

전력용변압기 중성점 절연강도 및 피뢰기정격 선정

태 종 훈

한국전력공사 KEDO 원전사업처 전기팀

1. 머리말

계통변압기의 중성점을 가능한 한 낮은 임피던스로 접지하는 방식을 직접접지방식이라 하며, 유효접지 조건에서 일부변압기를 비접지하는 방식을 유효접지방식이라고 한다. 실제의 직접접지 방식은 유효접지방식을 채택하고 있다. 특히 높은 전압에서는 이 방식을 채택하고 있는데 그 이유는 일선지락시 건전상의 전위상승이 거의 없어, 절연에 유리하고 지락 사고전류가 커서 보호계전기가 신속하고 확실하게 동작한다는 점 때문이다. 유효접지조건을 만족하는 범위내에서는 일부변압기를 비접지 운전할 경우를 고려해서 변압기에는 중성점 Bushing 및 피뢰기를 설치하며 변압기 중성점에는 평상시 거의 전압이 가해지지 않기 때문에 경제적인 이유에서 단절연을 실시한다.

발·변전소의 변압기 중성점 기준절연강도와 이를 기준으로 선정되는 피뢰기 정격전압은 일선지락시의 중성점 전위상승을 고려하여 선정하며 국내외적으로 접지계수 적용값이 모두 상이하여 항상 의문을 갖고 있었으며, 특히 송전전압이 상이한 해외 프로젝트의 기기설계시 상당한 혼란을 경험한 바 있다. 최근, 필자는 국내에서 사용하지 않는 500kV/220kV 전력계통에 연결된 발전소 주

변압기(Main Transformer), 대기보조변압기(Stand-by Auxiliary Transformer) 및 연계변압기(Tie Transformer)의 중성점 절연강도 및 피뢰기 정격전압 설계를 수행한 바 있으며, 국내 및 해외 프로젝트 유사업무 설계 종사자들이 추후 계통설계업무에 활용가능토록 이때 적용한 기준 및 설계개념을 구체적 사례와 함께 상세하게 설명하고자 한다.

2. 전력용변압기 중성점 피뢰기 적용 목적

발전소에 주로 이용되고 있는 주변압기(Main Transformer) 및 대기보조변압기(Stand-by Auxiliary Transformer) 또는 직접접지된 전력계통에 설치된 전력용변압기의 중성점을 비접지 형태로 운전할 경우 계통의 일선지락 고장에 의해 중성점 전위가 상승하게 되는데 고장의 형태, 고장위치 및 고장점의 임피던스에 따라 그 크기가 다르다. 이러한 중성점 개방운전은 뇌임펄스(Lightning Impulse)나 스위칭서지(Switching Surge)에 의한 위협으로부터 노출되기 때문에 이를 보호하기 위하여 중성점과 대지 사이에 적절하게 선정된 피뢰기가 설치되어야 한다.

3. 전위상승

3상 전기선로에서 일선지락 또는 2선지락사고가 발생하게 되면 모든 상의 대지전위가 상승하게 되는데 이를 접지계수(Coefficient of Grounding)로 나타내게 된다. 이러한 접지계수는 상용주파 선간전압에 대하여 일선지락 또는 2선지락사고로 인하여 상승되는 건전상의 상용주파 최대대지전압의 실효치의 백분율로 정의되며, 피뢰기의 정격을 선정하는데 있어서 아주 유익하게 이용된다.

접지계수는 계통임피던스 및 고장점의 고장임피던스에 의하여 계산될 수 있으며, 이는 증가된 대칭좌표임피던스를 이용하면 매우 편리하다.

하지만 특정한 장소에 대한 접지계수는 고장형태, 고장위치 및 고장점임피던스에 따라 변화하기 때문에 다음과 같은 가정이 필요하게 된다.

- ① 접지계수는 지락사고가 발생한 장소와 동일한 위치에 대하여 결정된다.
- ② 일선지락 또는 2선지락과 같은 고장형태가 가장 큰 접지계수를 야기시킨다.
- ③ 지락임피던스는 순수한 저항성분이며, 가장 큰 접지계수를 야기시킬 수 있는 값으로 한다.
- ④ 고장점에서의 계통의 정상임피던스와 역상임피던스는 같다.

