

인공고장 발생장치의 개발을 위한 고장발생 및 제거 알고리즘 개발과 EMTP 해석 (1)

인상호*, 정영호**, 함길호*, 박종화*, 송중호*, 한용희**, 윤철호**, 이중호**
 * LG산전 전력시험기술센터, ** 한전 전력연구원

Development of Algorithm for Fault Generation & Exclusion and Analysis v for Artificial Fault Generator

Sang-Ho Ahn*, Yeong-Ho Jeong**, Gil-Ho Ham*, Jong-Hwa Park*, Jong-Ho Song*, Yong-Hue Chul-Ho Yun**, Jeung-Ho Lee**

*LGIS Power Testing & Technology Institute, **Korea Electric Power Research Institut

Abstract- In this paper theoretical review for the design and the algorithm of Artificial Fault Generator, on the power distribution center is which able to purposely generate and get rid of fault with the view of testing distribution systems including switchgears, was made. For the following paper verification with EMTP will be performed in order to review the function and the algorithm so that the optimized design can be established.

에 대한 배전자동화 시스템의 보호협조 시험 등을 위하여 고장위상, 고장전류, 고장종류, 고장시간 등의 인위적인 임의조건을 고장을 선택하여 발생 및 제거시키며, 이때의 고장현상을 측정하고 기록을 하므로써 사고결과 분석을 위한 데이터제공이 가능한 설비다. 또한 중앙통제소에서 AFG의 상태감시가 가능하도록 유선 및 무선 통신 장비가 설치된다.

1. 서 론

국내 배전계통 및 배전기들이 자동화되어 가는 추세에 따라 배전자동화 시스템에 대한 시험과 검증이 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 현재 한전전력연구원에서는 전북 고창에 배전 실증시험장을 건설 중에 있으며, 실제 적용시험에 의해 검증된 실질적 연구결과를 획득하고 선진 신배전 기술개발기반을 조성하려는 데 활용할 예정이다.

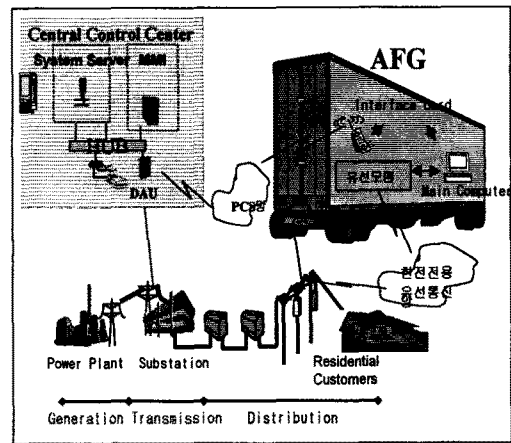
인공고장 발생장치(Artificial Fault Generator 이하 AFG)는 실증시험장의 배전선로에서 다양한 고장현상을 규명하고 대책을 수립하는데 필수적인 장비로서, 22.9kV 배전선로에서 일어날 수 있는 단락 및 지락 등의 선로고장에 대한 현상규명과 이에 대한 배전자동화 시스템의 보호협조 등의 실증시험을 수행하기 위해 인위적으로 임의조건을 고장을 발생, 제거 및 고장현상의 측정, 기록이 가능하며, 중앙통제소에서의 상태 감시가 가능하도록 제작되는 첨단 장비다.

AFG는 일종의 단락설비로 전력계통의 종합적인 기술이 집약되는 장비이며, 선진외국의 몇몇 전력회사와 연구소에서 개발하여 운용하고 있으나, 기술이전을 꺼리고 있으며 또한 국내의 배전계통에 적용하는 것이 불가하므로 우리의 현실에 적합한 장비의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 논문에서는 이러한 인공고장 발생장치의 기능적 검토와 개발을 위한 고장발생 및 제거 알고리즘을 소개하고, 차기 논문에서는 이것을 바탕으로 알고리즘의 적합성과 최적화 여부에 대해 EMTP를 사용하여 검증한다.

2. 기능 개요

인공고장발생장치는 22.9kV-Y 배전선로에서 일어날 수 있는 단락 및 지락 등의 선로고장에 대한 현상규명과 이



< 그림 1. 인공고장발생장치 개요도 >

3. 요구 기능 및 특징

AFG는 배전시험선로 연결용 케이블조작장치, 투입스위치(Making SW)와 후비보호차단기(Back-up Breaker), 인입개폐기(Lead-in LBS), 단로기, 피뢰기, 고장점 임피던스 조정기 등으로 구성되는 고전압 설비부, Sequence Timer (PLC)와 투입위상제어장치, 그리고 조작제어판넬 등으로 구성되는 제어부, 측정기록장치(Fault Recorder), 통신장치와 중앙컴퓨터(Central Control System)등으로 구성되는 중앙제어감시부 등으로 구성된다.

