電力用 遮断器의 ANSI規格에 의한 再起電圧(Transient Recovery Voltage T. R. V.) 検討

金吉相/電気機器開発部

Ⅰ. 序　言

高圧電力用 遮断器의 再起電圧을 새로운 ANSI 規格에서는 특별히 規定하였으며, 遮断試験時 特別한 再起電圧 特性을 만족하기 위해서는 특수한 試験回路를 고려해야 한다.

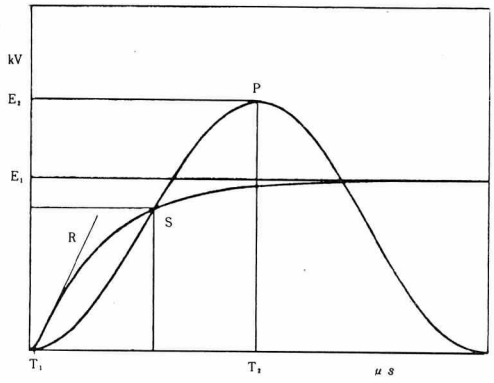
지난 수십년간 世界各国에서는 国内外的으로 高圧遮断器의 再起電圧에 관한 規格을 만들기 為해 많은 研究를 하여 이러한 研究結果 새로운 IEC가 만들어 졌고 IEC, ANSI 모두 1970年代初에 公表되었다.

이러한 새로운 規格은 遮断器의 標準化를 위해 제작자나 사용자의 요구를 만족시켰고, 또한 TRV의 遮断試験時 많은 指針이 되었으나,과거보다 복잡해졌다.

이번에 121 kV 以上 遮断器의 端子事故時 새로운 ANSI 規格에 의한 EX-COS TRV 파형에 대하여 検討하고자 한다.

Ⅱ. EX-COS TRV 파형

ANSI 規格에서 121 kV以上 電力用 遮断器에 適用하는EX-COS TRV파형은 〈그림 1〉과 같이 exponential 파형과 1−cosine 파형의 조합으로 나타낸다. Type test時 TRV는 定格 TRV를 만족하여야 하며 系統에서 遮断器 근처의 capacitance를 고려하여 初期 time delay가 規定된다.



E_1 : 1-cos 파형의 파고치
T_2 : E_1가 나타나는 時間
E_2 : 60Hz 回復電圧의 파고치 exponential 파형의 無限大時값
R : 最大 上昇率 exponential 初期파형의 接線
T_1 : Time delay R line과 時間軸의 交叉点의 時間

〈그림 1〉 EX-COS TRV파형

Ⅲ. Two-part 試験

새로 規定된 TRV는 two-part 試験으로 可能하다.

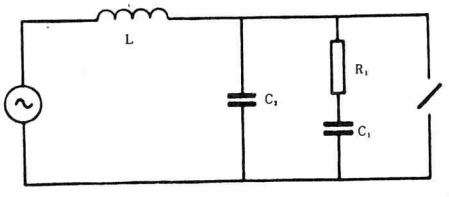
Two-part 試験이란 첫번試験으로 exponential 파형을 만들고 두번째 試験으로 1-cos 파형을 얻는다. 양쪽 試験 모두 定格遮断電流 및 定格回復電圧을 印加한다. 물론 후에 記述하는 복잡한 試験回路로 EX-COS파형을 얻을 수는 있다.

새로운 IEC에서는 完全한 TRV파형이 1個의 試験回路에서 発生하기 어려울 때에는two-part 試験을 하는 것이 許容된다.

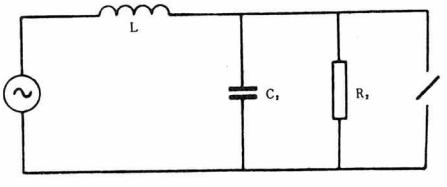
즉 two-part試験은 定格遮断電流와 定格回復電圧으로 TRV의 처음 部分과 나중部分을 각각 두번씩 試験을 하게 된다. 새로운 ANSI規格에는 그러한 two-part試験에 대해서는 언급하고 있지 않으나 規格에 위배되는 것은 아니다.

Exponential 파형은 短絡試験所에서 2가지 方法으로 얻을 수 있다.

