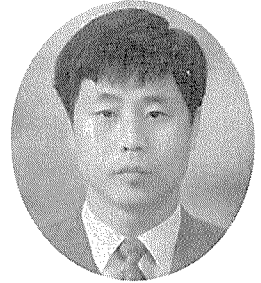


地中 電力케이블의 새로운 高電壓竣工試驗 方案



한 전 전력 연구원
선임연구원 宋 一 根

1. 序 論

地中 電力케이블은 架空配電線路에 비해 편리함과 電力의 安定供給 및 供給信賴度 向上, 都市 環境美化 등의 社會的, 經濟的側面에서 世界的으로 계속 增設되고 있으며, 앞으로도 계속 증가될 전망이다. 국내에도 약 2,000 C-km의 線路가 地中化되어 있으며, 2001년에는 5,012 C-km 정도가 될 것으로 豫測하고 있다. 그러나, 地中 電力케이블은 架空配電線路과는 달리 케이블 시스템에 故障이 發生하면, 고장점 탐지와 維持保守에 상당한 시간이 걸리고 그 波及 效果가 產業經濟 및 國民生活에 막대한 피해를 줄 뿐 아니라, 수용가에 장시간 불편함을 주기도 한다. 그러므로, 電力會社는 케이블 포설후 竣工檢査 및 정기적인 診斷試驗 등을 통해 케이블 시스템의 故障을 최소화하고자 노력하고 있으나, 아직은 최적의 維持保守 方案이 마련되어 있지 않다. 이 중 케이블 포설후 준공검사는 새로 포설된 케이블의 장기 信賴性을 좌우하는 매우 중요한 試驗이다.

現在 사용하고 있는 케이블 竣工檢査로 많이 적

용된 方法은 直流電壓試驗으로, 國內의 경우에도 22.9kV 線路의 경우 46kV에서 10분간 시스템이 견뎌내면 견전하다는 것으로 간주하고 있다. 이와 같은 直流電壓試驗은 종래 절연지 絶緣케이블에 적용되어 缺陷檢出의 信賴性을 인정받은 方法으로 IEC 規格을 포함하여 各國에서 標準試驗方法이 제정될 정도로 잘 적용되어 왔다. 그러나, 高分子 絶緣케이블에 대한 直流電壓試驗에서는, 缺陷檢出의 能力이 낮아 非效率的이며, 高電壓 積류레벨의 사용으로 인해 케이블에 새로운 손상을 입히는 등 케이블의 竣工檢査로는 적합하지 않다는 것이 일반적으로 보고되어 있다. 또한, 상용주파수의 交流電壓試驗은 運轉電壓인 交流를 利用하여 시험한다는 점에서 상당히 效果的이지만, 施設裝備가 매우 커서 현장적용이 매우 어렵고 非經濟的이다.

이러한 문제에 따라, 케이블 시스템의 竣工檢査를 위하여 케이블의 절연층이나 액세서리에 인위적인 缺陷을 만들어 진동파전압시험, 초저주파 전압시험 및 펄스공진시험 등의 여러가지 새로운 方法들이 提示되고 있으며, 交流電壓試驗이나 直流電壓試驗의 결과와 比較하여 試驗結果들에 대한 상호 분석을 통해 제시된 方法의 缺陷檢出能力을

판단하는 研究가 수행되고 있다. 이와 아울러, 개폐충격과 전압, 진동과 전압 및 초저주파 전압을 이용한 部分放電 測定試驗 方法도 같이 研究되어 보다 우수한 케이블의 竣工檢査 및 診斷方法을 도출하려고 努力하고 있다.

이들 케이블 竣工檢査의 代替試驗方法들은 각각 長短點을 지니고 있으며, 아직까지 精確한 缺陷檢出을 위한 試驗條件인 電壓레벨과 認可時間(인가 횟수) 및 호환성에 대해 충분히 信賴性있는 結果가 아직 없음에도 불구하고, 최소한 直流電壓試驗方法과 比較하여 缺陷檢出能力이 뛰어나다는 判斷 아래 일부 外國의 電力會社에서는 진동과전압시험이나 초저주파전압시험을 실시하고 있다.

本 研究에서는 地中 電力케이블의 竣工檢査의 代替試驗方法으로 대두되고 있는 진동과전압시험과 초저주파전압시험에 대해 現在까지 나타난 文獻을 통해 長短點을 比較한 뒤, 실제 22.9kV CN/CV 케이블에 설치한 人工적인 缺陷에 대해 진동과전압시험을 中心으로 시험하여 國內 地中配電系統에의 適合與否를 檢討하였다.

2. 關係 理論

2.1 地中 電力케이블 竣工檢査의 目的

지중 전력케이블의 准공검사에서 是 케이블을 새로 敷設한 후 운전하기 시작한 뒤 대략 5년 이내에 發生될 수 있는 사고를 未然에 防止하기 위한 目的으로, 敷設 직후 케이블에 존재하는 결함을 檢출하게 된다. 따라서, 케이블에 존재하는 모든 결함을 檢출하는 것이 아니라 대략 5년 이내의 사고를 유발시킬 수 있는 크기의 결함을 檢출하는 것이다. 准공검사의 方法으로는 주로 파괴적인 方

법이 적용되고 있다. 즉, 운전전압 보다 높은 과전압을 인가하여 결함이 존재하면 그 결함에서 絶緣 파괴가 일어나도록 하는 전압시험이 주종을 이루며, 그 종류로는 기존의 교류 전압시험과 직류 전압시험이 있고 새로운 方法으로서 진동과 전압시험, 초저주파 전압시험 및 펄스 공진시험 등이 있다. 이외에 비파괴적인 方法으로서 최근 현장 部分방전 측정에 대한 研究가 활발히 이루어져 포설 후 케이블 系統에서 部分방전을 測定하는 方法도 많이 거론되고 있으나, 파괴적인 전압시험과 병행하는 보조적인 수단에 그치고 있다.

이에 반해 케이블의 診斷試驗은 정상적으로 케이블의 장기 運転중에 發生되거나 커진 결함(열화 포함)으로 인해 사고가 發生되는 것을 防止하기 위한 目的으로, 일반적으로 케이블 敷設후 5년 이후부터 시험을 수행하고 있다. 운전중인 케이블이 므로 파괴시험은 수행하지 않고 주로 직류누설전류 測定, $\tan \delta$ 測定, 교류충전전류의 직류성분 測定, 케이블의 충방전전류 測定 및 部分방전 測定 등 비파괴적인 수단으로 診斷試驗이 이루어지고 있으며, 准공검사의 方法과는 상당히 다르게 적용되고 있다.

准공검사에서 아주 작은 결함까지 檢출하는 경우에는 어느 기간 정도는 사용될 수 있는 케이블을 너무 일찍 교체하게 되는 것이고, 곧 경제적 측면과도 결부된다. 뿐만 아니라, 현재의 파괴적인 准공검사 方法을 이용하여 케이블 系統에 존재하는 작은 결함을 檢출할 경우에는 시험전압을 높이거나 시험시간을 늘일 수밖에 없는데, 이러한 경우에는 케이블 系統에 과도한 전기적인 스트레스가 가해져 예기치 못한 새로운 결함이 發生될 수도 있다. 따라서, 准공검사에서 是 케이블 系統에 존재하는 모든 결함을 檢출하기 보다는 주로 5

년 이내에 사고를 유발할 수 있는 적절한 크기의 결함을 검출하는 것이 타당하다.