고장의 임의 설정 및 발생을 위해서는 먼저 고장종류를 선택하고 모의하며 발생시간을 조절하여 임의시간에 고장의 발생 및 제거 기능을 완수해야 하는데, 고장의 발생과 제거동작의 수행 순간에는 현상의 분석과 보존을 위해 측정 및 기록장치가 오차없이 동작되어야 한다. 또한 고장발생의 전후에는 각 기기동작 이상유무 확인을

위한 감시가 가능해야 한다.

이러한 일련의 작업을 위해서는 다음과 같은 기능이 요구된다.

3.1 선로 절체 기능

인위적인 고장발생을 위하여 가공선로 또는 지중 배전선로(지중개폐기의 접속단자)로부터 AFG 내 별도의 선로연결용 케이블을 연결할 수 있어야 한다. 이와같은 본선 연결용 케이블 조작장치는 케이블을 배전선로에 연결 또는 철거하는 장치로서, 선로의 지상고 및 안전성 등을 고려하여 사용이 편리하도록 제작되며, 케이블 및 접속 크램프는 AFG에 인가되는 고장전류에 견디는 안전한 구조로 설계된다. 본선 연결용 케이블은 가공선로용과 지중선로용의 2종류를 갖추게 된다.

3.2. 고장종류 모의 기능

본 기능은 회로 뒷단의 단로기를 조작(개폐)하여 발생시키고자 하는 고장(1선지락, 선간단락, 3상단락)을 임의로 모의하는 것으로 본 시스템에서는 회로의 구성상 2선지락 회로가 선간단락 회로의 경우와 차이가 없으므로 2선지락을 생략한다.

3.3 고장점 임피던스 조절기능

본기능은 고장지점에 따른 고장전류의 크기를 조절하는 기능으로 건식의 리액터에 의하여 임의로 고장 전류크기를 모의할 수 있도록 다단계로 조절 가능하다. 또한 배전 선로의 역률 등을 고려하여 제작시 X/R 비를 맞추어 설계된다.

3.4 고장 제어 기능

고장의 발생으로부터 의도하는 현상분석 및 결과를 위해서는 고장을 임의로 제어할 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 사고의 종류에 따라 임의설정된 시간동안 고장지속시간의 조절(또는 지연)이 가능한 고장지속시간 조절기능과 설정된 시간에 각 스위치를 자동 순차 동작시켜 고장을 제거하는 고장 제거기능, 또한 고장전류의 피크치 조절(또는 DC 함유분 조절)을 위한 고장위상제어기능 등이 가능하여야 한다.

고장지속시간조절과 고장제거는 주로 Sequence Timer의 순차적인 스위치 동작의 제어에 의해 이루어지는데, 이때 보호기기가 순차제어 명령에 불응 또는 실패할 경우 보호릴레이에 의한 재차단시도가 이루어져 별도의 후비 보호장치 없이 AFG 자체로 고장을 제거할 수 있어야 한다. 즉, Sequence Timer에 의한 강제고장발생과 고장 제거과정에서 백업차단기가 순차제어 명령에 불응할 경우, 선로의 보호계통과 연계된 한시특성을 갖는 AFG 보호릴레이(OCR)를 사용하여 재차단시도가 이루어져야 한다.

고장의 발생 및 제거과정은 일반적으로 Back-up차단기 투입→ Making SW 투입→ Back-up차단기 Trip → Making SW Open 으로 이루어지며 이는 주로 Sequence Timer에 미리 입력된 프로그램에 따라 일련의 동작이 이루어진다.

Sequence Timer는 이와같은 백업차단기와 투입스위치의 순차제어 외에 투입스위치의 위상설정이 가능하여야 하며, 본 장치내의 고장위상(Making Switch 투입위상) 제어는 3상 일괄조정방식으로 30분 이내의 투입 및 트립 설정이 가능하도록 한다.

이것은 삼상시험의 경우 각상을 60도씩 변화시켜 (0도, -60도, -120도) 각 상별로 투입피크치를 얻을 수 있으므로 한상에 피크치가 가해질때 위상이 각기 다른 두상에 대해서도 조사가 이루어져 120도 정도(또는 180도)로 충분하지만, 단상시험의 경우는 한사이클에 대해 30도 정도씩 위상을 변화시켜서 한사이클을 조사해야하기 때문이다.