이러한 관계를 그림 1로부터 각상의 대지전위를 계산해보면,

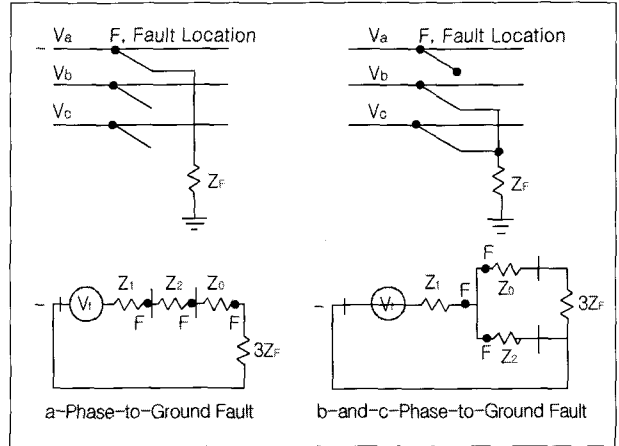
$$V_{aLLG} = V_f \times \frac{3Z_2(Z_0 + 2Z_F)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_F)} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{bLG} = V_f \times \frac{3a^2 Z_F - j\sqrt{3}(Z_2 - aZ_0)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_{cLG} = V_f \times \frac{3aZ_F - j\sqrt{3}(Z_2 - a^3 Z_0)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad Z_2 = R_2 + jX_1,$$



〈그림 1〉

$$Z_0 = R_0 + jX_0, \quad Z_F = R_F + jX_F$$

V_{aLLG} 은 b상과 c상의 2선 지락에 따른 a상의 대지전위 상승전압을 나타내고, V_{bLG} 와 V_{cLG} 는 a상의 일선지락에 대한 건전상(b상과 c상)의 대지전위상승전압을 나타낸다.

만일, $Z_1 = Z_2$ 및 $Z_F = R_F$ 라면, 상기 (1), (2) 및 (3)식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_{aLLG} = V_f \times \frac{3Z_0 + 6R_F}{Z_1 + 2Z_0 + 6R_F} \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{bLG} = V_f \times \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{cLG} = V_f \times \left(a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \dots\dots\dots (6)$$

상기 식 (4), (5) 및 (6)을 접지계수로 정의하면, 즉 선간전압으로 나누게 되면,

$$CFG_a = \sqrt{3} \left(\frac{Z_0 + 2R_F}{Z_1 + 2Z_0 + 6R_F} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$CFG_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$CFG_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \dots\dots\dots (9)$$

상기 (7)~(9)의 식에서 각각의 임피던스를 X_1 으로

나누게 되면 보다 쉽게 이해할 수 있게 되는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CFG_a = \sqrt{3} \left(\frac{R'_0 + 2R'_F + jX'_0}{R'_1 + 2R'_0 + 6R'_F + j(1 + 2X'_0)} \right) \dots (10)$$

$$CFG_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 - \frac{(R'_0 - R'_1) + j(X'_0 - 1)}{(2R'_1 + R'_0 + 3R'_F) + j(X'_0 + 2)} \right) (11)$$

$$CFG_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{(R'_0 - R'_1) + j(X'_0 - 1)}{(2R'_1 + R'_0 + 3R'_F) + j(X'_0 + 2)} \right) (12)$$

여기서 $R'_1 = \frac{R_1}{X_1}$, $R'_0 = \frac{R_0}{X_1}$, $X'_0 = \frac{X_0}{X_1}$, $R'_F = \frac{R_F}{X_1}$

이다.

상기 식 (10), (11) 및 (12)로부터

$$\frac{\sigma CFG}{\sigma R'_F} = 0; R'_F > 0 \text{ 또는 } \frac{\sigma CFG}{\sigma R'_F} \leq 0; R'_F = 0 \text{의}$$

관계가 된다.

4. 접지계의 분류

상기 3에서 검토된 대칭요소들의 비는 접지계가 유효접지계인지 또는 비유효접지계인지를 분류하는데 이용된다.

가. 유효접지계

매우 낮은 임피던스를 통하여 접지된 계통 즉 직접접지계를 의미하며, 접지계수가 80%를 넘지 않는 경우를 유효접지계라고 한다. 이는 영상리액턴스 (X_0)와 정상리액턴스(X_1)의 비가 양의 값을 나타내고 3보다 적고, 그리고 영상저항(R_0)와 정상리액턴스(X_1)의 비가 양의 값이고 1보다 적은 경우에 해당된다.

