

## 지중배전선로 무정전 공법의 최적화를 위한 장비 개발

유근양, 주종민, 이용순, \*김영민, \*강내국  
(주)평일 기술연구소, \*한국전력공사

### Development of outage-free installation method and equipments for underground power distribution system

K. Y. YU, J. M. JOO, Y. S. LEE, Y. M. KIM\*, N. K. KANG\*  
PYUNG-IL CO. Ltd. Technology Lab, Korea Electric Power Corporation\*

**Abstract** - Underground distribution system is a trend due to the successive development of metropolitan area and satellite cities and the environment of the commercial and residential areas. The high quality of electricity, which is related with the minimal outage duration time due to the maintenance work for the underground distribution line, is mandatory. Hence, the construction method and tools for the outage-free maintenance construction have been required for underground distribution system.

So far, all the efforts for outage-free maintenance for the underground distribution have been limited only to the survey for foreign countries situation and the theoretical provision; thus, it is required to develop the various construction method and the application tools. Differently from the aerial line, the construction of the underground cable is complicated and the insulation distance between conductor and shield should be maintained in loadmaking/breaking operation, though the apparatus connected with cable is a deadfront type. Also since the apparatus is installed above ground, by-pass of faulted area at busy area needs a variety of high technologies.

Therefore, in this these, the authors introduce the development status of the loadbreak connectors, connection facilities, outage-free maintenance system for secondary side, a secondary auxiliary bushing and additional tools so that there can be more progress on this field.

#### 1. 서 론

지중 배전선로에는 지상 설치형 변압기, 개폐기 등 전력 변환기와 선로 개폐기가 수용가에 전력공급을 수행하고 있다. 이에 따라 관련 기기들이 수용가의 분포에 맞는 적절한 운용은 필수 불가결한 사항이다. 따라서 이들 관련기기의 운용 시 발생하는 문제 즉, 고장이나 노화에 의한 교체, 부하용량 증대에 따른 교체 시에 작업정전이나 수용가에 미치는 영향은 수학적으로 계산하기 어려울 정도로 크며, 수용가에게는 민감한 사안이 되고 있다. 그러므로 작업 정전을 최소화 할 수 있는 대책 마련이 시급한 상태이다. 따라서 지중배전선로에 사용하고 있는 전기기기의 무정전 교체를 위한 공법과 장비의 개발을 수행하게 되었다.

#### 2. 본 론

무정전 작업시 가장 중요한 사항은 지상변압기용 엘보접속재의 load break와 load make 이며, 이를 위해 부하개폐

시 전극간 발생하는 아크에 대한 소화능력을 가진 소화소자와 접속재의 개발, 임시로 송전할 수 있는 by-pass system을 구성하고 관련된 장비의 구축하여야 하는 것이다. 그리고 이를 활용한 지중 배전선로 무정전 작업을 구현함으로써 국내의 배전방식에 따른 여러 가지 공법을 개발하고 그 절차를 체계화 하는 것이 본 기술개발의 목적이며, 이에 관련된 공법 및 장비의 개발을 수행하였다.

##### 2.1 지중 배전방식 및 무정전 공법 개발

무정전 작업의 근본적인 문제의 해결은 지중 배전선로의 배전방식을 체계적으로 분석하여, 이를 통한 기술 기반 아래 공법과 장비의 개발이 이루어져야 한다.

공법의 신뢰성을 높이기 위한 노력으로 해외의 사례를 조사하여 load break와 make에 대한 기술자료를 충분히 분석 검토 하였으며, 부하개폐시 발생될 수 있는 전기적인 현상에 대한 분석도 병행함으로써 관련기술 자료의 축적과 신뢰성 있는 기술개발이 되도록 하였다.

##### 2.1.1 지중 배전선로의 배전방식

배전계통의 특고압측 구성방식은 크게 아래의 2가지 방식으로 나눌 수 있으며, 이중 국내에서 실제 적용되고 있는 배전방식의 내용을 정리하여 무정전 공법을 개발 하는데 이용하였다.