투입시의 오차범위는 전압 100% 기준으로 하였을 때, 3상평균의 경우 설정치 $\pm 30^\circ$ ($\pm 1.4ms$) 이내로 하며, 상간오차는 설정치 $\pm 60^\circ$ ($\pm 2.8ms$) 이내로 한다.

전자의 경우는 기준점 (0도)과 설정각도(Prospective Making Phase)를 정해서 3상투입 후 기준점으로 부터의 각 상투입 각도를 평균한 값과의 오차가 $\pm 30^\circ$ 이내 라는 뜻이며, 후자는 기준점(투입에상각)을 정한 후 3상투입 후 기준점으로 부터 어느 한상의 최대 오차가 $\pm 60^\circ$ 이내 이어야 한다는 뜻으로, 이러한 오차의 수치는 VCB를 투입스위치로 사용할 경우 해당되는 사항이다.

투입위상 제어장치가 가져야 할 특징으로는 단상 또는 3상의 고장전류 발생 위상을 허용오차 내에서 임의로 조정할 수 있어야 하며, 투입위상조정장치를 사용하여 투입위상의 오차교정을 할 수 있어야 한다. 특히 투입시 위상의 오차교정을 위해서는 Fault Recorder 등에 의해 투입위상이 판독 또는 기록될 수 있도록 하여야 하며, 이때의 위상제어의 기준전압은 고장상의 PT 2차 전압으로 한다.

3.5 수동 조작 기능

인입부 개폐기, 백업차단기, 투입스위치는 상기에서 언급된 자동연속동작 (인입부 개폐기 제외)외에 각 스위치를 독립적으로 조작하는 개별제어가 가능하여야 하며, 또한 유선으로 연결된 단말기 등을 통하여 외부에서도 시퀀스 설정 및 시험수행이 가능하여야 한다. 일반적으로 고장시험은 시퀀스조작에 의한 연속동작으로 이루어지며 선로의 후비 보호장치가 있을 때에는 경우에 따라 이보다 본 장치의 백업차단기가 먼저 Trip되지 않도록 지연시간을 임의로 설정할 수 있어야 하는데, 시퀀스조작에 의한 연속동작으로 고장차단이 실패할 경우 Relay의 T-C곡선 또는 수동조작판별의 수동조작에 의하여 Back-up 차단기의 Trip 동작이 이루어져야 한다.

이외에 수동조작은 기기의 유지보수 및 시험전 각 스위치의 동작 상태 확인 등을 위해서도 필요한 기능이다. 수동조작에 의한 제어항목은 외부전원 ON/OFF 조작, 충전 ON/OFF 조작, 제어전원 공급 ON/OFF 조작, 단로기 ON/OFF 조작 (LBS, 접지스위치 포함), 전압분배기 연결 스위치 ON/OFF 조작, 백업 차단기의 ON/OFF 조작, 투입스위치의 ON/OFF 조작, 투입위상조정장치 스위치

ON/OFF 조작, 시험시작 및 중지명령 등을 포함한다.

3.6 고장현상 측정 및 기록 기능

고장현상의 측정과 기록은 고장발생과 동시에 이루어져 정밀한 기록 및 저장이 가능하며, 현상분석과 규명이 가능해야 하는데, 이를 위해서는 고장발생시 각 상의 전압, 전류, 영상전압 및 전류의 파도값, 정상값 그리고 고장발생시간, 투입위상 등의 정보를 Fault Recorder에 의하여 측정하고 기록할 수 있어야 하며, 임의 특정값 (최저, 최고 평균치 등)을 산출할 수 있어야 한다. 또한 이 모든 정보를 보존하고 임의 출력이 가능하도록 정보보전장치(하드Disk)를 갖추어야 한다. Fault Recorder는 3상 전류 전압 파형과 투입 및 백업 스위치 신호측정을 위해 8채널 이상, 20kS/s이상의 샘플링속도, 4kS/채널당 메모리 (이상)을 갖추고 또한 고장발생시간의 기록이 가능하도록 내부 클럭을 내장하여야 한다. 또한 각 파형정보는 Fault Recorder를 거쳐 Main Controller의 Hard에 기록되며, Interface device를 통하여 실시간으로 모니터상에 표시되어 고장 현상 감시가 가능하여야 한다.

이외에 요구되는 기능으로 투입위상 조절 시 위상의 교정이 가능하도록 투입위상이 기록되어야 한다.

3.7 감시 기능

모의하고자하는 고장을 발생, 제거 및 기록하기 위해서는 각 기기의 동작상태를 확인하는 작업이 필요하며, 이와같은 요구는 감시부에 의해 이루어진다.

