

短絡試驗室의 Analyzer 応用

朴東旭 / 電力遮断研究室

I. 序 論

遮断器의 遮断性能은 遮断電流뿐만 아니라 再起電壓에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 短絡試驗室에서 遮断試驗을 實施할 때는 電流와 再起電壓을 充實하게 再現해야 하는데 여기서는 再起電壓을 測定, 決定하는 方法으로 사용되고 있는 analyzer 의 여러가지 方法을 比較 說明한다.

II. 本 論

短絡電流 遮断時에 發生하는 過渡電壓을 再起電壓(Transient recovery voltage)이라 칭하고 있으나 이 電壓은 回路特性뿐만 아니라 遮断器特性의 영향을 받는다. 여기서 回路特性은 inductance, resistance, surge impedance 등을, 遮断器特性으로는 arc 電壓, 잔류도전성, 並列 capacitance 및 開閉用抵抗을 意味하는데 遮断器의 特性은 遮断器의 종류에 따라 다르므로 전력계통과 단락시험실에 있어 再起電壓波形的의 평가는 理想的인 遮断器(Arc 電壓과 잔류도전성, 並列 capacitance 및 開閉用抵抗이 없음)에 의해 차단할 때

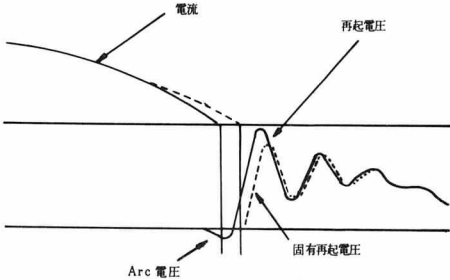
의 再起電壓波形에 의해 決定하지 않으면 안된다. 이때의 再起電壓波形은 回路特性만으로 決定되고 이것을 固有再起電壓(Prospective transient recovery voltage)이라고 부른다. 이 固有再起電壓을 測定하기 위하여 analyzer를 많이 사용하고 있다.

1. 固有再起電壓波形 決定法

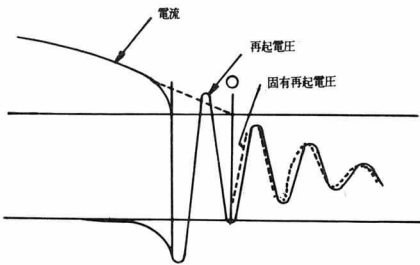
가. 直接短絡에 의한 方法

이 方法은 理想차단기에 가까운 특성을 갖고 있는 차단기를 검토하고자 하는 계통 또는 시험설비에 적용해서 실제 차단시험에 의해 고유재기전압과형을 결정하는 방법이다. 시험전압으로해서는 定格電壓, 低減電壓에 의한 두가지 방법이 있으나 後者의 경우에는 회로에 포함된 磁氣飽和등의 非直線特性이 나타나지 않는다. 그런데 실제 시험시에는 arc전압에 의해서 <그림 1>과 같이, 전류 clipping 현상에 의해서 <그림 2>, 그리고 잔류전류에 의해 <그림 3>과 같이 再起電壓波形은 固有再起電壓波形과는 차이가 생긴다. 따라서 이방법에 의해 固有再起電壓波形에 가까운 波形을 구하기 위해서는 arc 電壓이 충분히 낮고 clipping 電流, 잔류전류가 작은 차단기를 사용하지 않으면 안된다. 곧

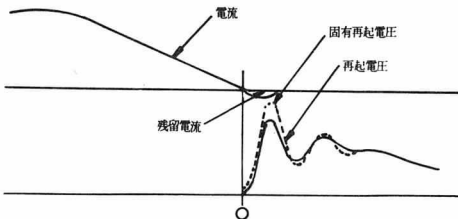
여러가지 종류의 차단기 중에서 진공차단기(Vacuum circuit breaker)는 arc 電壓이 낮고 大電流 차단시 clipping 現象도 작을뿐만 아니라 再起電壓 上昇率이 극히 큰 경우를 제외하고는 잔류전류도 작기 때문에 固有再起電壓測定用으로 많이 사용된다.



