

## 대전력시험 전용 응용 프로그램

오승렬, 박지훈, 박종화  
LS산전(주) 전력시험기술센터(PT&T)

### Application Program Specialized for High Power Testing Station

Seung-Ryle Oh, Ji-Hun Park, Jong-Wha Park  
PT&T, LS Industrial Systems, Co., Ltd.

**Abstract** - It is necessary to improve the time efficiency in the high power testing station because tests are mainly performed by high-priced equipment. Minimizing a human error through building the database of relevant standards is possible to expect reliable tests. And also, application program that is properly customized for the certain laboratory's power system will help test engineer to easily analyze the phenomenon that is happened in short-circuit and load switching tests. This paper introduces the several functions of the application program that is developed in order to realize these requirements.

**Key words:** high power test, application program, short-circuit test

## 1. 서 론

### 1 개발 배경

대전력시험은 전력 기기의 성능을 평가하는 중요한 항목으로 단락 발전기, 단락 변압기, 투입 개폐기, 제어 및 측정 장비 등 고가의 설비가 운용되므로 시험 진행에 있어 시간 효율성을 증대 시키는 것은 대단히 중요하다.

당사 시험소에서 진행되는 대전력시험은 크게 단락투입 차단, 단시간 내전류, 내아크, 소전류 개폐, 부하전류 개폐 시험으로 나뉘지며 KS, IEC, UL, IEEE등과 같이 다양한 규격에 따라 제품 평가가 이루어진다. 이러한 규격에는 시험에 대한 조건과 더불어 다양한 수치정보가 산재 되어 있기에 이들 중 주요 내용을 데이터베이스로 구축하여 특정 시험에 대한 정보를 쉽게 얻을 경우 시험 편의성은 물론 신뢰성을 향상 시킬 수 있을 것이다.

이와 더불어 시험소 계통에 연계되어 있는 각종 설비의 정격을 데이터베이스화 할 경우 시험 전 이들 용량에 대한 검토를 용이하게 할 수 있어 안정적인 설비운용에 도움이 될 수 있다. 또한 수년간 진행한 시험 데이터를 집약적으로 관리한다면 향후 동일하거나 유사한 시험을 진행함에 있어 효율성을 향상 시킬 수 있을 것이다.

이러한 요구에 맞춰 개발된 대전력시험 전용 응용프로그램(이하 PTES)은 입력된 제품 정격을 바탕으로 선택된

규격에 대한 시험조건과 등가회로를 구성하기 위한 단락 발전기의 운전조건 및 회로의 R, L, C 정수값을 제시해 준다. 또한 PTES는 여러 가지 운전 조건 및 현상에 대한 시뮬레이션 기능을 제공하며 시험 편의성 도모를 위해서도 필요한 유틸리티를 추가하여 시간 효율성 제고에 중요한 역할을 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 설계 및 데이터베이스 구축

개발된 응용 프로그램은 시험소 내의 전력계통을 정확하고 효율적으로 프로그램상에 구현하기 위해 객체 지향 기법을 이용하였다. 이는 물리적인 최소단위를 객체로 모델링하여 각각의 특성과 기능을 객체의 멤버 변수와 멤버 함수로 나타내며 객체 서로간은 단 방향 연결 리스트(Linked list) 형태로 시스템을 구성한다.

시험회로 계산 및 규격에서 요구하는 시험조건에 대한 검토를 용이하게 하기 위해 여러 규격에 산재되어 있는 수치 정보를 데이터베이스화 하며, 안정적인 설비 운용을 위해서는 시험회로 내에 구성된 모든 설비의 정격을 데이터베이스로 구축하여 시험 전 이들에 대한 용량 검토를 쉽게 할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

프로그램 개발에 앞서 데이터베이스 구축단계에서는 필요한 실체(Entity)를 여러 개의 테이블로 작성하여 관계형 데이터베이스(RDBMS)로 구성하였다. 이들은 크게 회로정수 계산과 각종 시뮬레이션을 위해 필요한 설비정격에 대한 테이블, 시험 데이터의 집약적인 관리를 위해 구성된 테이블, 관련 규격에 나타나 있는 여러 가지 수치와 시험 조건을 표현하기 위한 테이블, 마지막으로 원활한 시험 진행에 도움을 주기 위해 구현된 각종 유틸리티에서 이용하는 테이블로 특정 지을 수 있다.