##### ◇ 연계(Loop) 계통방식

- Open 연계 방식
- Closed 연계 방식

##### ◇ 네트워크(Network) 계통방식

- 1차 네트워크 방식
- 스포트 네트워크 방식

##### 2.1.2 해외 사례 조사

무정전 공법 중 가장 중요한 기술은 엘보접속재의 부하개폐운전이며, 이에 대한 전기적·기계적 특성과 운용 방법을 확립하는 것은 무엇보다도 중요한 연구라고 말할 수 있다. 본 기술개발의 기초가 된 해외의 사례는 캐나다의 경우로 지중 배전선로의 엘보접속재 운용에 대한 사례가 있고, 정확한 기준을 가지고 조작자의 충분한 교육을 통해 시행하고 있는 것으로 조사되었다.

캐나다에서는 지상설치형 200A 분기함을 적용하여 변압기에 공급되는 1차측 전력케이블 연결용 엘보접속재를 설치한 접속장치로 방사상 지중계통과 상시 개방연계를 위한 환상(루프) 계통의 개폐하는데 사용하였으며, 국내의 경우와 상이한 점은 변압기와 변압기 사이에 분기함을 두어 엘보접속재 개폐를 선로 중간에서 실시하도록 하고 있다.

##### 2.1.3 환선 개폐시 발생될 수 있는 전기현상 조사

공법의 신뢰성을 높이기 위한 노력으로 부하개폐시 발생될 수 있는 전기적인 현상을 조사하여, 무정전 작업구현에 있어서 개발된 공법에 대한 안전성과 신뢰성을 확인하는 계기가 되도록 하였다.

### 2.1.3.1 변압기의 직렬공진에 의한 과전압 발생

변압기 양단간에 전류가 최대로 되고 과전압이 발생하는 현상으로 전원측 및 변압기측의 중성선이 모두 단선이나 분리되고, 단상 또는 2상이 투입되면 인덕턴스의 변화로 철공진 발생된다. 그러나 위의 두 가지 조건이 동시에 발생하는 경우는 거의 없으므로 철공진이 거의 발생하지 않으며, 다중접지 배전방식은 근본적으로 직렬공진회로를 구성하지 않는 것으로 분석되었다. [전력연구원"배전선 절연설계에 관한연구(II) 발표(1992. 3) 내용 참고]

### 2.1.3.2 커패시터의 개폐

엘보 조작시 접촉자간의 거리가 내전압을 충분히 견딜 때까지 접촉자간에 아크가 발생하며, 엘보 개폐 방식은 접촉자간에 재 발호를 일으키고, 재 발호가 일어나면 재 발호 순간의 전압이 커패시터에 충전되어, 그 순간 전압의 극성이 바뀌고 크기가 증가함에 따라 접촉자간의 전압이 상승되는 현상이다. 지중 배전계통은 75% 이상역률을 갖는 직병렬회로로 구성되어 있어 ANSI/IEEE Std. 386의 개폐시험회로가 이런 조건으로 구성되며, 이런 지중 배전계통에서 양호한 개폐성능을 나타낸다.

### 2.1.3.3 케이블 선로 개폐

무부하 케이블 개폐는 커패시터를 개폐하는 것과 유사하며, 재발호가 발생하면 전하가 케이블에 충전되어 접촉자간 전압이 상승된다. 또 이러한 점은 접촉자간 이격거리가 빠른 속도로 개방된다면 성공적으로 달성되는 것을 실험을 통하여 확인 하였다.

### 2.1.4 무정전 공법

우리나라에 실제 적용되고 있는 배전방식은 지역적 부하의 밀집도에 따라 여러 가지 형태로 적용되고 있다. 이러한 모든 배전방식에 해당하는 공법을 개발하는 것은 현실적으로 어려우며, 이 중에서 가장 일반적으로 적용되며 변압기 전원을 루프화 할 수 있는 방식을 우선적으로 선택하여 가장 안전하게 무정전 작업 구현을 할 수 있도록 하였다.

