

발전기 과여자를 고려한 단락시험회로의 회로특성 결정인자 분석연구(I)

안상호

전력시험기술센터 LG산전 (주)

Study for analyzing decisive factors on short circuits of testing laboratory with short circuit generator using super excitation (I)

Ahn, Sang-Ho

Power Testing & Technology Institute LG Industrial Systemes co. Ltd.

Abstract - 전력계통의 정상상태와 다양한 고장상태를 모의하기 위한 단락시험설비는 크게 단락발전기, 보호차단기, 전류제한 리액터, 투입스위치, 단락변압기, 버스바 및 케이블, 투입피크 제한장치, 부하회로 및 측정장치 등으로 구성되어 있으며, 유효한 시험을 위해서는 이러한 (변수)조합들을 적절하게 조절, 제어하여 실제통의 현상을 재현하거나 규격 또는 의뢰자의 요구에 부응하도록 하는 것이 중요하다.

이것을 위해서는 각 시험설비의 정상 및 과도 특성과 조합된 회로에 상존하는 변수 (stray values)들을 찾아내고, 이들에 대한 독립성과 의존성 관계를 파악하여 계산 가능한 모델링을 도출 하여야 한다. 그러나 경험적으로 볼때 단락발전기의 과도임피던스 및 여자특성과 변압기를 포함한 회로상의 stray values 등이 여러 변수들과 만들어내는 상관관계를 파악하는데는 좀 어려움이 있었다.

본 논문에서는 이러한 관점에서 상기 변수에 따른 변화 기여도를 가능한 한 정량적으로 분석하여 회복전압, TRV 및 전류와의 상관관계를 규명해 보고자 한다.

1. 개 요

단락 발전기는 단락 전류의 통전 시 발전기의 용량, 고유 과도특성 및 외부임피던스 (Current limiting reactor, 전류제한 리액터) 등으로 결정되는 회로특성에 따라 감소하게 되는데, 이러한 감소분을 보상하기 위하여 계자권선을 매우 빠른 시간 내에 여자 (Super excitation)시키는 과여자 방식의 발전기 (Short circuit Generator using super excitation)를 사용하기도 한다. 본 전력시험기술센터의 발전기는 이러한 방식을 사용하여 차단시점에서의 용량을 증가시킴으로써 실질적으로 보다 큰 용량의 단락 발전기가 가지는 출력을 낼 수 있다. 하지만 이러한 방식의 시스템에서 회로의 변수를 산출하는 것은 일반적인 경우 보다 다소 번거로운 과정을 거쳐야 한다. 일반 단락 발전기에서는 볼 수 없는 과여자 (super excitation) 특성 때문인데 회로에 과여자를 적용하게 되면 회로고유의 특성은 그 시점부터 다소 변화된 회로정수를 갖게 되므로 전류의 후단, 과도회복전압 (Transient recovery voltage) 및 회복전압 (Power frequency recovery voltage)에 대한 특성은 초기부분의 전압 (인가전압) 및 전류가 가진 특성 (시정수)으로는 유추하기가 어렵게 된다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 가능한 실제 현상에 근접한 회로변수들을 도출해 내기 위하여 실제 단락시험회로를 이용한 calibration 연구시험을 수행하였고 본 연구는 이러한 데이터들을 분석하는 것으로부터 시작하였다.

본 논문에서는 전압, 전류 선정 및 역률측정방법 등에 관한 내용을 소개하고 TRV 관련 특성 및 과여자 특성 산출에 관한 내용은 추후 소개할 예정이다.

본 연구는 고압단락회로를 기준으로 한 것이며, 부하시험 및 저압시험에 관한 내용은 포함하지 않았다. 회로변수를 계산하기 위해서 기존의 시험데이터와 함께 추가적인 circuit calibration tests를 수행하였으며, 변압기 2차측의 12가지 tab setting에 따라 발전기 전압, 과여자 계수 및 CLR 등을 변화시켜 분석하였다. 허용오차에 대한 기준은 동일한 조건에서 반복시험을 수행한 결과의 평균한 값을 참조하여 적용하였다. 재현성 즉 반복측정치에 대한 유효성 논의는 다소 소모적인 논쟁이 될 수 있으므로 본 논문에서는 배제하고자 한다.