### 2.2 발전기 과여자 계수에 따른 단락전류

발전기 특성에 따른 단락전류 분석기능은 정형화된 시험조건을 얻기 위해 반드시 필요한 부분이다. 발전기에서 공급되는 단락전류는 시험회로의 임피던스와 발전기가 갖는 과도특성에 따라 단락시점부터 감소하게 되는데 이러한 감소분을 보상하기 위해 당사 시험소의 발전기는 단락순간 정격의 최대 16배의 여자전류를 제자전선에 공급하는 과여자 방식(over-excitation)을 적용하고 있다.

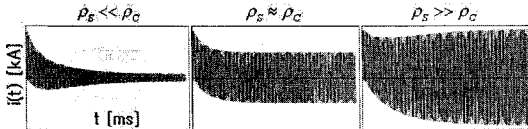
이러한 과여자 방식은 단락순간부터 차단 시점까지 일정한 단락전류를 공급할 수 있는 장점이 있으나 과여자 계수 설정값에 따라 단락전류가 과도하게 증가하거나 감소하는 경우에는 시험의 유효성에 큰 영향을 미치므로 시험전 회로조건에 따라 발전기 운전조건을 결정하는데 주의가 요구된다.

단락순간 전기자의 저항 성분은 아주 작으며 회축과도 리액턴스는 단락전류에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 발전기 삼상단락 전류식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s(t) = \frac{u_1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\rho}{X_d + X_c} + \left( \frac{\rho}{X'_d + X_c} - \frac{\rho}{X_d + X_c} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{\rho}{X''_d + X_c} - \frac{\rho}{X'_d + X_c} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \quad (1)$$

$u_1$ : 단락 투입전 개방회로전압  
 $X_c$ : 직축 동기 리액턴스  
 $X'_d$ : 직축 과도 리액턴스  
 $X''_d$ : 직축 초기 과도 리액턴스  
 $\rho$ : 과여자 계수  
 $T'_d$ : 단락 기간중 과도 시정수  
 $T''_d$ : 단락 기간중 초기 과도 시정수  
 $X_c$ : 외부 임피던스

위의 식(1)을  $\rho$ 에 대해 정리하면 단락 초기전류를 일정하게 유지시키기 위한 과여자 계수값( $\rho_c$ )과 임의의 시간  $t$ 에서 특정 크기의 전류를 얻기 위해 설정해야 할 값을 얻을 수 있다. 개발된 응용 프로그램은 각각의 시험 조건에 대해 적절한  $\rho$ 값을 구하거나 임의의  $\rho$ 값에 대해 시뮬레이션이 가능하도록 구현 되어 있어 실제 시험에 많은 도움을 준다. 아래 그림은  $\rho_c$ 를 기준으로 실제 설정한 과여자 계수값( $\rho_s$ )에 대한 2 초 동안의 단락 전류 추이를 나타낸 것이다.



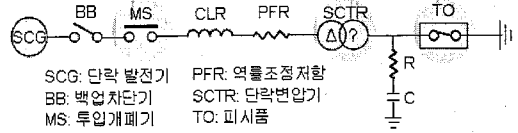
<그림 1. 과여자 계수 설정에 따른 단락전류>

### 2.3 비동시투입에 따른 단락전류

삼상이 동시에 단락 되는 것과는 달리 단상사고가 발생하고 수 밀리 초(milliseconds)가 지난 후에 순차적으로 삼상사고로 이어지는 현상은 전력계통에서 흔히 발생할 수 있으며 이때의 단락전류는 삼상 단락사고와는 다른 형태로 나타난다. 이러한 이유는 단상에서 삼상으로 전이되는 시점에서 마지막으로 사고에 기인하는 상과 그때에 투입되는 전압위상에 따라 달라지기 때문이다. 이러한 현상은 차단기 및 개폐기의 성능 평가를 위한 단락 시험에서도 피시품(test object)의 상간 투입 편차로 인해 간헐적으로 발생하여 시험의 유효성 및 제품 성능 평가에 좋지 않은 영향을 준다.

피시품의 투입특성과는 무관하게 단락시험에서는 적절한 크기의 시험 전류를 얻기 위해 의도적으로 회로 투입용 개폐기의 각상 투입 시점을 달리하는 비동시 투입방법을 적용하고 있으나 이전까지는 이와 관련된 이론적 근거가 미비하였다. 따라서 이에 대한 수식적 토대를 마련하는

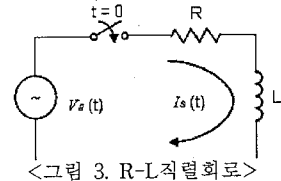
것은 대전력시험 현상을 분석함에 있어 효과적인 접근을 가능하게 하며, 의도적인 단락 시험전류를 얻기 위한 이론적 배경이 될 수 있다. 아래의 그림은 시험소 삼상 계통을 간략하게 단선도로 나타낸 것이다.