〈그림 1〉 Arc 電壓의 영향



〈그림 2〉 電流 clipping의 영향



〈그림 3〉 잔류전류의 영향

나. 商用周波電流 印加法

死回路狀態의 실제계통과 시험장에 과도현상 계산반(Transient network analyzer)과 유사한 수법을 적용한 것으로 실제의 고장과는 반대로 死回路狀態에 있는 실제의 계통과 시험실의 회로에 있어서 고장점으로부터 전원측으로 小電流를 注入해두고 차단기 대신에 다이오드 싸이리스타, 싸이라트론등 理想차단기로 볼 수 있는 switching 소자를 사용해서 차단을 행한다.

(註: Current injection method에 의한 過渡現象解析法 참조)이 경우의 시험전압 전류

는 통상 측정에 편리한 값을 선택하여 전압은 20~200V, 전류는 2~300A정도이다. 따라서 코로나 磁氣飽和現象은 나타나지 않는다.

Switching 素子로는 정전용량 잔류전류 및 순방향강하가 무시할 수 있도록 작은 것이 요구되며 특히 잔류전류의 면에서는 素子の hole storage time 200ns 이하의 다이오드가 적당하다. 또한 이 방법에서의 시험전압 전류는 실제 계통의 전압 및 고장전류와 다르므로 실제 계통의 고유재기전압은 이 방법에 의해 측정된 파형으로부터 교정하여 구하지 않으면 안된다.

교정하는 식으로는 다음 세 식을 사용한다.

$$V_{sc}(V/mm) = V_t \times I_{sc} / I_t \times f_{sc} / f_t (V/mm) \dots\dots ①$$

$$V_{sc}(V/mm) = V_t \times V_{so} / V_{io} (V/mm) \dots\dots ②$$

$$V_{sc}(V/mm) = V_t \times \left(\frac{dI_{sc}/d\epsilon}{dI_t/d\epsilon} \right) \begin{matrix} I_{sc} \rightarrow 0 \\ I_t \rightarrow 0 \end{matrix} \dots\dots ③$$

- 단 V_{sc} : 전압 교정치
- V_t : 시험측정 결과치
- I_{sc} : 실제계의 고장전류
- I_t : 시험주입전류
- f_{sc} : 실제계의 주파수
- f_t : 주입전류의 주파수
- V_{so} : 실제계의 전압
- V_{io} : 시험주입전류의 전압

다. Condenser 電流 印加法

이 방법은 시험전원으로해서 商用周波電源 대신에 condenser에 充電시킨 電壓을 사용하는 것을 제외하고는 商用周波電流 印加法과 동일하며 이때의 주파수는 전원의 capacitance와 회로의 inductance에 의해 결정되며 그 값은 固有再起電壓 周波數의 1/8 이하로 해야한다. 또한 교정하는 식은 ①~③식을 사용한다.

라. TNA에 의한 方法

실계통 또는 시험실의 회로 정수를 알고 TNA 안에서 계통 또는 시험실의 회로를 모의 구성하여 switching 素子를 사용한 모의차단기를 개폐해서 固有再起電壓波형을 구한다. 이 방법의 精度는 모의된 회로의 整數值를 어느 정도까지 정확히 알고 있느냐에 달려있고 소량의 素子로 모의하기는 어렵다. 또 일반적으로 재기전압의 감쇠가 포함되지 않고 실제계의 직접단락에서 얻어지는 것보다 높은 경향이 있다. 이 방법은 주로 계통을 송전 정지할 필요가 없기 때문

에 전력계통의 고유재기전압을 조사하는데 사용된다.

마. 変圧器回路의 無負荷開閉

変圧器의 2次側은 개방해 두고 1次側에서 차단기를 투입한 경우의 2次側 電圧波形 으로부터 고유재기전압파형을 구한다. 재기전압의 상승부분에 투입 surge의 중첩과 勵磁突入電流의 영향때문에 많이 사용되지는 않는다.

2. Analyzer

短絡試驗室에서 사용되어지는 固有再起電壓決定法으로는 정밀하고 간편한 수법이 바람직하므로 앞에서 설명한 固有再起電壓決定法中에서 상용주파전류인가법, 콘덴사전류인가법에 의한 analyzer의 수법이 주로 적용되고 있다.