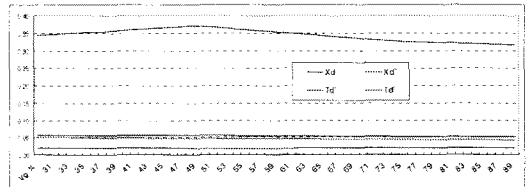
2. 주요 시험설비의 특성

단락발전기 및 변압기의 개요 및 특성은 다음과 같다

- 단락 발전기
- 정격전압 : AC 18kV
- 정격용량 : 85MVA(단락용량 : 1608MVA at t=0)
- 극수 : 2극
- 회전수 : 3600rpm(60Hz)
- 임피던스 : X'd(5.3%), X'd(7.3%), Xd(63%)
- 시정수 : T'd(0.25s), T''d(0.015s)
- [여자용 Thyristor 정류기반]
- 정격 : DC170V-1600A-272kW
- 과부하정격 : DC1200V-13540A-0.6초/15분
- 주회로전원 : 3상 3500kVA-60Hz-1650A
- [가변속제어장치 : VVVF]
- 정격 : 2x 675kVA, AC1000V(3상), 2x390A-60Hz
- 과부하 정격 : 135%-60초
- 모터정격 : 1060kW-60Hz(860kW-50Hz)-1000V

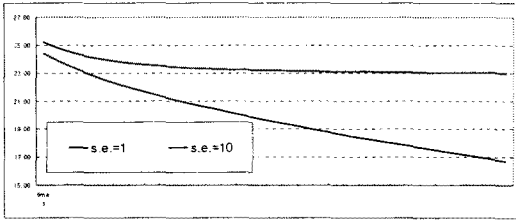
- 변압기

- 용량 및 구성 : 30 MVA x2 / 상
- 1차전압 : AC 18kV
- 2차전압 : AC 4.3, 7.2, 8.6, 12.9, 14.9, 17.2, 21.5, 22.3, 25.8, 29.8, 37.2, 44.7 kV



<그림1 발전기 과여자 특성 곡선>

다음은 과여자 발전기의 과여자 계수에 따른 변화를 보여준다. 과여자 계수가 1일 경우 전류 후반부가 감쇄되는 반면 과여자 계수가 10일 경우에는 보상이 된 것을 보여 준다



<그림2 발전기의 과여자 계수에 따른 전류 변화>

3. 회로분석을 위한 전압의 선정

회로의 임피던스를 계산하기 위하여 일반적으로 회복전압을 사용하고 있으나, 다음과 같은 점이 고려되어야 한다.

- 1) 과여자 (Super excitation) 방식의 발전기를 사용하는 경우, 과여자 계수의 설정치에 따라 전류의 교류성분이 증가하므로 이에 따라 회복전압 역시 증가하게 되는데 이러한 경우 발전기의 과여자 특성을 고려하지 않으면 회로 고유의 값을 얻을 수 없다.
- 2) 전류차단 직후 Transient recovery voltage (과도 회복전압) 이 포함된 파형의 Loop 전압을 측정할 경우, 아크 등에 의한 파형 왜곡과 변압기 포화특성 (고유의 Hysteresis curve - unstable)으로 인하여 Loop가 줄어들거나 왜곡되는 현상이 종종 발생하게 된다. 따라서 회복전압 측정의 시점은 적절히 조정하여야 하며, 상기와 같은 이유로 측정 시 0.5 cycle이 아닌 1cycle을 기준으로 측정하는 것이 바람직하다.
- 3) 발전기의 단락용량과 전류통전 기간에 따라 Test bay에서의 발전기 출력이 감소하게 되므로 정확한 회복전압은 이에 따른 출력용량 특성이 반영된 값으로 고려되어야 한다.