SCG: 단락 발전기  
 BB: 백업차단기  
 MS: 투입개폐기  
 CLR: 한류리액터  
 PFR: 역률조정저항  
 SCTR: 단락변압기  
 TO: 피시품

<그림 2. PT&T 시험소 계통 단선도>

위 회로에서 비동시 투입의 해석은  $\Delta$ -Y 또는  $\Delta$ - $\Delta$ 로 구성되는 변압기의 결선방식과 이를 기준으로 1차 또는 2차측 어느 지점에서 발생하느냐에 따라 달라진다.



<그림 3. R-L 직렬회로>

<그림 3>과 같이 R-L 회로에서 스위치가 닫힐 때 과도 방정식은 다음과 같다.

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2)$$

$$I_s(t) = \frac{V_m}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}} \left[ \sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

$$\cos \varphi = R/|Z| = R/\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}$$

위 식을 바탕으로 발생 가능한 몇 가지 회로조건 조합 중에서  $\Delta$ -Y로 결선된 변압기 1차측에서 개폐기가 비동시 투입될 경우를 살펴보면  $t = 0$ 에서 두 극이 투입되어  $t'$ 까지 단상사고가 지속된 후  $t = t''$ 에서 마지막 극이 투입되어 삼상사고로 이어질 때 변압기 2차측 즉, 피시품에 통전되는 사고전류 해석을 위한 과도방정식은 아래와 같이 두 구간으로 나뉘어진다.

i) 단상사고 구간  $t = 0 \sim t'$

$$I_a = \frac{1}{2} I_m \left[ \sin(\omega t - \varphi + \alpha) - \sin(-\varphi + \alpha) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (3)$$

$$I_b = I_m \left[ \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) - \sin\left(-\frac{2}{3}\pi - \varphi\right) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

$$I_c = \frac{1}{2} I_m \left[ \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi - \alpha\right) - \sin\left(\frac{2}{3}\pi - \varphi - \alpha\right) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

ii) 삼상사고 구간  $t = t' \sim t''$

$$I_a = I_m \left[ \sin(\omega t' - \varphi) - \sin(-\varphi) e^{-\frac{R}{L}t'} - i a_{ac} e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (4)$$

$$I_b = I_m \left[ \sin\left(\omega t' - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) - \sin\left(-\frac{2}{3}\pi - \varphi\right) e^{-\frac{R}{L}t'} \right]$$

$$I_c = I_m \left[ \sin\left(\omega t' + \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) - \sin\left(\frac{2}{3}\pi - \varphi\right) e^{-\frac{R}{L}t'} - i c_{ac} e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

여기에서,

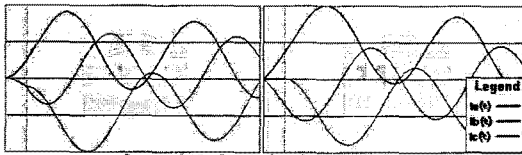
$$i_{a_{\alpha}} = I_m \left[ \sin \left( \omega t' - \frac{2}{3} \pi - \varphi \right) - \sin \left( -\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) e^{-\frac{R}{L} t'} \right]$$

$$- \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_m \left[ \sin \left( \omega t' - \frac{2}{3} \pi - \varphi + \alpha \right) - \sin \left( -\frac{2}{3} \pi - \varphi + \alpha \right) e^{-\frac{R}{L} t'} \right]$$

$$i_{c_{\alpha}} = I_m \left[ \sin \left( \omega t' + \frac{2}{3} \pi - \varphi \right) - \sin \left( \frac{2}{3} \pi - \varphi \right) e^{-\frac{R}{L} t'} \right]$$

$$- \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_m \left[ \sin \left( \omega t' + \frac{2}{3} \pi - \varphi - \alpha \right) - \sin \left( \frac{2}{3} \pi - \varphi - \alpha \right) e^{-\frac{R}{L} t'} \right]$$

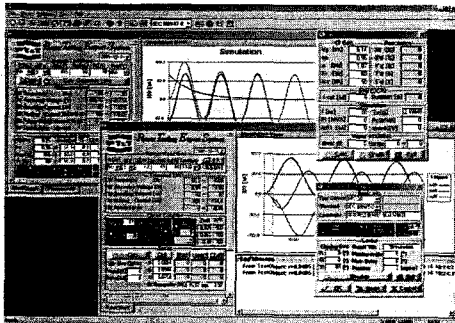
위 식에서  $\alpha$ 는 삼상회로에서의 단상사고에 따른 위상 변화량을 나타낸다. 아래의 그림은 구현된 시뮬레이터를 통해 삼상 동기 투입시 최대비대칭 전류가 발생하는 조건에서 한국이  $\pi/3$  만큼 늦게 투입된 경우  $\Delta$ -Y로 결선된 변압기의 1차측과 2차측에서 발생하는 전류를 해석한 결과이다. 단락전류파형에서 수직점선은 단상사고와 삼상사고 구간의 경계이며, 시뮬레이션 결과의 신뢰성은 EMTP와의 비교를 통해 확보하였다.