#### 2.1.4.1 무정전 공법의 개요

무정전 공법은 load breaker 적용공법, by-pass cable 적용 공법, 개폐장치 내장형 지상변압기 설치구간 공법(현재는 적용되고 있지 않음)으로 구분된다. 그림 1은 무정전 공법의 운전 개요를 표현한 다이어그램이다.

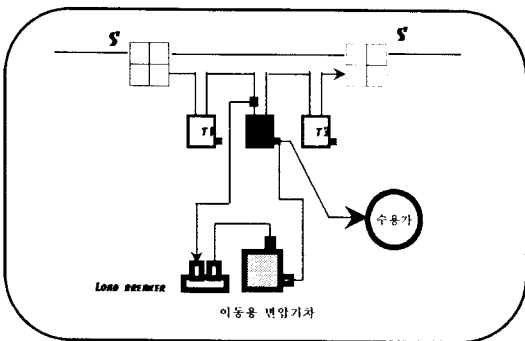


그림 1 무정전 공법 개요 다이어그램

### 2.1.4.2 엘보접속재 고착상태 확인

무정전 교체 공법은 엘보접속재의 활선개폐가 가능한 변압기에 적용되며, 무정전 교체 작업전에 엘보접속재의 고착상태를 확인하는 것은 필수적인 요인이며, 아래의 그림2는 미국에서 적용하고 있는 엘보접속재 고착확인 장치이다.

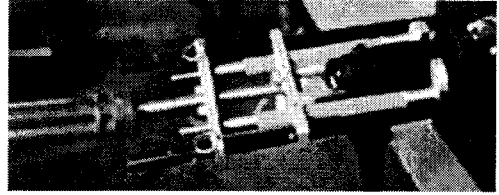


그림 2 엘보접속재 고착상태 확인 사례

### 2.1.4.3 Load breaker 적용공법

변압기 교체를 위해 이동용 변압기차량을 이용하며, 변압기에 연결되었던 전원을 이동용 변압기차에 연결하여 줄으로써 수용가에 전원을 공급하는 방식이다.

이 공법은 Load Breaker 접속장치를 적용하여 활선상태에서 변압기의 엘보접속재를 조작하여 수용가의 전원을 무정전 상태로 공급하고, 교체작업을 수행 할 수 있는 방식으로 본 기술개발의 핵심적인 기술요소가 적용된 방식이다.

### 2.1.4.4 By-pass Cable 적용공법

이 공법은 이동용 변압기차량에 공급되는 전원을 인근의 개폐기 여유단자를 통하여 By-pass 케이블을 이용하는 것으로, 이외의 방법과 장비는 load breaker 적용공법과 같다.

## 2.2 아크소호재료의 개발

본 기술개발의 내용 중에서 소호재료의 역할은 대단히 중요하며, 스위치로서의 역할을 가능케 하는 핵심기술이다. 전기회로의 개폐상태에서 발생하는 아크의 소호와 재발호가 되지 않도록 하는 재료는 전기 접속부에 꼭 필요한 절연물로서, 이를 사용하여 전기 접속부를 보호하게 되면 load make와 load break를 가능하게 한다.

현재 적용되고 있는 지상변압기의 아크소호 기능을 갖는 부상인서트와 엘보접속재는 외국의 재료를 적용하여 제작되고 있어 국내의 수요에 원활하지 못한 것이 현실이었다. 따라서 아크소호재료의 개발은 필수적이기 때문에 개발을 진행하였다.