상기 1)의 경우 PT&T의 시험데이터를 분석해 보면 전류통전 0.2 s 기준으로 볼때 과여자 계수에 따라 전류 및 전압의 경우 각각 최대 40% 및 60%의 증가를 보였다.

2)번의 경우 TRV 이후 2번째 Loop를 기준으로 0.5 cycle (60Hz 기준)의 기간 (duration)과 TRV 직후의 다음 Loop (1번째 Loop)에 대한 0.5 cycle을 비교 측정 한 결과 많게는 5%의 차이를 보였다. 하지만 같은 방법으로 1cycle 씩 측정 한 결과를 보면 1%의 차이를 보인다. 이것은 power frequency recovery voltage 즉 발전기가 상용주파회복전압에 귀의하는 자연적인 현상에 기인하며, TRV 직후 약 0.5 cycle 이후에는 일반적으로 고유 주파수를 회복함을 본 연구를 통해 알 수 있다.

가능한 실체에 근접한 회로임피던스를 계산하기 위해서는 이와 같은 uncertainties를 분석해 내거나 제거하여야 하는데, 이러한 과도특성들의 일일이 분석해 내기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다.

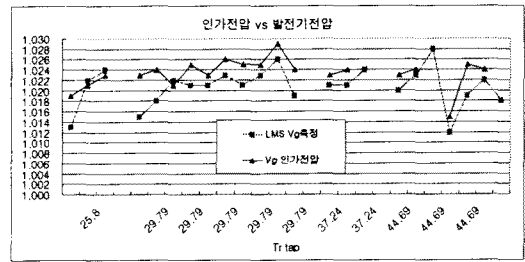
본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 회복전압 대신 인가전압을 사용하여 회로분석을 수행하였으며, 다음과 같은 장 단점이 있다.

- 1) 인가전압은 차단 시 아크, 발전기 용량 감소 및 변압기 포화 등으로 인한 파형 왜곡 및 시료의 re-ignition, NSDD 등으로 인한 파형 shifting 등이 종종 발생하는 회복전압과 비교하여 stable 한 특성이 있으며, 따라서 상간 오차가 적고 회로 고유의 주파수를 가지고 있다.
- 2) 과여자 방식의 발전기를 사용하는 경우에도 과여자에 따른 고유 특성 변화로부터 독립적이다
- 3) 시험의 효율적인 면 등을 고려하여 일반적으로 동작

책무는 "O" (차단기 Open) 시퀀스를 사용하는데, 이러한 경우 인가전압 측정에 어려움이 있다

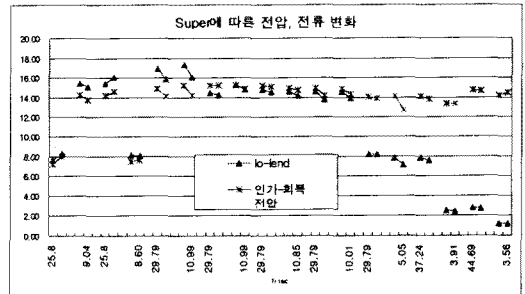
상기 1)과 2)와 같은 면을 고려할 때 인가전압은 회로의 특성을 분석하는데 큰 장점이 있으나 3)번과 같이 난관에 봉착할 수가 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 본 연구에서는 발전기 전압과 인가전압과의 상관관계를 조사하여 발전기 전압으로부터 추정된 인가전압을 사용하여 회로를 분석하였다.

대부분의 시험소에서 발전기 전압은 두 가지로 측정되는데, 시험 수행을 위하여 실제 발전기의 여자값을 읽는 (측정하는) 경우 (LMS 측정치)와 측정 시 측정기준 및 발전기 상태를 오실로그래프에 반영 (규격 요구사항)하기 위해 측정시스템상에서 측정하는 경우(Vg 측정치)가 있다. 본 연구에서는 두 가지 경우에 대해 실제 측정된 인가전압과 비교하여 (LMS vs 인가전압 측정치, Vg vs 인가전압 측정치) 추이를 살폈으며, 결과는 다음과 같다.