Analyzer수법으로 해서는 모의회로를 구성하여 행하는 방법도 있으나 여기서는 주로 시험실의 회로에 적용하는 방법에 대해서 기술한다.

가. Analyzer種類

1) IEC法

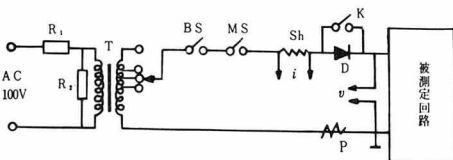
IEC 17A(CO) 101에서 제안된 방식으로 피측정회로 곧 시험실의 회로에 供試遮斷器의 위치로부터 상용주파전류를 주입해 두고 이 전류를 다이오드로 차단한다. 그리고 공시차단기의 위치에서 過渡電壓을 측정하여 실제의 시험 조건에 환산해서 固有再起電壓을 결정한다. <그림4>에서 회로 구성을 볼 수 있으며 동작 sequence는 다음과 같다.

(가) 보호SW-BS와 by pass SW-K-를 투입

(나) 투입SW-MS를 투입해서 전류를 注入

(다) 20 cycle 정도 통전하여 직류분을 0(零)으로

(라) By pass SW-K-를 개방하여 전류를 다이오드 D로 轉流해서 차단

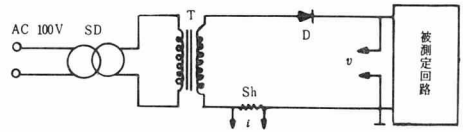


<그림 4> IEC法 回路例

여기서 shunt SH는 고압측에 결선되어 있으나 측정상 대지측의 점 P에 결선하는 것이 편리하다.

2) A.C 半波連続法

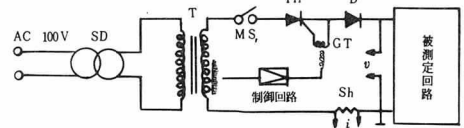
이 방식은 <그림 5>에서 볼 수 있는 것처럼 전술한 IEC法에서 by pass SW-K-를 생략한 것이다, 따라서 상용주파의 +극성만이 통전되고 그 전류 차단시마다 피측정회로 단자간 재기전압파형이 재현되기 때문에 정지된 파형을 관측할 수 있다. 그러나 이 방식에서는 직류분이 대량으로 포함되기 때문에 전류변화율 ($\frac{di}{dt}$)이 작아지고 전압의 진폭도 작아진다.



<그림 5> 連続法 回路例

3) 位相制御付 A.C法

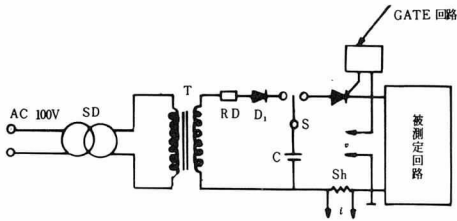
AC半波連続法の 단점인 직류분을 제거시키기 위하여 位相制御를 행하는 方法이다. 回路構成은 <그림 6>과 같고 이 경우 다이오드 D는 없어도 좋으나 차단소자의 극간 정전용량을 적게 하기 위하여 많이 사용된다. 또 A.C 半波를 연속적으로 흘리면 전원변압기 및 thyristor의 전류정격이 커야 하므로 AC半波를 1회만 흘리기 위하여 Th의 gate trigger를 제어하는 방식이다.



<그림 6> 位相制御付 AC法 回路例

4) Condenser 電流 印加法

이 방식도 IEC에서 제안된 방식으로 固有再起電壓 決定法에서 기술한 것과 같으나 이 방식에서 回復電壓은 직류로 되기 때문에 재기전압의 파고시간이 큰 경우에는 상용주파의 변화분을 재현 불가능하므로 보정이 필요하다.



〈그림 7〉 Condenser 電流 印加法 回路例

나. 理想遮断

앞에서 설명한 바와 같이 固有 再起電壓 波形은 回路特性만으로 결정되어야 하므로 遮断素子에 의한 영향이 나타나지 않고 理想遮断이 되도록 노력하지 않으면 안된다.