2.2 既存의 竣工檢査方法

2.2.1 交流電壓試驗 (AC Voltage Test at Power Frequency)

交流電壓試驗에서는 地中 電力케이블선로에 常用周波數를 使用하여 電壓을 인가하므로, 케이블 선로의 운전조건에 가장 근접하기 때문에 선로 시험에 매우 적절하며, 케이블과 같이 정전용량 값이 크거나 인가전압이나 인가시간에 따라 정전용량 값의 변화가 없는 시험 대상물에 대해 적용된다. 또한, 交流電壓試驗은 케이블의 포설길이가 짧은 경우에는 비교적 작은 설비로 高電壓大容量의 시험을 할 수 있으나, 긴 케이블의 경우에는 무겁고 값 비싼 50/60Hz 발전기, 또는 공명시험장치 설비가 필요하게 된다. 예를 들면 0.002nF 정도의 MV 케이블을 시험하기 위해서는 1MVA 변압기가 요구된다.

交流電壓試驗方法으로는 상당한 기간 동안(예를 들면 1주일) U_0 를 인가하는 방법도 있지만, 이 방법의 효용성은 결함의 성질과 크기에 따라 달라진다. 또한, 고전압 전력 케이블의 경우, 교류시험을 위하여 $1.732U_0$ (U_0 : 운전 전압) 정도의 전압을 인가하고, 2차측의 중성점에 접지되지 않은 전력변압기를 사용되어야 하며, 대상 케이블을 정상 작동중인 계통에 연결하는 방법이 적용될 수 있다. 이러한 방법은 케이블의 1상을 접지에 연결하면 다른 두 상은 접지에 대하여 $1.732U_0$ 가 가해지는 상태가 되며, 이 상태로 상당한 기간이 지난 후, 같은 방법으로 접지되는 상을 바꾸어 나가면, 각각의 상은 주어진 기간 동안에 두 번씩 전압이

인가된다. 지금까지 이러한 방법으로 여러 기관에서 1988년 이후 9번의 시험이 시도되었으며 (3번은 50kV 케이블, 6번은 150kV 케이블에 대해 수행), 9번중 5번의 시험 인가시간은 30분이었고, 나머지 4번이 1시간인 것으로 보고되었다. 이러한 시험방법은 주목할 만한 것이지만, 시험 시스템의 구조를 변형해야 하고, 철공진 현상이나 종단부 섬락과 같은 현상이 발생하는 것을 방지하여야 한다. 따라서, 이 시험을 행한 후에도 결함부분에 대한 연속적인 시험이 가능하다. 또한, 시험 대상물이 파괴되더라도 전력 아-크는 진전되지 않으며, 회로의 부하 정전용량이 단락되어 전압이 저하되기 때문에, 이 시험은 케이블단에서 위험한 사고를 유발시키는 전력 아-크가 발생했을 경우에 유용하다.

이와 같은 交流電壓試驗의 방법과 현황을 요약하면 다음과 같다:

- U_0 에서 $4U_0$ 사이의 전압을 사용하며 케이블 선로의 운전조건과 가장 근접하므로 선로 시험에 매우 적합하다.
- 상용주파수에서 상당히 오랜 기간 동안 U_0 를 인가하는 交流電壓試驗方法은 케이블에 내포되어 있는 결함의 성질과 크기에 좌우된다.
- 일부 국가에서는 交流電壓試驗(IEC 840)을 적용하여 $1.7U_0$ 에서 5 분간, 또는 U_0 에서 24시간 등과 같은 시험규정을 제시하고 있다.
- 시험도중 사고로 인한 단락전류는 운전중 계통의 정상적인 단락전류에 비하여 상당히 작기 때문에, 이로 인한 손상은 매우 작다.

상용주파수로 交流電壓試驗을 수행하는 것은 효과적이긴 하지만, 케이블의 포설 길이가 긴 경우에는 케이블의 커패시턴스가 매우 커서 交流試驗裝置가 大容量이 되어 전력 발전기, 또는 공명시

협장치 설비가 필요하므로 가격이 상당히 높으며, 장치가 크고 무거워 현장으로의 이송이 어렵다. 따라서, 케이블 포설 후 준공검사 방법으로는 적합하지 않아, 경제적이고 간편한 새로운 試驗方法이 要求되고 있다.

2.2.2 直流電壓試驗 (DC Voltage Test)

直流電壓試驗은 포설 후에 지중 전력케이블 시스템의 검사방법으로 현재까지 가장 많이 쓰이고, 유용하게 사용되어온 방법이다. 直流電壓試驗方法에 대한 규격도 제시되어 있어, IEC 502(1kV에서 30kV까지의 定格電壓을 갖는 사출 고체절연 전력케이블)와 IEC 840(30kV 이상 150kV까지의 定格電壓을 갖는 사출절연 전력케이블의 시험)에서는 새로운 케이블에 대해 각각 $4U_0$ 와 $3U_0$ 를 15분간 인가하도록 추천하고 있다. 대부분의 국가에서 현장시험으로 IEC 규격을 채택하고 있으나, 대체적으로 인가전압은 케이블 시스템과 사용케이블의 定格電壓에 따라 다르며, 보통 $2.6U_0$ 에서 $8U_0$ 사이에서 전압이 인가되고, 전압인가 시간은 15분에서 30분 사이로 경우에 따라 決定하고 있다. 국내의 경우에도 22.9kV 선로의 경우 46kV에서 10분간 시스템이 견뎌내면 건전하다는 것으로 간주하고 있다. 지금까지 直流電壓試驗方法은 케이블의 길이가 긴 경우에는 交流電壓試驗을 수행하기가 어렵기 때문에 선택의 여지가 없이 적용되어 왔다. 특히 시험장치가 작고 가벼워 현장으로의 이송이 용이하고, 가격이 저렴하다는 장점을 갖고 있다.

그러나, 直流電壓試驗은 10여년 전부터 問題點이 제기되어, 1980년 부터 CIGRE 조사팀이 주관하여 20여개 이상의 제조업체가 참여하여 조사를 시작하였다. 특히 지중전력 케이블의 열화문제가

고려되면, 연구방향 모색에 커다란 어려움을 발생시키므로, 열화되지 않은 케이블을 주로 사용하였다. 이 조사 팀에는 고분자 절연전력케이블을 생산하는 제조업체 외에 최종 현장검사시험을 수행하는 試驗機關이나 電力會社를 참가시켰고, 기업에서 제기되었던 現場經驗과 直流電壓試驗이 케이블에 미치는 악영향 등에 대하여 질문서를 배포하여 조사를 실시하였다. 이러한 조사결과 14개국에서 配電用 케이블에 대한 경험 및 연구결과를 제출하였고, 10여개국에서 50kV 이상의 고전압 케이블에 대한 시험 및 연구결과를 제공하였다. 질문서에 응답한 50kV급 이상의 케이블 포설에 관련된 10개국의 연구결과를 종합하면 다음과 같다 :

- 直流電壓試驗은 $2.6U_0$ 에서 $8U_0$ 까지 15분에서 30분 동안 수행된다.
- $3U_0$ 전압에서 132kV급 케이블에 直流電壓試驗시 전압인가로 인하여 절연이 손상되었고, 상당히 큰 보이드가 이미 형성된 케이블에서 直流電壓試驗시 검출되지 않았으나, 교류 인가시 3일만에 절연이 파괴되었다.
- $4U_0$ 전압에서 110kV~132kV급 케이블에 대한 直流電壓試驗으로 인해 큰 缺陷이 형성되어 있는 것을 알아냈다.
- $4U_0$ 전압에서 EPR 케이블의 直流電壓試驗 결과, 전압인가 초기에 파괴가 발생하여 실험을 계속할 수 없었다.
- 132kV급 시스템의 600taped/vulcanized 종속단 연결에서는 상당히 실패율이 높았으나, 이에 대한 확실한 실패원인을 찾지 못했다.