<그림3 발전기전압 측정치 vs 인가전압 측정치 비교>

그림에서 보는 바와 같이 Vg vs 인가전압 측정치의 경우가 보다 적은 오차를 보였으며, 측정된 인가전압과 발전기전압은 발전기 30~50% 여자 시 약 1.8%, 60~95% 여자 시 약 2.3%의 차이를 보였으며, 이러한 결과치는 PT&T의 발전기 전압은 Potential transformer로 측정하는 반면, 측정된 인가전압은 R-C type Voltage divider를 사용하여 측정하는데 따른 차이가 주요한 것으로 추정된다. 상기의 결과치는 회로를 분석하는데 사용되었다.



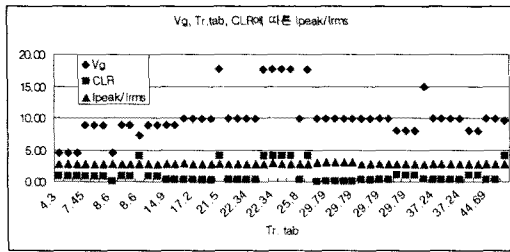
<그림4 과여자에 따른 전압, 전류의 변화 추이>

상기의 그림은 과여자 (super excitation 3~11)에 따른 전압과 전류의 관계를 보여주는데, 전류의 경우 초기치~말기 (통전시간 0.12 s), 전압의 경우 인가전압~회복전압을 나타내며, 과여자를 적용할 경우 초기에는 회로의 고유한 특성을 따르지만 끝부분에서는 과여자 특성에 따라 회로가 특징지어 지는 것을 알 수 있다. 발전기전압과 인가전압의 관계가 co-relative coefficient를 기타 변수의 복잡한 관계를 추적하지 않더라도 도출할

수 있는 반면, 과여자 방식의 발전기를 사용 할 경우 회복전압과의 관계는 과여자 시의 과도임피던스(x'd)로 인한 교류분 감쇄특성을 고려하여야 하므로 발전기의 과도특성과 회로임피던스 (External impedance) 간의 특성분석이 선행되어야 하며 위의 그림은 이러한 사실을 보여준다.

4. 회로분석을 위한 전류의 선정

전류는 과여자 방식의 발전기를 사용할 경우 과여자 계수에 반응하여 많은 변화를 보이게 되는데, 발전기의 고유 임피던스 보다 상대적으로 많은 외부 임피던스가 회로에 적용될수록 과여자의 효과는 줄어들게 된다. 본 연구에서는 0.12 s 정도의 전류 통전 기간 동안 가능한 감쇄가 없는 정도의 과여자를 적용하였으며, 이것은 이와 같은 조건에서 발전기의 과도특성과 외부임피던스의 상관관계를 규명하고자 함이다. 실제 시험 중에는 이러한 조건이 종종 유효하게 사용된다.



<그림5 Vg,Tr.tab 및 CLR에 따른 Ipeak/Irms 비>

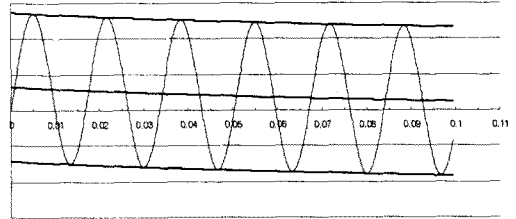
차단시험을 할 경우에는 차단시점의 전류와 전압이 중요하므로 시료가 절연회복을 하기 직전의 전류를 측정하지만, 본 연구에서는 위에서 언급한 변수 요인들을 배제하고 정확한 회로계산을 위하여 전류 초기부분을 측정하여 분석에 적용하였다. 동일한 회로 및 전압조건에서 대칭 전류와 최대 비대칭 전류를 각각 흘려서 시험을 하였으며, 이것은 전류초기 부분을 임피던스 계산에 사용하고 또한 회로고유의 Ipeak/Irms 계수를 구하기 위한 두가지의 목적이 있다. 전류의 Ipeak 와 Irms 측정 지점을 초기 전류 지점으로 통일하면 Ipeak와 Irms 측정 지점간의 거리 만큼 생기는 회로변수의 차이를 최소화 할 수 있다.