1) 遮断素子

(가) 商用周波電流印加法 : 다이오드 또는 싸이리스타를 사용하고 전류용량 및 차단 특성의 점에서 고속용싸이리스타(Turn-Off시간 10μs 이하) 또는 고속도다이오드를 10~100개 정도 병렬로 사용한다.

(나) Condenser 電流印加法 : 초고속도(고속도) switching 용 다이오드 또는 싸이리스타를 사용하고 surge 전류의 통전용량 및 逆耐電壓이 큰 것이 요구되는 경우는 싸이리스타쪽이 양호하다. 단 10KHz 이하의 파형의 경우에는 고속도싸이리스타를 사용해도 충분하다.

(다) Condenser 電流印加法에 의해 SLF (Short Line Fault) 모의회로를 대상으로 해서 각종 차단소자의 차단특성을 조사한 결과에 따르면 고속도 싸이리스타의 경우 소자의 영향에 의해 파형에 왜형이 일어남을 보여주고 있다.

이상의 결과로 볼 때 SLF 등 고주파(數 10~100Hz)를 측정할 경우의 condenser 전류인가법의 차단소자로 해서 차단특성으로 볼 때 싸이리스타는 부적당하고 초고속도(고속도) 스위칭용 다이오드 또는 싸이리스타를 사용하는 것이 바람직하다. 더욱 외부 noise가 높은 경우 제어용량의 점에서 싸이리스타가 적당하다.

2) 理想遮断

주로 상용주파전류 인가법에 사용하는 싸이리스타에 대해서 기술하면 전류차단후의 싸이리스타 극간의 전압상승률에도 영향을 받으나 정격전류의 80% 부근에서 차단특성이 비교적

양호하다. 또 동일 종류의 싸이리스타에 있어서는 정격전류가 적은 것이 차단특성이 좋다. (따라서 대전류의 경우 작은 정격 싸이리스타를 병렬 사용) 구체적으로 이상차단을 얻는 방법으로 해서는 장치의 전원용량 및 S/N 비를 고려해서 주입전류를 증감하면 좋다. 물론 동일한 정격의 싸이리스타에서는 주입전류가 적은 경우 전류 clipping 이 발생하고 많은 경우에는 잔류전류가 발생한다. 또 연속통전시간을 길게 해도 잔류전류가 발생하는 경향이 있다.

다. 各方法의 특징과 장단점

1) IEC 法

제어방법이 복잡하고 理想遮断点을 찾아내기에 어려워 통상 AC 半波 連續法과 組合해서 이상차단점을 찾아낸다. 이 경우 동일한 차단소자, 주입전류에서도 半波 連續法보다 특성은 좋다. 전류의 직류분이 零으로 되므로 10~20 cycle의 通電을 필요로 하지 않는다. 또 차단 소자의 전압강하가 무시할 수 없이 큰 경우는 最終半波의 가능한 한 빠른 部分에서 차단소자에 轉流시키는 것이 바람직하다.

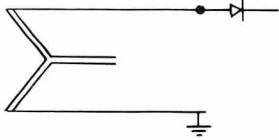
2) A.C 半波 連續法 및 位相制御付 A.C 法

半波의 返復波形이 얻어지기 때문에 CRO (Cathode Ray Oscilloscope)로 静止波形을 관측할 수 있어 이상차단의 검토, TRV의 개략치를 파악하는데 용이하다. A.C 半波 連續法은 복잡한 제어는 필요하지 않고 回路力率만으로 通電位相이 결정되기 때문에 過渡現象이 連續적으로 일어나고 直流分零에서의 차단이 곤란하다. 이것을 해결하기 위해서는 외부에 저항을 삽입하여 역률을 좋게 하는 방법이 있으나 大容量電源이 필요하다. 이것에 비해서 位相制御付 A.C 法은 thyristor의 通電位相을 제어함으로써 직류분제어를 행하는 방법이다.