이와 같이 直流電壓試驗의 問題點이 제기되고 있으며, 이것을 分析하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

① electric stress의 效果:

PE 케이블의 절연층내에서 電界分布에 대한 정확한 메카니즘은 복잡하지만, 대체적으로 정상적인 교류전계는 절연층의 커패시턴스에 의해 좌우되고, 직류전계는 저항율에 의해 결정된다. 따라서, 교류 환경하의 전계는 유전을 변화와 이상물의 존재에 따라 분포되며, 직류 환경하의 전계는 유전체의 저항율과 유전체 내에 존재하는 이상물에 영향받는다고 볼 수 있다. 따라서, 기본적으로 직류 인가시의 전계는 교류 인가시와는 다르게 되며, 直流電壓試驗 수행시 교류 인가시와는 다른 메카니즘으로 절연파괴가 일어날 수 있어 정격 交流電壓인가시에는 발생하지 않을 절연 사고가 이러한 직류 전계로 인해 유발될 수 있게 된다.

② 열화 mechanism의 效果 :

직류와 교류간에 열화 메카니즘은 다르다고 가정된다. 특히, 部分放電 열화에 결부된 결함의 경우에는, 직류에 의한 결함검출은 어렵다고 생각된다. (그림 2.3)에 나타낸 것처럼, 조립형접속재에서 에폭시 절연층과 스트레스콘 사이의 계면에서는 交流와 直流 인가전계 양상이 거의 비슷하다. 그럼에도 불구하고, 결함의 종류에 따라, 직류에서는 큰 결함을 제외하고는 어떤 결함도 검출하기 어렵다. 이것은 열화 메카니즘이 다르기 때문이라 생각된다.

③ 공간전하 效果:

직류를 인가하는 경우에는 절연층에 공간전하가 축적될 것이다. 특히, 보이드와 같은 절연결함을 포함하는 경우, 直流電壓試驗 동안에는 결함이 검출되지 않았지만 直流電壓試驗으로 인해 공간전하

가 축적되고, 이에 따라 시험 후 정상적인 교류 운전시 전계가 국부적으로 변형되고 전기트리가 발생되어 진전될 수 있어, 이로 인해 절연파괴가 일어날 수 있다. 접속재의 경우 이러한 공간전하 효과로 인하여 초기에 절연파괴를 일으킨 사례가 있다.

④ 기타 문제점:

- $4U_0$ 를 인가하는 直流電壓試驗은 교류 U_0 전압을 인가하는 시험보다 케이블 선로의 결함을 검출하는 방법으로는 效果的이지 못하며, 매우 높은 직류전압에 의해 예기치 못한 피해가 발생할 수 있다.
- 고분자절연 케이블의 경우, 매우 높게 인가된 直流電壓에 의하여 시험 초기에 시스템 결함이 발생할 수 있어서, 이렇게 시험 도중에 형성된 결함에 의하여 교류로 장기간 운전중에 수트리가 발생할 수 있다.
- 현장에서 直流電壓試驗중 접속종단부에 발생하는 외부섭락에 의해 진행파(travelling wave)가 발생되어 결국에는 절연체가 손상될 수 있으며, 때로는 여러 가지 결함이 복합적으로 발생될 수 있다.

이상과 같이 直流電壓試驗은 감지되지 않은 결함들에 의해 교류 환경하에서 사고가 일어나거나 直流電壓試驗으로 인해 오히려 결함발생, 또는 열화가 가속되어 교류 운전중 사고가 일어나는 등 실제적으로 여러가지 問題點을 안고 있다. 결론적으로, 直流電壓試驗은 일반적으로 非效果的이고, 심지어 위험하여 선진국에서는 사용을 기피하고 있으며, 다른 시험방법을 개발하고 있다. 이와 같은 대체시험방법이 갖춰야 할 조건은 交流電壓試驗을 수행하는 효과를 갖는 방법으로서, 케이블에

새로운 손상을 주지 않으면서 가능한 낮은 전압에서 검출되어야 하는 결함을 모두 검출해야 한다는 것이다.

2.3 代替 竣工檢査方法

2.3.1 代替 竣工檢査方法의 要件

交流電壓試驗과 直流電壓試驗을 대체할 수 있는 케이블 준공검사 방법으로서 갖추어야 할 조건을 살펴 보면 다음과 같다:

첫째, 대체 시험방법은 운전전압인 상용주파수의 교류를 대신하여 시험하는 것이기 때문에, 交流電壓試驗에서 검출하여야 하는 결함은 모두 검출할 수 있어야 한다.

둘째, 대체 시험방법은 시험으로 인하여 정상적인 케이블에 새로운 손상을 주어서는 안된다.

셋째, 대체 시험방법은 현장으로의 이송이 쉽도록 작고 가벼워야 하며, 작업이 용이해야 하고, 경제적인 것이라야 한다.

본 연구에서는 지금까지 보고되고 있는 대체 시험방법들 중에서 이러한 조건을 만족시키는 방법들에 대해서 고찰하였다.

2.3.2 진동파전압시험 (Oscillating Wave Voltage Test)

상기한 바와 같이 直流電壓試驗과 交流電壓試驗에 문제가 있기 때문에 CIGRE SC 21에서는 1987년에 기초적인 공동시험을 수행하였고, 그 결과 새로운 시험방법으로서 진동파전압시험을 케이블 포설후 준공시험으로 적용할 수 있다는 가능성을 인정하였다. 그 후 진동파시험에 대한 계속적인 연구가 진행되고 있고, 주로 현장의 高電壓케이블에 대한 시험방법으로 개발되고 있다.

진동파전압시험으로 사용되는 기초적인 회로와 이 때 시험 케이블에 가해지는 진동파는 다음 (그림 2.1)과 같다. 直流電源으로부터 요구되는 시험 전압 V_1 에 도달한 후 케이블에 충전된 에너지는 작은 인덕턴스 L 과 공기로 절연된 구갯을 통하여 방전되면서 수 kHz 범위의 高周波電壓을 발생시킨다. 여기서, 진동파전압의 주파수는 1 kHz에서 10kHz 사이로 결정하게 되며, 만일 시험 케이블의 길이가 길어지면 케이블의 양쪽 단말간에 파형이 일치하지 않고 왜곡되어 정현파의 형태가 되지 않는다. 이것은 전압파형이 주파수 성분에 따라 영향받기 때문이므로, 외부 인덕턴스 값의 변화에 따라 비례적으로 시험 주파수를 줄여야 한다. 즉, 1km에서 10kHz 정도였으면 10km에서는 1kHz 정도가 적합하다. 이 때, 진동파의 첫번째 싸이클의 피크값 V_2 는 충전전압 V_1 과 같으며, 주파수는 인덕턴스 L 과 케이블의 커패시턴스 C_2 에 따라 다음과 같이 달라지게 된다.