전원장치, 제어장치 및 스위치 등 모든 기기의 동작 및 전원상태는 감시 제어실 내 전면부의 감시판넬에 표시되어 감시 가능하며, 각 기기별 및 구성회로별 운영상태가 감시된다.

감시판넬은 어두운 곳에서도 내용확인이 가능하며, 주 감시항목으로는 스위치(단로기, LBS, 차단기)의 동작상태(ON, OFF, Lockout, Interlock) 및 주접점 상태(개방-적색, 투입-녹색, 접지-주황), 단로기 조작에 의한 고장종류를 나타내는 고장상태정보(A상, B상, C상, N상), 각 기기 전원상태 (주전원, 제어전원포함), 조작 선택 상태(감시제어실내/시험실시보조장치), 전원 측, 부하 측 팔선상태, 충전상태, 내, 외부 수전상태, 연속 및 수동조작 전환상태, 투입위상 설정치 등이 포함된다.

또한 중앙통제소에서 선로 고장 발생정보의 파악을 위하여 고장시험장의 배전자동화시스템 중앙통제소 내 단말기에서 원격으로 실시간 감시가 가능하며, 이를 위해 AFG에 의한 각종 고장정보 (고장발생시간, 고장형태 등)와 각 스위치 및 기기동작상태 등을 원격 감시기능으로 제공한다.

4. 주요 구성기기의 정격

AFG에 사용되는 차단기, 개폐기, 피뢰기는 다음의 정격 및 조건을 만족하여야 하며, 여기에 명시되지 아니한 세부 사항은 IEC, ESB, KSB의 해당 규격에 따르도록 한다.

4.1 Back-up Breaker

고압 진공차단기로 IEC 56에 의한 개발시험에 합격한 제품을 사용한다. 정격전압은 22.9kV를 고려하여 24kV로 하며 정격 차단전류는 12.5kA로 하되 시험에 대한 여유 정격이 필요하므로 25kA를 정격으로 한다.

일반적으로 차단전류² x 동작횟수 = 정격차단전류² x 10 이므로 정격 차단전류는 클수록 기기의 수명에 유리하다. 최대 투입전류는 IEC 기준으로 정격차단전류의 2.5배정도로 선정하며, 뇌충격 및 상용주파는 정격전압 24kV에 대한 IEC 56 및 IEC 71 규격의 규정치를 따른다.

4.2 Making Switch

Vacuum Circuit Breaker로 IEC 56에 의한 개발시험에 합격한 제품을 사용한다. 투입개폐 목적의 Making Switch는 상당 개별제어가 가능하며 투입오차가 적은 장점이 있으나 고가이며 (상당 1억 이상) 부피가 커서 본 장치에는 적용이 불가능하므로 3상 일괄제어방식의 VCB로 대체한다. VCB는 투입오차가 비교적 크고 상당 개별제어가 불가능하나 조작제어과정의 숙달과 3상피크전류 투입 기술을 통해 문제의 해결이 가능하다.

4.3 Lead-in Load Breaker Switch

AFG의 인입부는 부하전류개폐, 원격 제어 및 상태감시의 용이성을 위하여 LBS를 사용하되 안전을 위하여 Earthing S/W를 구비한 3-Position 타입을 사용한다.

최대 투입전류는 IEC 기준으로 정격차단전류의 2.5배정도로 선정하며, 뇌충격 및 상용주파는 IEC의 해당 규정치를 따른다.

5. 측정시스템 개요

고장 현상을 분석하기 위해서는 고장발생과 제거 순간의 고장정보를 측정하고 기록할 수 있어야 한다. 이를 위한 AFG의 측정 시스템 구성은 그림 2와 같으며, 보다 정확하고 정밀한 측정을 위해 자체 개발한 측정 프로그램을 사용한다. 기존의 전용 소프트웨어는 역률과 I²t를 계산할 수 없고 DB 구축기능이 없어 결과에 대한 추적성을 제공할 수 없으며 또한 시험 데이터 및 시험환경을 효율적으로 관리할 수 없을 뿐만아니라, 데이터의 전송시간이 길고 보고서 작성기능도 기대하기 어렵다.

LGIS가 자체 개발한 측정 프로그램은 이러한 문제점들을 해결하여 시험의 효율성을 향상시키고 측정변수 계산결과에 대한 신뢰성을 보장할 수 있는 장점이 있다.

5.1 주요 기능

측정 프로그램은 독립된 모듈로 구성되어 있으며, 주요 기능은 다음과 같다.