5. 역률측정 방법 선정

회로상의 변수들을 찾아내기 위하여 결정되어야 할 중요한 요소 중의 하나는 역률이다. 역률은 회로의 특성을 결정짓는 시정수로도 표현되며 적용방법과 측정방법에 있어서도 가장 민감한 사항 중의 하나이다. IEC 및 ANSI 등에서는 나름대로 역률 측정 방법의 적용을 위한 몇 가지 이론적인 방법들을 제시하고 있으나 여러 가지 현상이 복합되어 발생하는 단락시험 회로에서 파형의 역률을 정확히 측정해내는 것은 아직까지 어려운 과제이며, 이에 대해 각 시험소에서는 각자의 방식으로 이를 측정하고 있다.

역률은 계통의 특성을 결정짓게 되므로 해당 계통에 설치되는 보호기기는 (ex: 차단기, 개폐기, 퓨즈 등) 그러한 특성을 감당할 수 있는 성능을 갖추어야 한다. 고압차단기류에 적용되는 IEC 규격이 개정되면서 이러한 사항들을 강조하고 있는데, 구 규격에서 45ms의 시정수를 기본으로 하고 있으나, 개정된 규격에서는 특정한 하나의 시험으로부터 얻어진 시정수를 하나 이상의 시정수를 갖는 계통에 적용이 가능하도록 하는 의도가 있다.

본 연구에서는 역률을 계산하기 위하여 ANSI에서 규정하는 DC decrement method의 개념을 다소 보완한 방법을 사용하였는데, 이 방법을 사용할 경우 다음 식에서와 같이 DC분의 초기성분에 대한 데이터를 필요로 하지 않으므로 Io를 구하기 위한 포락선 계도 시 발생하는 오차를 배제할 수 있으므로 보다 정확한 역률을 구할 수 있는 장점이 있다.



<그림6 역률 산출 방법>

$$I1 = Io e^{-\frac{T1}{\tau}} \quad (1)$$

$$I2 = Io e^{-\frac{T2}{\tau}} \quad (2)$$

상기 식에서 (1) ÷ (2)를 하면

$$\frac{I1}{I2} = \frac{Io e^{-\frac{T1}{\tau}}}{Io e^{-\frac{T2}{\tau}}} = e^{\frac{T2 - T1}{\tau}} \quad (3)$$

상기 (3)식에서 시정수를 구하기 위하여 양변에 Ln를 취하여 정리하면

$$\tau = \frac{T2 - T1}{\ln \frac{I1}{I2}} \quad (4)$$

가 되므로 간단하게 시정수를 구할 수 있다

6. 결 론

본 논문에서는 과여자 방식의 발전기를 사용하는 단락설비의 회로 변수를 계산하기 위한 분석방법을 제시하고 그에 따른 결과 등을 소개하였으며, 본 논문에 미처 소개되지 못한 과도회복전압의 분석과 전체 시스템에 대한 개괄적인 연구 내용은 차기 논문에 발표하고자 한다.

본 연구에 따른 예상 효과로는

1. 진보된 회로 분석 방법 제시 및 규명
2. 회로 변수간의 상관관계 규명
3. 발전기 및 변압기의 여자특성 (회로조건에 따라 실제 여자되는 시점 및 작용기간 등) 파악에 따른 효율적인 시험운전 가능 : 주요설비 보호 및 수명 연장
4. 보다 정밀한 시험값 예측 가능
5. 시험준비시간 단축 : 시험효율 향상 등이 기대된다..