$$V_2 = V_1$$

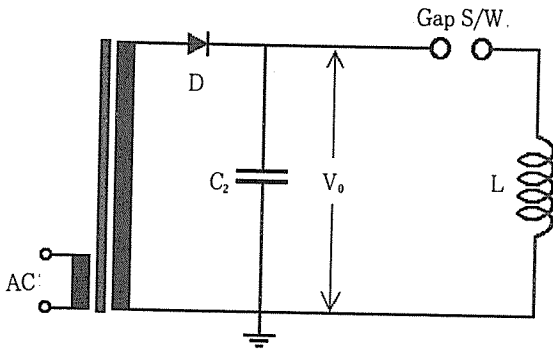
$$f \cong 1 / \left(2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C_2} \right)$$

여기서, 주파수 조절의 효율성을 높이기 위해서 (그림 2.2)와 같이 충전 커패시터 C_1 을 추가로 삽입하는 경우가 있으며, C_1 과 L 의 선택은 시험 대상인 케이블의 커패시턴스 C_2 의 값에 의하여 결정된다. 이 때에도, 진동파의 첫번째 싸이클의 피크값은 충전전압과 같게 되며, 주파수는 다음과 같게 된다.

$$f \cong 1 / \left(2\pi \cdot \sqrt{L \cdot (C_1 + C_2)} \right)$$

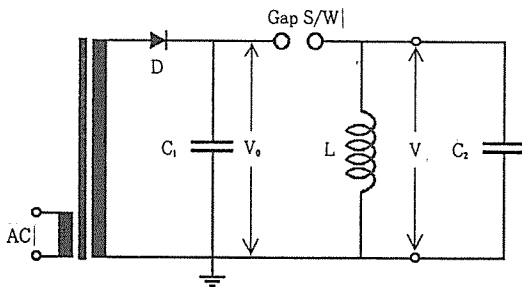
아울러 시험케이블의 저항으로 인한 감쇄효과에 대해서, 보통 10kHz의 시험주파수에서는 1-30 Ω 정도의 회로저항을 갖게 되는데 이것은 용량성

성분에 비해 작은 값이다. 또한, 일반적으로 진동 파시험시 絶緣破壞가 일어나는 시점은 진동파인가 후 3번째 진동 이내에 일어나게 되며, 대체적으로 3번째 진동의 파고치는 진동파의 最大波高值(첫 번째 진동)의 80% 이상이 되도록 설계하게 된다.



C_2 : 시험대상 케이블의 커패시턴스
 L : 인덕턴스

(그림 2.1) 기본적인 진동파전압 발생장치



C_1 : 충전 커패시터
 C_2 : 시험대상 케이블의 커패시턴스
 L : 인덕턴스

(그림 2.2) 충전 커패시터가 추가된 진동파 발생회로

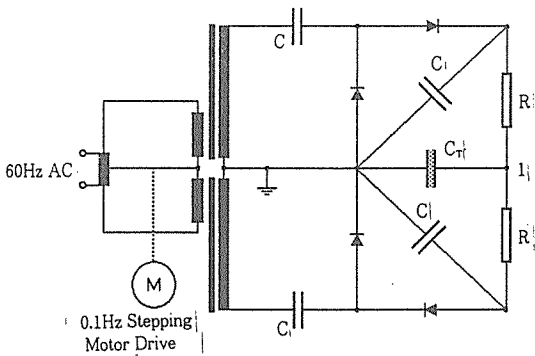
따라서, 감쇄효과는 무시할 수 있으며, 실제적으로 시험오차가 10%를 넘지 않는다. 현재 진동파전압 시험의 조건으로 인가 전압레벨은 $4U_0$, 인가횟수는 50회를 고려하고 있으며, 이러한 시험조건으로 일부 국가에서는 케이블 준공시험을 수행하고는 있으나 아직 공인된 조건은 아니며, 지금도 시험 조건에 대해 논의되고 있다.

2.3.3 초저주파전압시험 (Very Low Frequency (VLF) Voltage Test at 0.1Hz)

주파수가 50Hz에서 0.1Hz로 감소될 때에는 시험설비의 용량을 1/500로 줄일 수 있으므로, 현장에 포설되어 있는 장거리 케이블을 효율적으로 시험할 수 있다. 즉, 실제 운전전압은 교류이므로 交流電壓試驗이 케이블 포설후 준공시험으로 가장 타당한 방법이지만 50/60Hz 交流電壓을 인가하려면 장치의 규모가 상당히 커지므로, 장치의 규모를 줄이기 위한 방법으로 0.1Hz의 초저주파를 사용하는 것이다.

1987년에 CIGRE에서 케이블 포설후 준공검사의 대체방안으로 검토할 당시, 진동파 전압시험과 아울러 초저주파전압시험도 같이 검토되었다. 이때, 초저주파전압시험은 여러 곳에서 시험하였던 연구결과로부터 再現性이 없었기 때문에 CIGRE에서 대체방안으로 채택하지는 않았다. 그러나, 그 이후 계속적으로 초저주파전압시험에 대한 연구가 진행되어 최근 일부 국가의 전력회사에서는 MV급 케이블에 대해 적용하고 있다. 그리고, 이와 같은 케이블 준공검사로의 초저주파전압시험 뿐만 아니라, 케이블에 대한 진단으로, 특히 수트리로 열화된 MV급 케이블에서 전압시험(절연파괴시험), 부분방전측정 및 \tan 측정 등에 초저주파전압을 이용하려는 努力이 계속되고 있다.

(그림 2.3)은 케이블 시험시에 많이 적용되는 초저주파전압발생 회로로, 0.1Hz의 초저주파전압은 변압시킬 수 없기 때문에 저전압측의 50Hz 교류전압을 0.1Hz로 진폭변조함으로써 0.1Hz의 정현파전압이 발생되고 있다. 고전압측에서 이 전압은 두 배로 되고 복조되어 결과적으로 point 1과 접지간에 0.1Hz 정현파전압이 된다.



C_T : 시험대상 케이블의 커패시턴스

(그림 2.3) 정현파 초저주파 고전압 발생을 위한 회로도

2.4 人爲的 缺陷

지중케이블에 대한 준공검사의 대체 시험방법을 연구하기 위해 실험실에서 모의 시험을 할 경우, 케이블이나 액세서리에 인위적인 결함을 만들어 시험하게 된다. 이 인위적인 결함들은 현장에서 자주 발견되는 결함을 모의한 것이며, 高電壓 케이블 자체는 제품출하시 검사되어 나오므로 그다지 결함이 발견되지 않으나, 주로 포설준비나 접속재 설치, 또는 포설중 손상에 의한 결함이 大部分이다.