<그림 4. 비동시 투입 시뮬레이션 결과>

#### 2.4 유틸리티(그 외 기능)

위에서 언급한 기능 이외에도 시험 편의성을 제공하기 위해 PTES에 몇 가지 기능을 추가하였다. Q factor, 역률, 실효값과 피크값의 비율을 나타내는 n factor 등의 상관 관계를 계산해 주는 기능은 시험전류조건에 따른 회로정수 계산시 적절한 역률 산정에 도움을 주며, UL, IEEE규격과 IEC, KS규격 간의 상이한 단위에 대한 이해를 돕기 위해 입력, 길이, 토오크의 단위 변환기능을 제공한다. 줄 에너지( $i^2t$ )에 따른 도체크기 및 온도계산 기능에 따라서 단시간 내전류 시험시 전원측 접속도체를 적절하게 선정할 수 있으며, 부하개폐시험과 같이 일정 시간 간격을 두고 수십 회 반복적으로 진행되는 시험은 알람기능을 사용해 시험간격을 용이하게 변경할 수 있도록 하였다. 마지막으로 기존에 개발된 리액터, 저항 직병렬 조합 계산 프로그램을 유틸리티에 추가해 특정값을 입력하여 조합값을 찾는 데 응용할 수 있도록 하였다.



<그림 5. PTES 실행화면>

### 3. 결 론

최초 개발되어 소개된 PTES는 오프라인에서 해당 규격 조건에 따른 회로 계산 및 시뮬레이션기능을 제공하여 실제 시험에서 준비 시간을 단축시켜 효율성을 증대할 수 있었다.[9]

이를 위한 데이터베이스에는 여러 규격에 산재되어 있는 수치 및 시험 조건과 연관된 설비의 정격데이터를 함께 구축함으로써 시험 신뢰성 및 안정적인 설비 운용에 기여할 수 있도록 하였다. 여기에 기술적 필요성에 의해 추가된 것 중에 하나인 발전기 특성에 따른 단락전류 분석기능은 시험전류 제어를 위한 과여자 계수 계산과 정형화된 시험조건을 얻는데 활용된다.

또한 비동시 투입 해석을 위한 시뮬레이터는 회로 조건 및 시료의 투입 특성에 따른 시험전류를 사전에 예측하여 이로부터 기인하는 현상을 효과적으로 분석할 수 있도록 하였으며 의도적으로 비동시 투입 방법을 이용해 원하는 단락 전류를 얻기 위한 시험 조건을 결정하는 경우에도 유용하게 사용된다. 향후 각 상을 개별적으로 조작하여 스위칭시 발생하는 과도현상을 줄일 수 있는 차단에 대한 성능요건이 IEC 국제 규격으로 제정될 예정이어서 이에 대한 현상 분석 기술은 그 활용도가 높아질 것으로 예상된다.

그 외에 몇 가지 추가된 유틸리티는 시험조건 결정 및 편의성 제고부분에 많은 역할을 담당하게 되며, 향후에는 고압 차단기, 개폐기 시험부분에 대해서도 규격 및 회로 조건에 따른 시뮬레이션과 과도회복전압(Transient Recovery Voltage: TRV) 계산 기능이 여기에 추가될 예정이다. 또한 시험에 대한 이해를 돕기 위해서 시험책무별 규격에 명시된 요구조건에 대한 시뮬레이션 기능을 구현하여 대전력시험 교육 자료로서도 활용범위를 넓힐 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] CIGRE Working Group A3.11 "Guide for application of IEC 62271-1" - October, 2006
- [2] IEC 62271-100 Ed. 2.0 "High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating current circuit-breakers"
- [3] IEEE Std C37.013 - 1997: "IEEE Standard for AC High-Voltage Generator Circuit-Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis"
- [4] 이희철, 한규환 "LG산전 단락발전기의 전기적 특성 및 성능시험 결과 고찰"- 2000년 대한전기학회 하계학술대회
- [5] 오승렬, 나철봉, 박지훈, 박종화 "단락 시험 회로정수 계산용 어플리케이션 개발"- 2004년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회