같이 中性點 리액터를 설치하게 되면 變電所에서 Z_1 에 대한 Z_0 비가 2.0 以下이면 피뢰기 定格電壓에 影響을 미치지 않는다.

그림 3, 4, 5에 있는 曲線들은 變電所에 中性點 리액터가 있는 경우와 없는 경우에 모라變電所에서 供給하는 配電線路에 대한 健全相의 對地電壓을 보여주고 있다. 이 電壓은 事故前 對地電壓의 P.U 單位로 표시되어 있다. 이 曲線들은 釜山 모라變電所에 대한 그림 1, 2의 曲線에 使用된 같은 資料를 使用해서 그려진 것이다. 여기서 中性點 리액터는 變電所 22.9kV 母線에서 Z_1 에 대한 Z_0 의 비가 1.53이 되도록 選擇되었다.

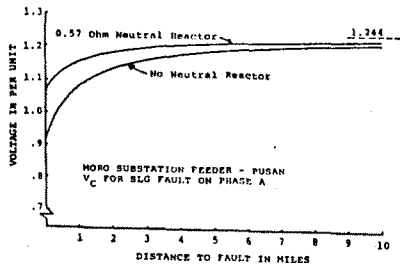


그림 3. A相 地絡故障에 대한 C상 相電壓 P.U 值

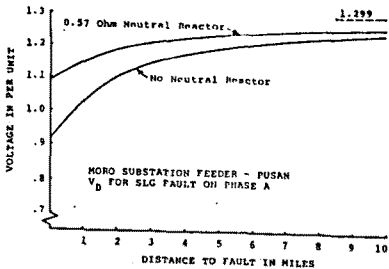


그림 4. A相 地絡故障에서 B상이 상전압 P.U 值

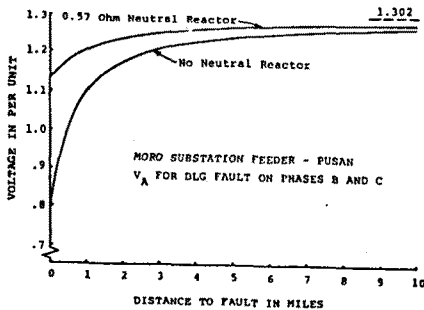


그림 5. B, C相 1線地絡 고장점에서 A상 P.U 電壓值

그림 3, 4 에 있는 曲線은 A 相의 單相地絡 故障에 대하여 C 相과 B 相의 電壓을 각각 表示하고 있다. 그림 5에 있는 曲線은 B, C 相에서 二線地絡이 일어났을 때 A 相電壓을 나타내고 있다. 이 曲線들은 中性點 리액터를 設置하면 變電所에서 가까운 故障에 대하여는 對地電壓이 보다 높지만 리액터는 10 Mile(16.099km) 配電線路 末端附近 故障時는 影響을 미치지 않는다.

3.2 追加 檢討事項

3.2.1 高抵抗 故障檢出

公稱對地電壓이 13.221kV인 22.9kV 配電系統에서 高低抗 故障點에서 흐르는 電流는 變電所 變壓器의 中性點이 直接 接地되었을 때 또는 0.5-2.0Ω 의 誘導性 Reactance 를 가진 Reactor 를 통해서 接地되었을 때와 實際的으로 똑 같다.

이것은 높은 임피던스의 故障에 대한 接觸抵抗이 中性點 리액터의 리액턴스보다 훨씬 크기 때문에이고 電流 흐름을 決定하는 것은 주로 接觸抵抗이다. 더욱 그림 1 에서 보는 바와같이 接觸임피던스가 零인 地絡故障時 變電所에서 2 Mile以上 떨어진 故障에 대해서 中性點 리액턴스 (0.57Ω) 의 設置로 故障電流는 크게 影響을 받지 않는다.

3.2.2 配電線路 地絡檢出 繼電器 整定

그림 1을 보면 중성점 리액터는 變電所 母線의 接地 故障電流를 가장 크게 줄일 수 있고 變電所에서 먼 接地 故障電流는 中性點 리액터 유무에 관계없이 本質的으로는 같다.

中性點 리액터를 追加하는 것이 接地繼電器 整定の 變更를 필요로 하는지 與否는 保護繼電器 調整과 適用을 考慮해서 2 차년도에 더 檢討하고자 한다. 만약 中性點 리액터가 系統에 追加되고 地絡繼電器 整定을 바꾸지 않는다면 中性點 리액터가 繼電器 運轉에 미치는 影響은 그림 1로 부터 알 수 있다.

4. 結論

22.9kV-Y 多重接地 配電線路에서 地絡事故 電流를 制限하는데 있어서 中性點 리액터의 效果는 變電所가 가까운 地點의 事故일수록 큰것으로 說明된다. 위 計算法에 의해서 0.5 [Ω] 程度의 中性點 리액터 接地가 可能하며 健全相의 電位上昇, 高抵抗 地絡檢出, 地絡過電流 繼電器의 保護範圍 및 整定值 選定에도 特性相變化를 주지 않는 것으로 판단되어 適定值의 리액터를 設計하여 轉電系統에 適用 試驗을 實施할 예정이다.

參 考 文 獻

1. "Applied Protective Relaying" W.H 1980.
2. "analysis Related to failed 154kV Transformers on the KEPCO System" PTI Report #R 53-90. 1990.
3. "Substation Reactors VS Transformer Impedance" BY K. NISHIKAWARH 1981.
4. "Limiting available distribution fault Current at Substations" B.C Hydro and power authority vancouver B.C., canada 1978.