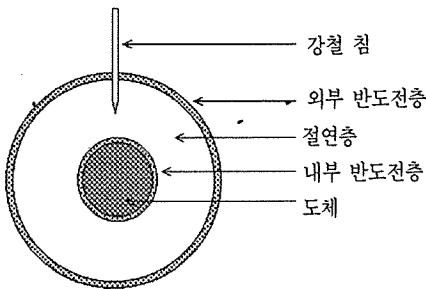
지중 케이블 시스템에서 발견되는 대표적인 결

함의 種類는 케이블 절연층의 침결함, 케이블 단말과 접속부위에서 발생될 수 있는 칼흠집 결함, 그리고 접속부 반도체층의 위치 잘못 등이 있다. 이 중 配電系統인 22.9kV급의 준공검사에서 문제가 될 수 있는 결함은 주로 침결함과 칼흠집 결함이며, 送電 超高電壓系統에서는 상기한 3 가지의 缺陷이 모두 문제로 된다. 이러한 理由는 配電系統의 運轉電壓 정도에서는 같은 크기의 결함이라 할 지라도 전기적 스트레스가 작게 가해지는 반면, 超高電壓의 경우에는 과도한 스트레스가 가해지게 되므로 쉽게 絶緣破壞되어 事故가 발생될 수 있기 때문이다. 접속부 반도체층의 위치 잘못의 경우에는 절연체에 電界分布가 강화되는 edge effect가 나타나는데, HV급에서는 상당히 국부적인 고전계가 가해져 사고의 危險性을 안게 되지만, MV급에서는 전계가 상대적으로 약하기 때문에 절연과피에는 오랜 시간이 걸리게 된다. 또한, 大部分의 경우 접속부 반도체층의 위치 잘못일 때에는 약간의 공극이 존재하는 경우가 많은데, 일반적으로 접속재 설치 초기에는 작업시에 사용되는 실리콘이 공극에 채워지게 되지만 장기간 사용할 때에는 실리콘이 증발되어 공극으로 존재하기 때문에 部分放電이 발생되어 절연과피에 이르게 된다. 이러한 두 가지 이유로 인해 MV급 케이블의 준공검사에서 접속부 반도체층의 위치 잘못을 검출하기 어렵게 된다.

이상과 같은 관점에서 국내 配電系統에 적용되는 22.9kV CN/CV 케이블의 준공검사를 다룰 경우에는 침결함과 칼흠집결함을 검출하여야 할 결함의 종류로 볼 수 있으며, 이에 대한 시험을 통해 준공검사의 시험조건을 결정하여야 한다. 이 중, 침 결함은 절연층내에 존재하는 도전성 이물질이나 케이블 반도체층으로 부터의 도전성 돌기 등을

모델링 한 것으로 경우에 따라서는 열화된 케이블의 수트리로도 모델링되는 것으로, 대표적인 결함이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 (그림 2.4)와 같은 침결함을 기준으로 시험하여 준공검사의 대체방안으로써 진동파 전압시험의 妥當性을 檢討하였다. 사용한 침결함으로는 케이블 절연층(22.9kV CN/CV 전력케이블의 절연 두께 7.4mm)에 곡률반경 10m의 스텐레스 침을 본 연구에서 제작한 침결함 제조장치를 利用하여 외부반도전층 쪽에서 삽입한 것으로 전압인가시 침을 접지시켜 시험하였다.



(그림 2.4) 인위적인 침 결함

2.5 진동파전압시험과 초저주파전압시험의 比較

진동파전압시험과 초저주파전압시험은 竣工試驗의 확실한 대체방안으로 인정되고 있다. 따라서, 이 두 가지 시험방법에 대해 수행한 비교실험 결과를 토대로 각각의 장단점을 검토하고자 한다.

2.5.1 시료에 대한 실험 비교

포설후의 CV 케이블선로(접속부 포함)는 가교 폴리에틸렌(케이블 절연체, 접속부의 보강절연체

로 사용), 고무(접속부의 전계완화재료, 절연체로 사용) 및 에폭시(개스절연 종단접속재료로 사용) 등과 같은 절연재료의 복합체로 구성되어 있으므로, 고무-XLPE 계면 및 고무-에폭시 계면 등의 계면에서의 결함과 케이블의 절연체 내의 도전성 및 절연성 이물질, 절연층 내로의 반도체성 돌기 및 케이블 절연층 위의 외상에 의한 보이드가 결함(칼흠집)이 존재할 수 있다.

이러한 모델 시료를 이용하여 진동파, 초저주파 전압에 의한 결함 검출능력을 평가하였다. 이 때, 각 전압의 인가조건은 조건은 다음과 같다:

- 진동파전압인가 조건: 5kV/1회 인가후 5kV/1회 승압(스텝 시험)
- 초저주파전압인가 조건: 5kV/10분 인가후 5kV/10분 승압(스텝 시험)

이와 같은 시험결과를 분석하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 진동파 및 초저주파 전압인가시의 缺陷檢出能力的 特徵

- ① 진동파전압은 고무-XLPE 계면결함 및 고무-에폭시 계면결함에 대해서 검출능력이 뛰어나다.
- ② 초저주파전압은 대체로 진동파전압보다 결함 검출전압이 약간 높았다. 단, XLPE 절연체와 관련된 결함에 대해서 검출능력은 진동파전압에 비해 우수하다. 이에 반해, 계면상의 결함, 특히 고무-XLPE 계면 결함에 대해서는 검출능력이 낮다.

(2) 트리 발생, 진전과 인가전압파형의 관계

전기트리의 발생, 진전에 대한 인가전압파형의 영향에 대해서는 다음과 같이 사항이 보고되어 있다.

- 주파수가 높으면 전기트리의 발생이 쉽다.
- 전압파형의 시간변화(dV/dt)가 크면 전기트리의 발생이 쉽다.
- 결함부위 주변에 공간전하가 축적되어, 극성반전이 일어나면 전기트리의 발생이 쉽다.
- 전압파형의 시간변화(dV/dt)가 크면 전기트리의 진전이 쉽다.
- 동일 주파수에서는 전압인가시간이 길면 트리는 진전된다.

이상의 특징을 3종류의 전압에 대해 분석한 결과를 <표 2.2>에 나타내었다.

<표 2.2> 각종 전압파형과 트리 발생, 진전과의 관계

	dV/dt	극성반전	인가시간	트리발생	트리진전
진동파	크다	있음	짧다	○	△
초저주파	작다	있음	길다	△	○

(3) 인가 전압파형과 파괴 메카니즘

- ① 초저주파전압의 경우, 저전압부터 보이드 방전이 연속적으로 발생되지만, 주파수가 낮아 dV/dt가 작기 때문에 전기트리로의 전환은 늦어진다. 한편, 진동파전압의 경우에는 dV/dt가 큰 단발파형이므로, 임펄스 파괴과정으로 보고되고 있기 때문에, 보이드 방전에서의 전하가 보이드 끝 부분으로 집중하여 극성반전시의 전계강화에 의해 저전압에서 전기트리로 전환되어 파괴되는 것이다.
- ② 초저주파전압의 전기트리 발생능력은 작지만, 일단 트리가 발생되면 인가시간이 길기 때문에 그 진전속도는 빠르고 비교적 저전압에서 파괴에 이른다. 한편, 진동파전압은 트리발생전압은 낮지만, 1회당 마다의 트리진전은 작기 때

문에, 파괴에 이르기까지에는 전압 스텝의 수가 많이 필요하고, 파괴전압이 높아지게 된다. 이상과 같은 실험결과를 고찰해 보면, 초저주파 전압 보다는 진동파전압이 인가된 경우에 전기트리의 개시가 쉽고, 일단 전기트리가 발생된 경우에는 초저주파전압에서의 트리진전이 빠르다는 것을 알 수 있다.