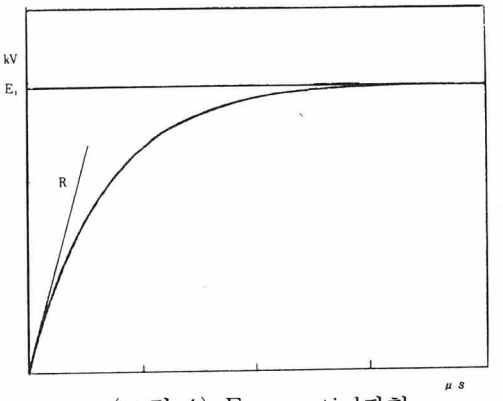
즉, 첫번째 方法은 capacitance를 直列로 한 damping resistor를 〈그림 2〉와 같이 試験用 遮断器와 並列로 結線하는 것과 다른 方法은 〈그림 3〉과 같이 試験用 遮断器에 抵抗만 並列로 結線하는 方法이 있다. 그리고 定格을 정할 때 最大 上昇率 R는 〈그림 4〉와 같이 遮断器 근처 capacitance를 무시한 最大 上昇率로 定義한다.



〈그림 2〉 直列 damping resistor回路



〈그림 3〉 並列 damping resistor 回路



〈그림 4〉 Exponential파형

〈그림 2〉, 〈그림 3〉, 回路 전부 抵抗値는 다음과 같이 計算된다.

$$R_1 = R_2 = \frac{du/dt}{di/dt} \cdots\cdots ①$$

여기서 du/dt는 TRV의 電圧上昇率이고 di/dt는 歪形되지 않은 対称遮断電流의 減衰率을 뜻한다.

〈그림 2〉의 capacitor C_1은 다음과 같이 計算된다.

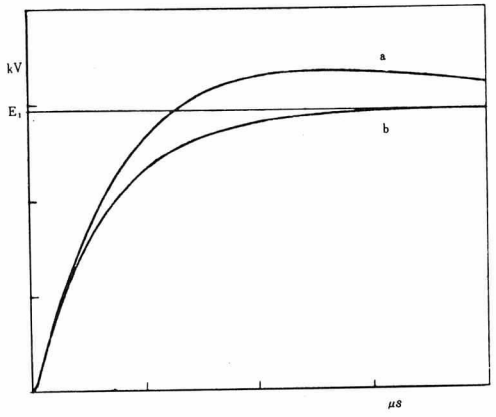
$$R_1 = 2Z_1 = 2\sqrt{L/C_1} \cdots\cdots ②$$

여기서 L는 回路의 자기 inductance이다.

〈그림 2〉, 〈그림 3〉 전부 C_2는 time delay T_1에 関係되는 것으로 다음과 같이 計算된다.

$$C_2 = \frac{T_1}{R_1} = \frac{T_1}{R_2} \cdots\cdots ③$$

〈그림 2〉와 〈그림 3〉의 두 回路의 파형은〈그림 5〉와 같이 약간 다르다.



〈그림 5〉 TRV파형
a : 直列 damping b : 並列 damping

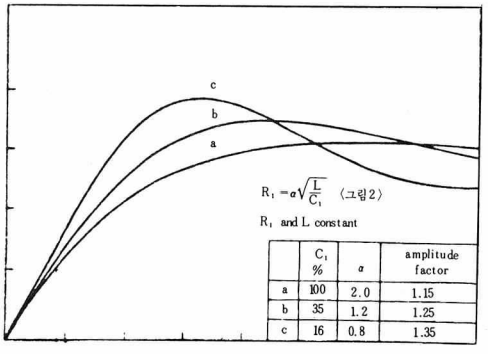
Damping resistor를 並列로 한 파형은 規格과 一致하고 capacitance와 直列로 한 damping resistor를 並列로 한 파형은 over shoot 한다. 最大初期上昇率과 初期 time delay는 両回路가 동일하다.

〈그림 5〉에서 a 파형의 over shoot는 매우 경제적으로 減衰를 補償할 수 있다.

b파형의 境遇 減衰는 좀더 높은 印加電圧, 즉 비싼 높은 電力에 의해서 補償된다.