3) Condenser 電流印加法

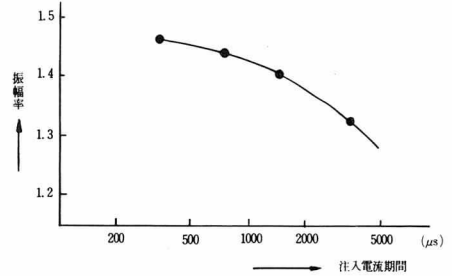
이 방법의 장점은 noise level이 큰 경우 동일한 주입전류파고치에서 商用周波電流印加法에 비해 印加周波數가 높기때문에 S/N 比가 커서 해석이 용이하다. 또한 注入電流의 주파수를 TRV 주파수의 1/8 이하로 해야하는 것은 고주파진동이 완전하게 감쇠한 시점이 아니면 電壓分布가 변화하는 것에 기인하고 또 1/8 이하가 되는 상태에서 TRV 파형의 초기상승부분의 관측이 용이하다. 또 간략계산으로 피측정회로

의 C_0 에 대해서 64배이상의 C (드물게는 200배)가 필요하여 C_0 가 큰 경우 매우 큰 C 가 요구된다. 그리고 被測定回路내에 印加周波수에 대한 非直線性 inductance (發電機, 變壓器등)가 있는 경우에 注入電流周波수에 따라 TRV의 振幅率(注入電流電壓降下를 기준한 振幅率)이 변



〈그림 8〉發電機 단독회로

화하기 때문에 이 방법에 의한 측정은 피하는 것이 좋다. 〈그림 9〉는 〈그림 8〉의 회로(단락발전기단독회로)에 대해서 condenser 電流印加法로 측정한 결과인데 電流注入時間과 振幅率의 관계를 나타내는 것으로 振幅率이 변화하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 9〉주입전류기간과 진폭율

라. Analyzer의 選定과 波形解析

1) Analyzer의 選定

Analyzer를 사용하여 측정한 결과를 간단히 analogue적으로 비교하는 경우는 어떤 방법의 analyzer를 사용해도 차가 없고 시간축이 거의 일치하는 파형이 얻어진다. 그러

나 실제로는 短絡試驗時的 전압 전류의 스케일로 환산해야 할 필요가 많기 때문에 피측정 회로에 대해서 적당한 analyzer를 選定하는 것이 중요하며 각 연구소의 경험과 연구결과에 의한 回路特性에 따른 analyzer의 選定은 다음 〈表 1〉과 같다.

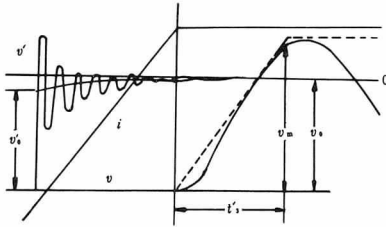
被測定回路	Analyzer種類
	發電機, 變壓器등 鐵心を 포함한 inductance가 주된 回路 IEC法 또는 位相制御付 A.C法
	發電機, 變壓器등 inductance와 直線性 inductance를 포함한 회로 直線性 inductance가 주된 回路 IEC法 位相制御付 A.C法 Condenser 電流印加法
	鐵心이 없는 回路로 相互 inductance에 의해 二次回路가 結合되어 있고 그 영향이 무시할 수 없이 큰 경우. 1. 2次回路가 商用周波数로부터 注入電流周波数까지 直線性 Inductance로 볼 수 있는 회로—I E C法, 位相制御付 A.C法, Condenser 電流印加法 2. 非直線性 경우—I E C法 및 位相制御付 A.C法
	直線性 inductance만으로 構成되어 있고 非直線性은 無視可能 IEC法, 位相制御付 A.C法 Condenser 電流印加法

〈表 1〉被測定回路 Analyzer 選定

2) 波形解析

短絡試驗室의 試驗回路中에 대표적인 發電機를 포함한 直接短絡試驗回路와 SLF 試驗用回路에 대해서 기술한다.

(가) 短絡試驗回路



v ; 전압파형 v' ; 전압파형 (저속도 sweep)
 i ; 전류파형 v_0 ; 진동의 중심선과
 v_m ; 파고치 (V) i_0' 의 교점 (V)
 t_0' ; 파고시간 (μs) v_0 ; 零線
 d_i/d_t ; Oscilloscope로 측정된 電流 0 점의 變化率