그러나 이 실험에서는 진동파전압의 인가방법을 각 전압당 1회로 하였기 때문에 보다 높은 전압에서 절연파괴가 이루어지게 된다. 일반적으로, 진동파전압 시험시에는 한 전압레벨에서 2-100회의 진동파를 인가하고 있으며, 50회의 시험이 주종을 이루고 있다. 이 실험에서도 언급한 바와 같이 진동파전압 인가시에는 전기트리가 발생되기 쉽지만, 짧은 시간 동안 전압이 인가되므로 전기트리가 충분히 진전되지 못한다. 그러나 50회 정도를 인가할 때에는 이 실험에서 밝힌 파괴전압보다 낮은 전압에서 절연파괴가 일어나리라 생각된다.

2.5.2 케이블에 대한 比較 實驗

고분자 절연 MV 케이블의 현장시험에 대한 信賴性 측면에 있어서 진동파전압과 초저주파 전압을 이용한 대체시험전압 들에 대한 비교로서, 현장에서 운전경험이 있는 6/10kV XLPE 케이블과 인위적인 결함을 갖고 있는 XLPE 케이블에 대하여 절연파괴시험과 전압시험을 위주로 비교를 수행하고자 하였으며, 케이블 절연층에 침이 삽입된 결함에 대한 부분방전 개시전압을 비교하였다. 아울러 참고로서 교류전압시험과 직류전압시험을 병행하여 비교하였다. 이 때, 인가 전압은 다음과 같다.

- 진동파전압: $4U_0/50$ 회

- 정현파초저주파 0.1Hz 전압: $3U_0/30$ 분
- 교류 50Hz 전압: $2U_0/30$ 분
(VDE 0298 Part 2)
- 직류전압: $6-8U_0/30$ 분 (VDE 0298 Part 1)

또한, 시험대상에 대한 각종 전압에서의 破壞電壓을 알아보기 위하여 스텝 시험도 수행되었으며, 케이블의 결함에서 각종 전압에 따른 部分放電開始電壓을 측정하는 시험도 이루어졌다.

여러가지 現場 시험전압의 種類를 비교할 때, 심하게 수트리 열화된 케이블을 검출하는 능력은 특히 관심사가 된다. 나아가, 혼합된 형태의 케이블에서 절연지 절연케이블의 손상을 검출하는 것 만큼 새로 포설된 XLPE 케이블의 포설불량에 의한 손상을 검출하는 것이 要求된다. 따라서, 다음 시험대상에 대한 시험이 수행되었다:

- 운전 경험이 있고 수트리 열화된 XLPE 케이블: 14일 동안 물 속에 저장, 6m 케이블
- 인위적인 결함이 있는 XLPE 케이블: 30분 간의 $2U_0$ 50Hz 교류전압 인가시 파괴되는 정도의 결함
- 침 결함을 갖는 XLPE 케이블 절연층의 슬라이스: XLPE 케이블의 절연층을 잘라 침을 삽입한 모델(침단 곡률반경 5m, 갭 거리(잔여 절연두께) 1.4mm)

이러한 일련의 실험에 대한 結果와 檢討는 다음과 같다.

1) 운전중 열화된 XLPE 케이블에 대한 조사

수트리 열화된 케이블의 열화상황을 把握하기 위하여 추가적인 調査가 수행되었으며, 그 결과는 절연파괴시험의 결과를 보다 적절하게 解析하는데 이용하였다. 또한, 잔여 절연파괴강도와 수트리의 길이와의 가능한 相關關係에 대해 정립하고자 하

였다. 이러한 추가적인 시험은 절연체의 수분함량(500-1,000ppm)뿐 아니라, 내부 반도체층에서의 vented tree(최대 길이 2.5mm)를 파악할 수 있었다. 그러나, 모든 방전 채널에서 수트리가 발견되지는 않았기 때문에, 외부 반도체층에서 시작된 것 보다 가늘지만 긴 수트리의 존재를 배제할 수는 없었다. 케이블의 전체 길이에 따라서 비슷한 길이의 vented tree가 관찰되었으므로, 이 케이블은 분명히 균일하게 수트리가 열화되었다고 볼 수 있다. 이것은 시험 케이블이 비교적 균일하여 열화되었다는 것을 의미한다. 즉, 여러 시험전압들로 시험한 결과가 서로 비교할 수 있다는 것을 말해준다.

그러나, 유전정점(tan) 측정과 용량성전류의 직류성분을 측정하는 소위 수트리 검출장치를 이용한 측정에서는 새 케이블에서와 다른 결과를 나타내지 않았다. 즉, 이러한 측정들에서는 수트리가 열화되었다는 것을 나타내지 못했다.

상기한 바와 같은 試驗條件을 인가한 전압시험을 수행하였을 때 어떠한 경우에도 절연파괴가 일어나지는 않았다. 이것은 어떤 종류의 전압을 막론하고 현재 논의되고 있는 시험전압 레벨을 현장 시험에 적용할 때 운전중 열화되어 심하게 수트리 열화된 XLPE 케이블이 검출되지 않는다는 것을 의미한다.

아울러, 상기한 시험조건에 따른 전압시험에 의해 케이블에 새로운 손상이 가해지는지를 확인하기 위해, 전압시험을 거친 샘플을 50Hz 교류전압 스텝-시험으로 조사하였다. 그 결과로서, 모든 50Hz 절연파괴 값은 사전에 전압시험으로 전기적인 스트레스를 받지 않은 샘플의 50Hz 잔여 절연파괴강도와 유사하게 나타났다. 확실히, 이 조사에서는 여러 전압시험들에 의한 새로운 손상은 없었다.

참고로, 운전중 열화된 즉, 수트리가 발생된 XLPE 케이블에 대한 실험결과로서 각 전압 인가 시 잔여 절연과괴강도의 공칭값은 다음과 같다.

- 진동파전압시험:약 11U₀,
- 초저주파전압시험:약 11U₀,
- 50Hz 교류전압시험:7.4U₀,
- 직류전압시험:14U₀에서도 절연과괴되지 않음

2) 인위적 缺陷을 갖는 XLPE 케이블에 대한 조사

불량포설을 모의하기 위해, 심각한 인위적인 결함으로 침을 사용하여 짧은 XLPE 케이블의 절연층에 삽입하였다. 이 인위적인 결함은 50Hz AC 전압을 2U₀/30분 인가하였을 때 재현성있게 絶緣破壞되는 것이다. 이 경우에 수행된 전압시험은 이러한 결함이 현재 논의되고 있는 시험 전압레벨

과 인가시간에서 검출되는가를 알기 위한 것이다.

여러 시험전압 뿐 아니라 사용된 전압레벨과 인가시간의 결과를 <표 2.3>에 요약하였다. 진동파 전압과 초저주파전압 모두 이러한 결함을 검출한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러나 대조적으로, 8U₀의 직류전압시험은 이 결함에서 절연과괴를 일으키는데 실패하였다. 12U₀/30분의 직류전압시험에서만 6개 샘플중 하나가 파괴되었다. 따라서, 직류전압은 압출 케이블에서는 심각한 결함조차 검출하지 못한다는 것을 보여주고 있다. 결과적으로, 이 조사로부터, PE/XLPE 케이블에 있어서 이러한 종류의 심각한 결함(절연두께를 0.8mm 남기고 절연층에 삽입된 침)은 현재 논의되고 있는 대체 시험전압의 레벨과 인가시간을 적용할 때 검출 가능하다는 것을 알 수 있다.