〈그림 5〉의 a 파형의 over shoot가 아직 낮을 경우 capacitor C_1을 줄일 수 있다.

〈그림 6〉에서 上記 減衰 効果를 나타내었다. 抵抗 R_1이 一定하므로 初期上昇率은 변하지 않는다. 実際로 試験所에서는 自然的인 damping이 存在한다.



	C_1 %	α	amplitude factor
a	100	2.0	1.15
b	35	1.2	1.25
c	16	0.8	1.35

〈그림 6〉〈그림2〉에서 R_1과 C_1의 파형에 미치는 효과

만일 damping resistor가 없더라도 回復電圧의 過渡振動의 amplitude factor는 1.8~1.9가 된다. 이러한 自然 damping은 並列 damping抵抗으로 나타낼 수 있다.

즉 自然 damping을 補償하고 正確한 上昇率을 얻기 위하여 R_1, R_2를 增加시켜야 한다.

〈그림 2〉에서 over shoot를 一定하게 維持하기 위해서 capacitor C_1을 減少시켜야 한다. 直列 damping 抵抗의 또다른 利点은 回復電圧에 의한 抵抗에 印加되는 energy가 적다는 점이다. 121 kV부터 765 kV級 遮断器에서

$$2.6 \leqq \frac{P_2}{P_1} \leqq 64 \text{ 이다.}$$

여기서 P_1과 P_2는 R_1과 R_2에 各各 印加되는 電力이다.

直列 damping의 不利한 점은 capacitor가 必要한 것이나 短絡試験所에서는 充分한 capacitor가 있다.

高電圧에서는 P_2/P_1이 작아지고 直列damping인 境遇 C_1이 매우 커져서 並列 damping 回路가 適当하다.

TRV의 둘째 部分은 規定된 E_2, T_2가 発生되는 1-cos 파형이며, 必要한 damping은 直列 또는 並列抵抗에 의해 調整할 수 있다.

普通 自然 damping이 처음 파고치를 상당히 줄이므로 damping抵抗은 거의 쓰지 않는다.

파고치에 도달하는 時間 T_2 調整用 capacitance는〈그림 2〉에서 exponential 파형의 capacitor보다 매우 작다.

Ⅳ. 遮断試験時 TRV 検査

実際로 減衰 및 自然 damping으로 実際 TRV는 理想的인 TRV파형과 상당한 差異가 있어, 試験한 TRV의 中間点을 比較할 必要가 있다.

또한 time delay를 고려한 最大 上昇率과〈그림 1〉에서 exponential 파형과 1-cos파형의 交叉点의 座標를 아는 것이 必要하다. TRV의 定格은〈表 1〉에 나타내었다.

또한 実際 time delay가 주어지고 ③式에 의해서 time delay가 発生되는 capacitance가 計算되지만, 定格 time delay보다 작다. ③ 式은 近似値이고 数学的으로 正確한 값은 아니다.

흥미로운 점은 TRV 上昇率은 定格의 91~95 %이고 exponential 파형과 1-cos파형의 交叉点은 定格最大電圧의 R.M.S.値와 같은 것이다.

Ⅴ. EX-COS TRV파형의 試験回路

Two-part 試験으로 試験의 反復을 피하기 위하여 EX-COS TRV 파형을 한번에 발생할 수 있는 試験回路를 사용하는 것이 바람직하다.

또한 遮断器 特性上 two-part試験으로 하는 것이 許容되는지 않는지에 관하여 논란할 必要없이 EX-COS TRV를 한번 試験으로 完全히 하면 바람직하다.

Naef Et Al이 1965年 EX-COS TRV파형 発生이 可能하다고 発表하였으나, 지금까지 実用的인 解答은 発表되지 않았다.