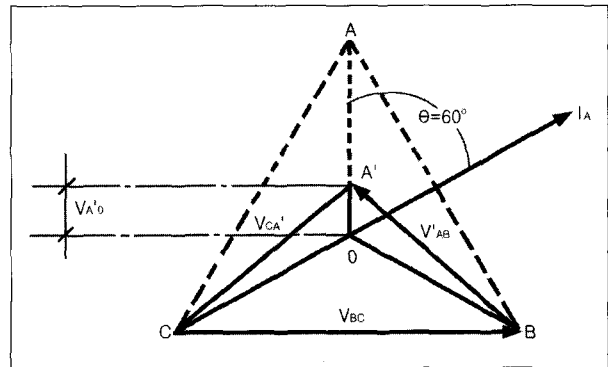
나. 비유효접지계

접지계수가 80%를 넘는 경우를 비유효접지계라 정의하는데, 이는 영상리액턴스(X_0)와 정상리액턴스(X_1)의 비가 음의 값으로 나타나며 3보다 크고, 그리고 영상저항(R_0)와 정상리액턴스(X_1)의 비가 양의 값이고 1보다 큰 경우에 해당된다. 이러한 비유효접지계는 저항접지, 인덕

턴스를 통한 접지, 인덕턴스와 저항을 통한 접지, 리액턴스를 이용한 공진접지 그리고 비접지계에 해당된다.

5. 접지계수에 따른 각 상의 대지전위 관계

a상에서 완전 일선지락사고가 발생한 것으로 가정할 경우 접지계수 80%인 유효접지계에서의 각 상의 대지전위 관계를 그림 2의 Vector Diagram으로 표시할 수 있다.



〈그림 2〉 Phase-to-ground fault between phase A and ground on grounded system

유효접지계수의 정의에 따라 유효접지계수 80%인 경우 건전 상, 즉 b상과 c상의 대지전위, E_{bg} , E_{cg} 와 지락상의 전압 E_{ag} 는

$$E_{bg} = E_{cg} = 80\% \times \sqrt{3} \times E_{b0} \text{ (phase-to-neutral voltage)}$$

$$= 1.38E_{b0}$$

$E_{ag} = 0$ 으로 표시된다.

또한 건전상의 선간전압 (phase-to-neutral voltage), E_{bc} 는 상전압의 $\sqrt{3}$ 배가 된다.

따라서 접지계수 80%인 접지계에서 1선 지락사고가 발생하게 되면 대지와 중성점 사이에는 그림 2의 Vector Diagram으로부터 약 $0.58E_{a0}$ 에 해당되는 전압이 인가되는 결과를 얻을 수 있다.

그러므로, 전력용변압기의 중성점이 단로기와 피뢰기의 상호조합에 의해 직접접지된 계통에서 상황에 따라 단로기를 개방하여 중성점피뢰기를 이용한 접지계통으로 운전되는 경우 일선지락으로 인하여 전력용변압기의 중성점과 대지 사이 즉 피뢰기 양단간에 인가되는 일시과전압은 정상상태 상전압의 약 58%에 해당하므로 이 전압으로 피뢰기의 정격전압을 결정할 수 있다.

6. 피뢰기 선정 기준

가. 전압

일반적으로 피뢰기의 최대연속운전전압(Arrester Maximum Operating Voltage)은 계통의 최대연속운전전압(System Maximum Operating Voltage)과 같거나 커야 되며, 피뢰기의 양단간에 인가되는 일시과전압(TOV, Temporary Overvoltage)을 고려하여 피뢰기의 동작채무전압정격(Arrester Duty Cycle Voltage Rating)이 결정되어야 한다. 여기서 피뢰기 동작채무전압은 IEC Std 60099-5에서 규정하고 있는 정격전압과 동일한 개념이다.

- Arrester MCOV \geq System MCOV
- TOV Capability \geq System TOV(Temporary Overvoltage)

나. 보호기기의 절연강도 선정

절연강도는 BIL(Basic Lightning Impulse Insulation Level) 과 BSL(Basic Switching Impulse Insulation Level)의 관점에서 표시되며, IEEE Std 1313으로부터 얻을 수 있다.