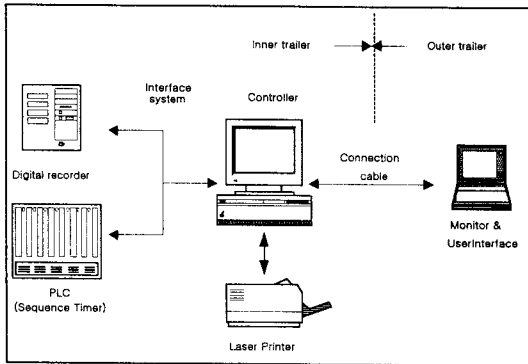
- 1) 시험환경설정 (시험회로, Fault Recorder, Test Engineer, Technical Environments), 결과 전송, 저장 및 User Interface
- 2) 단락 파형 발생: 시험전압, 시험전류, 전류투입위상 및 역률을 입력 변수로 사용하여 회로 저항과 임피던스 값을 계산하고 전압 및 전류 파형을 계산

- 3) 확대 분석기능: 마지막 2점 까지 확대가능하며 직선 보간법을 사용하여 보상
- 4) 변수계산: Frequency, RMS, Power Factor, I^2t , Arc time.
- 5) Automatic Calculation: 보정관련 변수, Test sequence
- 6) DB Construction: 시험결과와 이에 대한 Pursuitability를 제공하기 위해서 시험환경, 데이터, 계산결과들을 해당 디렉토리에 저장

5.2 적용 알고리즘

각종 계산 변수들을 분석하기 위하여 다음과 같은 알고리즘이 사용되었다.

- 1) 신호 시작점 및 종점 계산: 신호의 영점을 계산하기 위해 Least-squared Method를 채용하여 직선접합을 사용
- 2) 극값계산: 임계값을 통과하는 2점을 구하고 이에 대한 Central Point 부근의 극값 추적
- 3) RMS Value: 3-Crest Method를 사용하여 RMS를 측정
- 4) Power Factor Calculation: 직류성분감쇄법에 의한 DC 법 적용

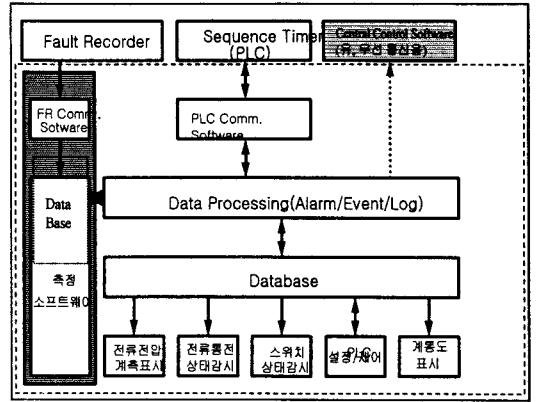


< 그림 2. Construction of Measuring System >

6. 중앙 제어 시스템 및 통신 시스템 개요

중앙 제어 시스템은 AFG의 모든 기기 와 프로그램을 관장하는 부분으로서 각 기기의 실시간 상태감시 와 제어가 가능하며 시스템 구성은 그림 3 과 같다.

통신시스템은 배전자동화 실증시험장의 중앙통제소에서 AFG의 고장 발생정보를 실시간으로 감시할 수 있는 장치로 실증시험장의 전용 통신망을 이용하여 유선 통신이 가능하며, PCS망을 이용하여 무선으로도 상태감시가 가능하도록 구성된다.



< 그림 3. Construction of Main Control System >

7. 결론

이상과 같이 본 논문에서는 인공고장 발생장치의 기능과 구성에 대한 이론적 배경과 검토가 이루어졌다. 앞에서 언급된 바와 같이 본 설비는 일종의 단락설비로서 고장전류의 발생과 제거를 위한 전기적, 기계적인 이론과 경험이 집결되는 첨단 장비이며 설비의 설계 뿐 아니라 제작에 있어서도 고유의 기능 과 함께 안전을 위한 세밀한 디자인이 요구된다. 차기 논문에서는 이러한 관점에 초점을 맞추어 기능적 설계에 대한 검증과 기기 배치 디자인에 대한 최적화 여부 등을 EMT를 사용하여 검토하고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] ANSI, "IEEE Standard Guide for Methods of Power-Factor Measurement for Low-Voltage Inductive Test Circuit"
- [2] "Electrical Transients in Power Systems", second edition, Allen Greenwood, 1991
- [3] IEC 56, "High Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers", 1987
- [4] Short-Circuit Testing Liaison(STL), "Harmonisation of data processing methods for evaluating test quantities between test laboratories", STL Technical Report, 1991
- [5] NEMA AB1, "Determination of short-circuit current, power factor, and recovery voltage", 1993