이러한 재료의 특성 분석을 위하여 내 아크 특성을 ASTM D 495에 따라 시행하여 기존(외국제품) 아크소호특성을 갖는 재료의 특성과 새로 선정된 시료를 비교하여 특성이 우수한 것을 선택하였다. 선정된 개발제품의 시험결과 특성이 아주 우수한 것으로 나타났으며, 아크를 집중적으로 받는 특성에 대해서 매우 안정적인 것으로 판단되었으며, 이 것을 이용하여 소호튜브를 제작하여 시작품제작에 적용하였다.

## 2.3 무정전 장비 설계 및 제작

### 2.3.1 변압기용 정선(1차측 접속장치)

재료의 고위 특성을 파악하여 얻어진 분석내용은 각각의 부속품 제작 시에 필요한 기계적, 전기적 정보로 이용하였으며 각 부속품의 구조적인 설계나 성형시의 부수적인 주위 환경조건들과의 긴밀한 관계에 대하여 기술하였다.

변압기용 정선의 구조적인 설계는 크게 4가지로 전기도체의 접속, 도체방출구조 역할, 분리된 구조의 절연부를 연결해주는 인터페이스, Locking groove의 강도유지 구분하여 각 부분의 역할 및 상호 협조 관계를 토대로 설계가 되었으며, 완성품의 시험결과 및 변압기에 적용된 모습을 아래의 표2와 그림3에 보였다.

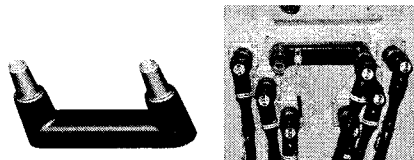


그림 3 완성된 변압기용 정선 및 변압기 설치

표 2 변압기용 정선 특성시험 결과

구분	기준	특성시험 결과	비고
부분방전시험	19 kV / 3pC	26 kV / 0pC	양호
A/C 내전압시험	50 kV / 1분	Withstand	양호
D/C 내전압시험	103 kV / 15분	Withstand	양호
충격 내전압시험	150 BIL	Withstand	양호
개폐시험	26.3kV/200A 10회이상 개폐가능	10회이상 개폐완료	양호

2.3.2 저압측 분리를 위한 접속장치(2차측)

무정전 작업구현을 위해 변압기 2차측(수용가) 부싱을 변압기와 분리하여야 한다. 이러한 방법에는 부싱과 부스바 분리방식(분리형 부싱이 부착된 경우)과 부스바와 저압케이블 분리방식(일체형 부싱이 부착된 경우) 2가지로 분류할 수 있다.

수용가측 단자를 통전된 상태로 교체변압기로부터 분리하기 위해 교체변압기 2차 부싱에 효과적으로 접속할 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 2차측 연결장치를 개발하기 위해 현재 지상변압기에 부착된 2차부싱의 현황을 조사하였다.

현재는 분리형 부싱이 전량 보급되고 있으나 현장에 적용된 전체 변압기의 약 10%정도로 보급량이 아주 적은 상태이며, 90% 정도가 일체형 부싱이 적용된 것으로 파악된다. 따라서 부스바와 저압케이블을 분리하는 방식의 편조선형 2차측 무정전 접속장치의 적용이 많을 것으로 판단된다. 그림 4, 5는 각각의 형상을 보인 것이



그림 4 바이스형 2차측 접속장치(분리형 부싱)

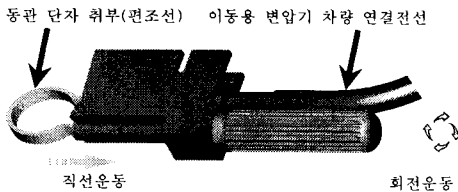


그림 5 편조선형 2차측 접속장치(일체형 부싱)

2.3 엘보접속재 활선 개폐 장치 개발

활선 개폐 장치의 개발 필요성을 요약 정리하면, 현재 변압기용 엘보접속재의 용도가 활선 상태에서 hot stick을 이용하여 접속재의 분리 및 접속을 하는 것이다. 그러나 국내에서는 미숙련자의 작업시 안전사고가 발생한 경험이 있어 활선상태에서 작업자가 직접 분리 및 접속을 수행하는 방법은 안전상의 문제로 시행하지 못하도록 정하고 있다.