다. 절연협조

절연협조는 보호기기의 절연강도를 피뢰기의 각 보호레벨(Protective Level)의 크기로 나눈 값으로 표시되며,

일반적으로 변압기의 절연강도는 뇌임펄스에 대해서 내용년한 이내에서 BIL을 하회하지 않고 또한 반복인가전압이 BIL의 80% 이하이면 전압인가에 따른 노화는 없다. 또, 개폐임펄스에 대한 절연강도는 BIL의 83%를 하회하지 않고 반복인가에 따른 노화는 거의 없다고 한다.

따라서 피뢰기의 보호레벨은 뇌임펄스에 대해서는 여유도는 BIL의 80% 이하로, 개폐임펄스에 대해서는 15%의 여유도를 고려하여 BIL의 85% \times 85% = 70% 이하로 하는 것을 기본으로 하며, 아래의 수식으로 표시될 수 있다.

- $PR_{L1} = \frac{CWW(\text{Protected Equipment})}{FOW(\text{Arrester})} \geq 1.15$
- $PR_{L2} = \frac{BIL(\text{Protected Equipment})}{LPL(\text{Arrester})} \geq 1.15$
- $PR_S = \frac{BSL(\text{Protected Equipment})}{SPL(\text{Arrester})} \geq 1.2$

피뢰기의 뇌임펄스보호레벨(LPL, Lightning Impulse Protective Level)은 8/50 μ s의 뇌임펄스전류파형에 의한 뇌임펄스 섬락전압(Lightning Impulse Sparkover Voltage) 또는 피뢰기 방전전압(Arrester Discharge Voltage)의 크기로 나타내고 개폐임펄스보호레벨(SPL, Switching Impulse Protective Level)은 실제 피크전류크기가 500, 1000, 2000(A)이고 45 μ s ~ 60 μ s의 파형을 갖는 전류에 의한 개폐임펄스섬락전압(Switching Impulse Sparkover Voltage) 또는 피뢰기 방전전압의 크기로 표시되며 이들의 크기는 피뢰기 제작사로부터 얻을 수 있다.

7. 각 Code별 중성점 피뢰기 적용기준

가. JEC 203

공칭전압 (kV)	계통최고전압 (kV)	중성점 피뢰기 정격전압(kV)	중성점 BIL (kV)	비고
154	170	112	450 이상	
154	170	126	450 이상	염해지역

나. IEC 60099-5

(1) 전절연 변압기 중성점의 피뢰기

최소한 상과 대지 사이에 설치되는 피뢰기 정격전압의 60% 전압이 되는 피뢰기를 선정한다.

(2) 단절연 변압기 중성점의 피뢰기

계통의 단락전류를 제한하기 위하여 변압기의 중성점이 비접지되는 경우, 변압기는 계통조건에 따라 선정된 피뢰기에 의하여 보호되어야 하며 상과 대지 사이에 설치되는 피뢰기에 적용되는 것과 동일한 방법으로 피뢰기를 선정해야 한다.

다. IEEE std C62.22-1997

전력용변압기의 중성점에 적용되는 피뢰기의 정격전압을 선정하는 경우 중성점에서의 과전압은 고장시의 계통 영상전압과 동일하므로 대칭좌표법을 이용하여 전압을 산정해야 한다. 만일 전력용변압기가 퓨즈에 의하여 보호되거나 또는 단상개폐장치에 의하여 개폐되는 경우 다른 두 상은 개방되었으나, 나머지 한 상이 개방되지 않은 상태에 노출될 수 있으므로 계통의 상전압과 동일하게 전압이 결정될 수 있다.