<표 2.3> 인위적인 결함을 갖는 10kV XLPE 케이블에 인가된 여러 전압시험의 결과

시험전압의 종류	전압 레벨	인가 시간	샘플의 수	절연과괴된 수
진 동 파 전 압	4U ₀	50회	5	5
초 저 주 파 전 압	3U ₀	30분	5	5
50Hz 교 류 전 압	2U ₀	30분	10	10
직 류 전 압	8U ₀	30분	6	0

3) 침 결함을 갖는 XLPE 케이블 절연층의 슬라이스

전기트리 개시전압 및 트리진전율은 적절한 시험전압레벨과 인가시간을 결정하는데 중요한 부분이다. 그러나, 앞에서 언급한 바와 같이 部分放電으로 전기트리를 측정하는 것은 50Hz AC로만 가능하다. 전기적인 부분방전 측정의 어려움을 피하기 위하여, 침 결함에서 트리개시와 진전율을 육

안으로 觀察할 수 있도록 되어 있다.

현장시험에서 부분방전 개시전압을 알기 위하여, 침 결함(침단 곡률반경 5m, 갭 거리 1.4mm)을 갖는 10kV XLPE 케이블 절연층(10mm 두께)의 슬라이스 10개를 여러 시험전압으로 조사하였다. 부분방전 개시전압레벨은 스텝-시험(0.5U₀/min, 0.5U₀/8 shots)을 수행하여 산출하였다. 부분방전 개시전압레벨에 있어서 진동파전압이 초저주파전압보다 더 민감한 것으로 나타났다.

즉, 진동파전압에서 전기트리의 발생이 더 용이하였다.

한편, 현재 논의되고 있는 전압레벨로 여러 시험전압 인가시의 트리 진전율을 알기 위하여, 부분방전이 이미 발생되어 있는 10kV XLPE 절연층의 슬라이스에서 침 결함을 조사하였다. 약 120m 정도의 길이로 진전된 전기트리를 재현성있게 만들기 위해 모든 시편에 50Hz AC의 prestress를 인가하였다. 그 뒤에 논의되고 있는 전압들을 인가하여 파괴까지의 시간을 측정하였다. 트리가 진전되기 시작하는 부위에서 내부반도전층까지의 갭 거리를 절연파괴시간으로 나누어(또는 파괴까지의 shot 횟수) 트리 진전율을 구하였다. 그 결과 초저주파 전압($3U_0$)에서 트리진전율이 50Hz 교류 전압($2U_0$)에서 보다 크게 관측되었다. 진동파전압은 임펄스와 같은 전압 파형으로 인해, 다른 종류의 전압과의 직접적인 비교는 불가능하였다.

2.5.3 진동파전압과 초저주파전압의 비교검토 결론

전압시험으로서 진동파전압과 초저주파전압을 비교 검토한 결과 아직까지 어느 전압이 케이블의 결함을 검출하는데 가장 좋은 방법이라는 결론은 얻지 못하였다. 이 두 가지의 전압은 각각 長短點을 지니고 있기 때문에 일부에서는 두 가지를 병행하여 시험하는 방법도 추천하고 있다. 지금까지 보고된 研究結果를 검토하면 다음과 같이 要約될 수 있다:

- ① 케이블 시스템의 결함을 모델링한 시험에서 진동파전압은 교류전압과의 파괴전압비가 비교적 일정하게 나타났지만, 초저주파전압과 교류전압과의 파괴전압비는 일부 결함을 제

외하고는 직류전압과 진동파전압의 중간정도로 나타났다. 따라서 결함의 종류에 따라 검출능력이 다르다.

- ② 진동파전압은 결함에서 부분방전을 발생시키는데 유리하며, 초저주파전압은 이미 발생된 전기트리를 빨리 진전시키는데 더 유효하다.

3. 진동파전압을 이용한 결함검출 시험

3.1 대체 시험방법의 決定

진술한 여러가지 대체 시험방법중 국내의 22.9kV CN/CV 케이블에 대해 가장 적합한 방법을 결정하기 위하여, 대체 시험방법이 갖춰야 할 條件을 기준으로 檢討하였다.

이러한 조건을 만족시키는 대체시험방법은 진동파전압과 초저주파전압 모두 적절한 것이지만, 본 研究에서는 새 케이블 시스템의 결함을 檢出한다는 側面에서 진동파전압시험 방법으로 결정하였다. 물론 초저주파전압시험도 상당히 효용성있는 방법이지만, 새로 포설한 케이블의 결함을 검출하는 데에는 초저주파전압 보다는 진동파전압의 검출능력이 더 優秀하다고 判斷된다. 즉, 교류전압시험에서 검출되는 정도의 결함이 케이블에 존재할 때, 絶緣破壞로 이러한 결함을 검출하는 과정에는 반드시 部分放電이나 전기트리가 發生하게 된다. 초저주파전압 보다는 진동파전압이 이러한 결함에서 部分放電이나 전기트리를 발생시키는 데 적합하며, 초저주파전압은 일단 전기트리가 발생되어 있으면 트리의 진전을 빠르게 하여 빨리 파괴에 도달시킨다는 長點을 가지고 있다. 새 케이블에서는 전기트리가 존재하지 않을 것이므로, 새 케이블의 준공검사방법으로는 결함에서 전기트리를 빨리 발생시킬 수 있

는 진동과전압시험으로 決定하였다.

3.2 基準缺陷 決定

2.4의 인위적인 결함에서 언급한 바와 같이 配電用 地中케이블에 적용할 수 있는 결함은 침 결함이며, 새로운 준공검사 방법은 이러한 결함을 검출할 수 있어야 한다. 하지만, 어느 정도 크기의 결함을 검출하여야 하는가 하는 問題點이 있다. 즉, 작은 크기의 결함을 포함하는 모든 크기의 결함을 검출해야하는 것이 아니라, 케이블 포설후 운전 초기에 사고를 유발시킬 수 있는 정도의 크기를 갖는 결함만을 검출할 必要가 있으며, 이것은 곧 經濟性과도 직결되는 문제이다. 따라서, 적절한 크기의 기준결함을 결정할 必要가 있다.

3.2.1 기준 시험으로서 교류전압시험의 妥當性

일반적으로 준공검사의 대체시험방법은 교류전압시험을 대체하는 것을 意味한다. 전술한 바와 같이 케이블 시스템의 운전전압이 상용주파수의 교류전압이므로, 교류전압시험을 수행하는 것이 가장 타당하지만, 케이블이 긴 경우에는 케이블의 커패시턴스가 커서 대용량의 교류전압 발생장치가 필요로 된다. 이에 따라, 經濟性, 裝置의 移送 및 試驗準備 등의 문제가 있기 때문에 보다 간편하고 경제적인 방법을 찾는 것이다.

따라서, 대체 준공검사방법의 시험조건을 결정하기 위한 인위적인 결함의 크기 즉, 검출하여야 할 결함의 크기는 적절한 교류전압시험을 통해 결정할 수 있다.

3.2.2 교류전압시험의 시험조건

일반적으로 준공검사로써 교류전압시험을 수행

할 경우 시험조건으로는 U_0 로서 24시간에서 일주일 정도, $1.7U_0$ 로서 1시간, $2U_0$ 로서 30분 및 $2.5U_0$ 로서 10분 또는 15분 등의 시험조건이 提示되고 있다.