Rated max. voltage	Rated short circuit current	Rated time to point P T_2	Rated crest voltage at point P E_2	Rated delay time T_1	Rated rate R	Calculated values				
						Delay	Max du/dt	Time to inflection point	Coordinates of ex-cos intersection point S	
kV RMS	kA RMS	μS	kV	μS	kV/μS	μS	kV/μS	μS	μS	kV
121	20	276	213	2.9	1.7	2.35	1.56	10.4	153	123
121	40	258	213	2.9	1.8	2.33	1.64	10.2	141	122
121	63	252	213	2.9	1.8	2.33	1.64	10.2	137	121
145	20	331	255	3.2	1.7	2.61	1.56	11.7	182	147
145	40	310	255	3.2	1.8	2.59	1.65	11.5	171	147
145	63	302	255	3.2	1.8	2.59	1.65	11.5	165	145
145	80	298	255	3.2	1.8	2.59	1.65	11.5	162	143
169	16	396	297	3.4	1.7	2.80	1.57	12.7	220	174
169	31.5	369	297	3.4	1.8	2.74	1.66	12.5	204	173
169	40	361	297	3.4	1.8	2.74	1.66	12.5	197	171
169	50	357	297	3.4	1.8	2.74	1.66	12.5	195	170
242	31.5	529	425	4.1	1.8	3.41	1.68	15.7	291	248
242	40	517	425	4.1	1.8	3.41	1.68	15.7	284	244
242	63	503	425	4.1	1.8	3.41	1.68	15.7	274	242
362	40	773	620	4.9	1.8	4.20	1.69	19.8	423	365
550	40	1325	968	5.4	1.6	4.80	1.53	24.0	729	554
765	40	1531	1345	7.9	1.9	6.90	1.80	33.5	834	765

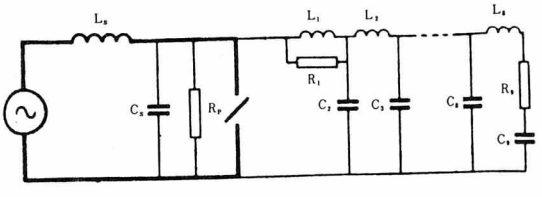
Calculated values for first phase to clear.
First phase to clear factor 1,5.

〈表 1〉EX-COS TRV 파형의 定格表

実際로 〈그림 7〉과 같이 遮断器와 並列로 開放끝단에 人工線路를 結線하면 되므로 쉽게 만들 수 있을것 같으나, 이것은 너무 큰 E_2와 上昇率을 가진 反射波가 発生한다. 検討結果 人工線路는 capacitor와 resistor를 直列로 하여 末端에 連結하여 反射波가 EX-COS 파형과 近似하도록 하는 것이 알려졌다.

〈그림 8.a〉에서 R_9값의 変化에 따른 TRV 파형을 나타내고 정격보다 낮은 파형이 바람직하며 TRV 초기부분을 〈그림 8.b〉에 나타내었다.

〈그림 8〉의 파형은 digital computer로 計算한 것이다.



〈그림 7〉 EX-COS TRV 발생근사회로

人工線路의 capacitance와 inductance값은 아래 두式으로 決定된다.

$$Z=\sqrt{L/C}=\frac{du/dt}{di/dt} \quad \cdots\cdots ④$$

$$T_2=4\sqrt{LC} \quad \cdots\cdots ⑤$$

④, ⑤式 全部 L과 C는 C_9을 除外한 人工線路全体 inductance 및 capacitance이다. TRV上昇率과 ④式의 電流減衰率은 ①式과 같이 定義한다.

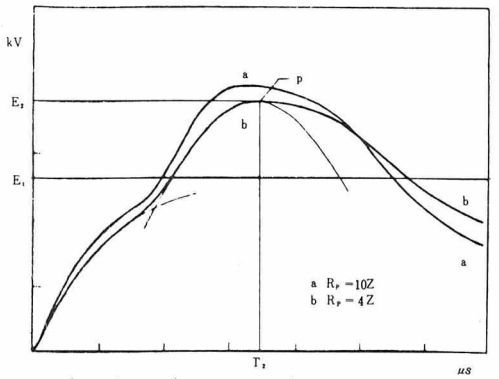
다른 線路定数는 아래와 같다.