라. 한전 설계기준(ESB 140)

공칭전압 (kV)	계통최고전압 (kV)	중성점 피뢰기 정격전압(kV)	중성점일시 과전압 계수	중성점 BIL (kV)
154	170	72	0.4684	350
345	362	108	0.4684	450

마. 한전 전력연구원 검토

공칭전압 (kV)	계통최고전압 (kV)	중성점 피뢰기 정격전압(kV)	중성점 일시 과전압 계수	중성점 BIL (kV)
154	170	72	0.68	350
345	362	144	0.68	550

바. 한전 송전설계기준(안) - 1032 및 1033

공칭전압 (kV)	계통최고전압 (kV)	중성점 피뢰기 정격전압(kV)	중성점일시 과전압 계수	중성점 BIL (kV)
154	170	72	0.68	350
345	362	144	0.68	550

사. 기타

공칭전압 (kV)	계통최고전압 (kV)	중성점 피뢰기 정격전압(kV)	중성점일시 과전압 계수	중성점 BIL (kV)	비고
765	800	144	0.3	350	화력 (당진)
500	550	직접접지	-	550	일리안 (필리핀)

8. 500/220kV 전력계통 전력용변압기의 중성점 피뢰기 적용(안)

가. 직접접지

전력용변압기의 중성점에 피뢰기를 삭제하고 직접 접지한다. 전력용변압기의 중성점 피뢰기의 선정을 위해서는 계통 해석이 필요하나 설계 자료 부족으로 인하여 해석이 불가능하다. 하지만 현재의 2개 호기만의 발전소 구성을 전제로 할 경우 계통용량이 적고 또한 계통의 1선 지락에 의한 중성점 전위상승은 그다지 크지 않을 것으로 보이며, 이에 따라 변압기의 중성점을 직접 접지하는 것이 가능하다.

나. 한전 설계기준(ESB-140)과 동일하게 적용

(1) 피뢰기 전압

UCN 3&4에 적용된 피뢰기 선정방식과 동일하게 적용한다. 1선 지락시 각 계통의 전력용변압기의 중성점 최대 전위상승을 0.4684E로 하여 다음과 같이 피뢰기의 정격전압을 선정한다.

- 220kV 계통의 중성점 상승

$$E_n = 0.4684 \times 242 / \sqrt{3} = 65.44kV$$
- 500kV 계통의 중성점 전위상승

$$E_n = 0.4684 \times 550 / \sqrt{3} = 148.7kV$$

따라서, 상기 계산 결과에 따른 중성점 최대전위상승을 고려하여, ANSI C62.11-1999의 Table 1로부터 220kV 계통의 중성점 피뢰기의 동작책무정격전압(Duty Cycle Voltage Rating)과 최대연속운전전압정격(MOCV, Maximum Continuous Operating Voltage Rating)을 각각 72kV와 57kV로 선정하고, 500kV 계통의 중성점 피뢰기는 각각 168kV와 131kV로 선정한다.

(2) 전력용변압기의 중성점 절연강도

전력용변압기 중성점의 BIL은 IEEE Std 1313.1-1996의 Table 1에 따라 다음과 같이 정한다.

- 220kV의 72kV 정격 피뢰기 적용의 경우 : 350kV BIL
- 500kV의 168kV 정격 피뢰기 적용의 경우 : 650kV BIL

(3) 절연협조

계 통	피뢰기	
	뇌임펄스보호레벨	개폐임펄스보호레벨
220kV	280kV 이하	245kV 이하
550kV	520kV 이하	455KV 이하

다. 중성점 전위상승 0.58E 적용

(1) 피뢰기 전압

IEEE C62.22-1997에 따라 유효접지계수 80%를 적용할 경우 1선 지락시 건전상의 대지전위상승은 선간전압의 80%에 해당되며, 1선 지락시 중성점 전위상승을 0.58E로 하여 피뢰기의 정격전압을 선정하면,

- 220kV 계통의 중성점 최대전위 상승 $E_n = 81.03kV$
 - 500kV 계통의 중성점 최대전위 상승 $E_n = 184.17kV$
- 따라서, 상기와 같은 방법으로 220kV 계통의 중성점 피뢰기의 동작책무정격전압과 최대연속운전전압정격을 각각 90kV와 70kV로 선정하고, 또한 500kV 계통의 중성점 피뢰기는 각각 192kV와 152kV로 선정한다.

(2) 전력용변압기의 중성점 절연강도

220kV 및 500kV 각 계통의 전력용변압기의 중성점의 BIL은 각각 450kV와 750kV로 선정된다.