(1) 固有振幅率 = v_m/v_0

(2) TRV波高值의 算出(実負荷時로 換算)

i) 電流變化率에 의한 換算

実負荷時의 波高值를 $v_c(d_i/d_t)$ 라 하면

$$U_c'(d_i/d_t) = v_m \times d_i/d_t / d_i/d_t \dots\dots\dots$$

ii) 回復電壓에 의한 換算

実負荷時의 TRV波高值를 $U_c'(V_{rec})$ 라 하면

$$U_c'(V_{rec}) = v_m/v_0 \times \sqrt{2} \times V_{rec} \dots\dots\dots$$

단 V_{rec} = 規格에 의해 산출한 回復電壓 (三相試驗의 경우 第一相차단시의 값)

이상과 같이 TRV波高值의 換算방법으로 2가지가 있으나 실험적으로는 $U_c'(d_i/d_t) \geq U_c'(V_{rec})$ 로 되고 $U_c'(V_{rec})$ 의 값이 實遮斷時의 값과 거의 일치하고 산출방법도 간단하다. 따라서 일반적으로 直接短絡試驗時에는 回復電壓에 의한 TRV波高值 算出方法이 좋다.

(나) SLF 試驗用線路

SLF試驗用線路로써 사용하는 模擬回路와 實線路(架空線路)에 대한 波形 측정결과 및 그 회로는 다음과 같다.

(1) 模擬線路의 波形解析

i) 振幅率 = v_m/v_0

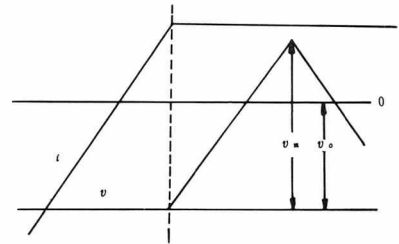
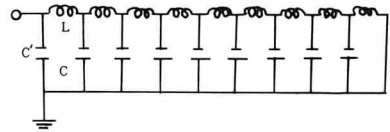
ii) Surge impedance = $\frac{d_v/d_t}{d_i/d_t}$

(2) 實線路의 波形解析

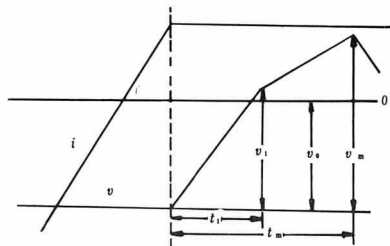
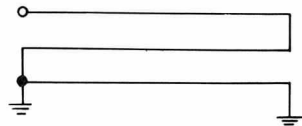
i) 振幅率 = v_m/v_0

ii) 初期 surge impedance = $\frac{v_i/t_i}{d_i/d_t}$

iii) 平均 surge impedance = $\frac{v_m/t_m}{d_i/d_t}$



模擬線路



實線路 (架空線路)

実負荷時의 v 軸을 換算하는 경우 d_i/d_t 에 의한 換算 또는 v_0 를 試驗時 線路의 電壓降下 波高值로 換算하는 方法이 있으나 2가지 方法이 모두 실제결과와 잘 일치하고 있다.

이상으로 遮斷容量試驗等을 행하는 短絡試驗室에서 固有再起電壓을 決定하기 위하여 실험적으로 사용되는 analyzer에 대해 설명했으나 analyzer에 의한 측정시에 高電壓에서

일어나는 corona損, 銅損, 히스테리시스損 등의 영향이 포함되지않고 또 補正方法도 없다. 그러나 各國의 研究所에서 眞空遮斷器를 사용하여 얻은 固有再起電壓波形과 analyzer에 의한 波形을 比較 檢討한 결과 거의 일치하고 있음을 보여주고 있어 短絡試驗室에서 固有再起電壓의 決定 및 SLF 模擬線路의 回路定數決定에 유효하게 사용할 수 있다.

Ⅲ. 結 論

短絡試驗室에서 遮斷容量試驗을 實施할 때 차단성능을 좌우하는 전류와 재기전압 중에서

固有再起電壓의 決定法으로 analyzer에 대해서 설명했는데 이것은 短絡試驗設備의 정확한 回路定數決定을 위한 것으로 當研究所 昌原電氣分所에 建設中인 短絡試驗研究設備(大電力試驗研究設備)의 운전에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. Green, A., "Electrical Transients in Power System", 1970.
2. しゃ斷器常置專門委員會, "しゃ斷器試驗法"
3. IEC 17A(CO) 101.