$$R_9=1.15\frac{du/dt}{di/dt} \quad \cdots\cdots ⑥$$

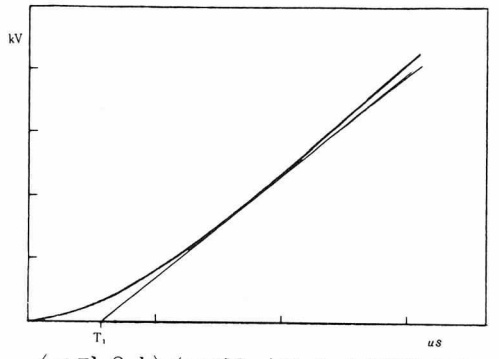
$$C_9=2.5\,C_{2\cdots8} \quad \cdots\cdots ⑦$$

$$R_1=0.5\pi f L_1 \quad \cdots\cdots ⑧$$

⑦式에서 $C_{2\cdots8}$은 section의 個個 capacitance이고 ⑧式에서 f는 inductance L_1自体의 natural frequency이며, 抵抗 R_1은 inductance의 natural frequency를 完全히 damping 시켜야 되지 그렇지 않으면 初期 TRV의 파형이 歪形된다.



〈그림 8.a〉〈그림7〉회로의 TRV파형



〈그림 8.b〉〈그림8.a〉의 초기 TRV파형

〈그림 7〉에서 初期 TRV의 time delay는 C_s에 의해 調整된다.

$$C_s=\frac{T_1}{Z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots ⑨$$

여기서 Z는 ④式에서와 같은 값이다.

〈그림 7〉에서 R_p는 試驗回路의 natural damping이고 正確한 E_2를 얻기 為한 追加 damping이다.

減衰나 natural damping이 없으면

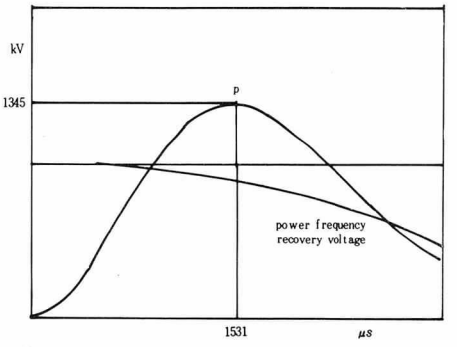
$$R_p=4\frac{du/dt}{di/dt} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots ⑩$$

Capacitance C_2(〈그림 3과 4〉)나 C_s(〈그림 7〉)에 의해서 time delay가 決定되며, 大部分의 境遇 試驗所의 変圧器 natural capacitance가 C_2나 C_s보다 작아서 追加 capacitance의 삽입이 必要하다.

그러나 高電圧, 低電流의 境遇는 natural capacitance가 커서 変圧器 中間点을 接地시켜서 capacitance를 줄일 수 있다.

Ⅵ. 超高圧 遮断器

550 kV나 765 kV級인 매우 높은 電圧의 遮断器는 正確한 파고치 E_2를 얻기 위해 適切한 補償이 要求된다.



〈그림 9〉 765kV 遮断器의 1-cos TRV파형

〈그림 9〉에서와 같이 550 kV와 765 kV 遮断器의 T_2시간에서의 상용주파 回復電圧의 순시치는 상용주파 回復電圧 파고치 E_1의 各各 88% 및 84%이다.

Two-part 試驗의 1-cos파형 試驗에서 TRV의 파고치는 減衰, natural damping, 60Hz 파형의 固有減衰로 減少된다. 다른 damping을 없애므로서 充分히 補償 可能한지는 의문스럽다.

〈그림 7〉회로에서 補償은 상용 주파 파형을 높힘으로서만 可能하다.

다른한편 IEC에서와도 같이 E_2의 값이 주어지면 상용주파 回復電圧의 減少도 無視할 수가 없다.

Ⅶ. 結 言

Two-part 試驗으로 正確한 TRV를 発生시키는 것은 可能하나 많은 試驗, 즉 많은 試驗時間이 所要된다.

또한 좀 복잡한 試驗回路로 EX-COS TRV를 発生시킬 수 있으나 높은 電圧, 즉 大電力을 印加하여야 한다.

그러므로 어느 경우에서나 새로운 TRV 定格을 만족하는 規格은 많은 試驗에 따른 手苦가 要求되며 앞으로 많은 研究를 하여 便利하고 경제적인 試驗方法을 検討하여야 할 것이다.