따라서 국내에서 지중 배전선로 무정전 공법의 적용이 가능하도록 하기 위해서는 엘보접속재의 개폐 성능을 최대한 유지하는 동시에 작업자의 안전이 보장될 수 있는 엘보접속재 활선 개폐 장치의 개발이 필요하다.

엘보접속재 활선 개폐장치는 구동 메커니즘이 가장 중요하며 현장 전원을 이용한 반자동형으로 설계 제작하였다. 아래의 그림은 개폐부, 조작부, 설치부로 구분된 반

자동형 엘보접속재 활선 개폐장치의 모습을 보였다.



그림 6 엘보접속재 활선 개폐 장치

3. 결 론

지중 배전선로 무정전 공법 및 장비에 대한 기술개발은 현재 국내에서는 처음 시도되는 것으로 공법 및 장비의 제조기술 확보는 국내 전기 접속재의 기술수준을 한층 높이는 계기가 될 것으로 판단된다.

활선작업이 가능한 장비의 적용이 가능한 공법의 개발과 공법의 체계화 연구는 아주 중요한 연구 내용이며, 국내의 지중배전방식을 검토하여 각각의 배전상황에 맞는 공법을 적용할 수 있도록 공법을 개발 하였다.

이러한 기술기반을 토대로 연구개발을 진행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 지중 배전선로 무정전 공법 개발
  - 1) 무정전 공법 상세 절차서 작성
  - 2) 외국의 유사 적용 사례 조사 및 기술자료 수집
  - 3) 지중 배전선로 배전방식 분석에 따른 공법의 체계화
  - 4) 개폐시 발생하는 과도현상 파악과 공법 실효성 조사
2. 무정전 장비 개발
  - 1) 정선 성형용 질연성 / 도전성 폴리머 재료 개발
  - 2) 아크소호 재료 개발(Special Engineering Plastic)
  - 3) 변압기용 정선(부싱인서트) 연구용 시제품 제작
  - 4) 정선 고정대 제작
  - 5) 2차측 무정전 접속장치 연구용 시제품 제작
  - 6) 엘보접속재 활선 개폐 장치 제작

위와 같은 결과를 얻었으며, 기술개발에서 가장 중요한 항목인 현장 적용성을 충분히 검토하고, 지속적인 실증 시험을 통하여 기술개발의 완성도를 한층 더 높여 안전하고, 일반화된 공법을 정립하여 현장 널리 활용할 수 있도록 할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Standard for Separable Insulated Connector Systems for Power Distribution Systems Above 600 V, IEEE Std 386, 1995.
- [2] 김병숙, 조성수, 이수목, A Study on Optimal Configuration of Underground Power Distribution system, 전력연구원 연구과제 최종보고서, 1998.
- [3] 2001년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.1
- [4] 한전장표표준규격 케이블 엘보접속재, PS 147-219-229, 151-962-998.
- [5] 한전장표표준규격 지상설치형 변압기, PS 147-050-167.
- [6] 李準雄, 朴椿培, 新 電氣電子 材料, 東逸出版社, 1991.
- [7] 조성수, 김병숙, 지중배전 설계편람[최종보고서 별책부록], 1999.
- [8] 한국전력공사 배전처, 배전기자재 운영업무 편람, 2000.
- [9] 한국전력공사 배전처, 배전기자재 운전 매뉴얼, 2000.
- [10] Ontario Hydro Technologies, International Electric Research Exchange Workshop on Underground Cable, 1994.
- [11] MR. S. LEINWAND, Municipal Electrical Association Presented to Engineering Conference, "Transformer Station Supply and Operating Parameters" 1990.
- [12] Toronto Hydro, Toronto Hydro Schematic Representation of Distribution System, 1990.