(3) 절연협조

계 통	피뢰기	
	뇌임펄스보호레벨	개폐임펄스보호레벨
220kV	360kV 이하	315kV 이하
550kV	600kV 이하	525KV 이하

라. 중성점 대지전위상승 0.68E 적용

(1) 피뢰기 전압

1999년 3월의 한전 전력연구원의 보고서(안)는 EMTP 분석결과에 따라 1선 지락시 중성점 전위상승을 0.68E로 제시하고 있으며, 이를 기준으로 220kV 및 500kV 각 계통의 전력용변압기 중성점 전위상승은 각각 95.01와 215.93kV가 되며, 이 경우 220kV 계통의 중성점 피뢰기의 동작책무정격전압과 최대연속운전전압정격을 각각 108kV와 84kV로 선정하고, 또한 500kV 계통의 중성점 피뢰기는 각각 228kV와 180kV로 선정한다.

(2) 전력용변압기의 중성점 절연강도

220kV 및 500kV 각 계통의 전력용변압기의 중성점의 BIL은 각각 450kV와 825kV로 선정된다.

(3) 절연협조

계 통	피뢰기	
	노임플스보호레벨	개페임플스보호레벨
220kV	280kV 이하	245kV 이하
550kV	660kV 이하	578KV 이하

주변압기		대기보조변압기	
중성점 BIL(kV)	가격 대비(%)	중성점 BIL(kV)	가격 대비(%)
650	100	350	100
750	103 ~ 104	450	102 ~ 103
825	107 ~ 108	450	103 ~ 104

9. 검토 결과

가. 각 적용(안)별 피뢰기 선정 기준

적 용(안)	피뢰기 정격전압(kV)		변압기 중성점 BIL(kV)	
	220kV	500kV	220kV	500kV
직 접 접 지	미적용	미적용	150	150
일시과전압계수 0.4684 적용	72	168	350	500
일시과전압계수 0.58 적용	90	192	450	750
일시과전압계수 0.68 적용	108	228	450	825

나. 중성점 전위상승에 따른 변압기 가격 검토

중성점 일시과전압상승계수를 상향 적용할 경우 변압기 설계/제작비에 영향을 미치는데 가격에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

- 변압기 중성점 전위상승에 따른 변압기 내부의 중성점 절연 강화
- 변압기 절연거리 증가에 따른 변압기 크기 증가(탱크자재 및 절연유 증가)
- 피뢰기 정격 및 단로기 정격 상승에 따른 가격 상승
- Neutral Bar의 Insulator 정격 상승에 따른 가격 상승(주변압기에만 해당)

(1) 일시과전압계수에 따른 가격 영향

전력용변압기 중성점의 일시과전압계수를 한전 설계기준(ESB-140)과 동일하게 0.4684E를 기준으로 할 경우 중성점 일시과전압계수에 따른 각 변압기별 가격영향은 다음과 같다.

10. 맺음말

이상의 검토결과 500kV/220kV 전력용변압기의 경우 한전 354kV 계통과 동일한 개념으로 설계한다는 기본 원칙에 따라 한전 설계기준(ESB 140)을 근거로 유효접지계수 75%를 고려하여 중성점 일시 과전압 상승계수를 0.4684E로 적용할 수도 있으나, 최근 한전 전력연구원의 중성점 피뢰기에 대한 EMTP 분석결과를 기초로 하여 일선지락에 의한 중성점 일시과전압 상승계수를 0.68E로 하는 송전설계기준(안)-1032 및 1033을 제시하고 있어 500kV/220kV 전력용변압기의 중성점 피뢰기에는 적용하기가 곤란하다.

또한, IEEE C62.22-1997에서 규정하고 있는 유효접지계수 80%를 고려한 중성점 일시 과전압 상승계수 0.58E를 권고하고 있어 본 프로젝트가 국제적인 사업임을 감안할 때 전력용변압기의 중성점 피뢰기의 정격은 IEEE C62.22-1997에 따른 과전압 상승계수 0.58E를 적용하여 선정하는 것이 타당하다고 판단된다.

계통전압(kV)	중성점 BIL (kV)	피뢰기 정격		
		정격전압(kV)	LPL(kV)	SPL(kV)
공칭전압 220	최고전압 245	450	360kV 이하	315kV 이하
500	550	750	600kV 이하	525KV 이하

유효접지계수는 문헌에 따라 접지계수는 75% 혹은 80%를 혼용하여 사용하고 있고 국내 설계는 75% 기준으로 적용하여 피뢰기 정격전압을 선정하고 있어 이에 대한 명확한 기준 설정이 필요한 것으로 판단된다. ■