이 중 U_0 를 이용하는 교류전압시험은 일반적으로 效果가 작은 것으로 알려져 있으며, 1990년 CIGRE 21-09 보고의 결론을 인용하면 다음과 같다: “ $2U_0$ 에서 $3U_0$ 정도의 전압레벨로 교류전압시험을 수행하는 것이 가장 信賴性있는 결과를 얻을 수 있다. U_0 의 교류전압을 1주일간 인가하는 방법은 확실히 너무 약하고 더 높은 전압레벨로 보다 짧은 시간 동안 교류전압시험을 수행할 때 검출되는 결함을 검출하지 못할 수도 있다.” 따라서, 각 국에서는 U_0 교류전압시험은 포설후 계통 이전에 시험운전 정도로 이용할 뿐이지 준공시험으로는 거의 적용하지 않고 있다.

$1.7U_0$ 로서 1시간의 시험조건은 地絡事故로 인해 케이블이 장시간 $1.7U_0$ 로 운전될 수 있다는 실제 운전조건을 적용한 것이다. 일반적으로 비접지선로망의 경우에 1상의 지락사고의 설계값은 연속 최대 8시간 동안 연간 100시간 동안 허용되도록 되어 있다. 케이블이 긴 경우 공진시험장치 등을 이용하여 시험장치를 줄일 수 있으나, 이 방법도 한계가 있으며 가격이 상당히 높기 때문에, 자체의 전원을 이용하는 방법이 있다. 그러나 이 경우에는 케이블의 절연과피시에 일어나는 찌어지를 대비하여 빠른 응답특성을 갖는 차단기를 설치해야 하는 문제가 있다.

$2U_0$ 또는 $2.5U_0$ 의 시험전압을 이용하는 방법은 대체로 케이블과 액세서리에서 스트레스 설계값을 고려하여 결정한 것으로, 보통 $2.5U_0$ 보다 낮은 레벨로 준공검사를 수행하게 된다. 인가시간에 대해서는 $2U_0$ 로서 30분의 시험결과나 $2.5U_0$ 로서

10분 또는 15분에서의 시험결과가 유사하게 나타나기 때문에 시험시간을 결정할 것이다.

이상과 같은 교류전압시험 조건중 현재 가장 많이 적용되고 있는 것은 초고압에서는 “2.5U₀, 10분 또는 15분”의 조건을, 배전계통에서는 “2U₀, 30분”의 조건을 적용하고 있다. 이상과 같은 검토에 따라 본 연구에서는 대체 준공검사방법의 시험조건을 결정하기 위한 검출하여야할 결함의 크기를 “2U₀, 30분”의 교류전압시험을 통해 결정하고자 한다.

3.2.3 缺陷에 대한 교류전압시험 結果

전 절에서 언급한 바와 같이 인위적인 침 결함에 대해 어느 정도 깊이의 침 결함을 준공검사시

에 검출하여야 하는가를 결정하기 위하여, 60Hz 2U₀, 30분의 시험조건으로 교류전압시험을 수행하였다. 전압을 인가할 때 침은 접지시켜 시험하였다.

(그림 2.4)와 같은 침 결함으로 여러 깊이로 삽입된 침결함 시료를 3개씩 별도로 제작하고, 이에 대해 각각 2U₀/30min의 조건으로 교류전압시험을 수행하여 절연파괴되는지 확인하였다. 그 결과 <표 3.1>에 나타난 바와 같이 4.0mm 까지의 침 결함에서는 절연파괴가 일어나지 않았으나, 4.5mm의 침결함에서는 3개의 시료 모두에서 절연파괴가 발생되었다. 따라서, 침결함에 대한 교류전압시험을 통해 준공검사에서 “침 결함의 기준 크기는 4.5mm”인 것으로 결정할 수 있었다.

<표 3.1> 여러 깊이로 제작한 침결함 케이블 시료의 교류 전압시험 결과

침결함의 깊이	인 가 조 건	절연파괴 결과
3.0mm	60Hz AC 2U ₀ /30min	3시료 모두 절연파괴 안 됨
3.5mm	60Hz AC 2U ₀ /30min	3시료 모두 절연파괴 안 됨
4.0mm	60Hz AC 2U ₀ /30min	3시료 모두 절연파괴 안 됨
4.5mm	60Hz AC 2U ₀ /30min	3시료 모두 절연파괴 됨 (각각 13분 57초, 21분 9초, 26분 38초 만에 절연파괴 발생)

3.3 기준결함에 대한 진동파전압시험 결과

2U₀/30분의 교류전압시험에서 절연파괴되는 4.5mm 침 결함에 대해 충전전압을 변화시키면서 진동파전압시험을 수행한 결과를 <표 3.2>에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이, 4.5mm 침 결함을 검출하기 위한 가장 적합한 시험조건으로

는 ‘55kV/50회’ 정도였다. 이러한 시험조건은 외국에서 추천하고 있는 배전계통에 대한 진동파전압시험의 조건인 ‘4U₀/50회’와 같은 결과이다.

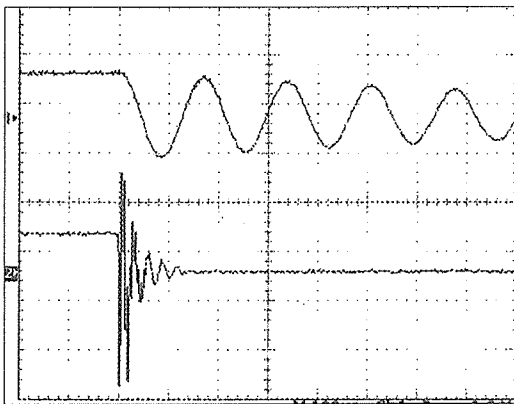
(그림 3.1)과 (그림 3.2)에 진동파전압 인가시 첫 번째의 정상적인 파형과 여러 회의 진동파전압 인가로 절연파괴 될 때의 전압파형은 동일하게 나타내었다. CH.1으로 윗 부분에 나타낸 파형은 첫 번째의 정상적인 진동파전압 波形이며, CH.2로

아랫 부분에 나타낸 波形은 絶緣破壞時의 파형이다. (그림 3.1)은 직류 충전전압 45kV로 시험하다가 130회째 충전하는 동안 즉, 직류로 승압하는 과정에서 절연파괴된 경우이고, (그림 3.2)는 55kV의 충전전압으로 17회째에 직류전압이 진동파로 전환되면서 가장 낮은 음의 피크 부분에서

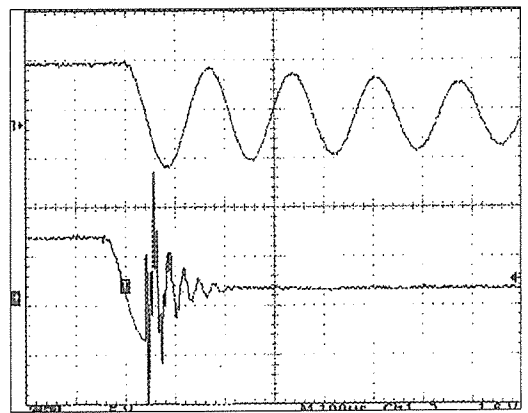
절연파괴된 경우이다. (그림 3.1)과 (그림 3.2)의 경우 모두, 첫 번째 정상적인 진동파 전압파형은 같게 나타났으며, 초기에 55kV의 직류전압이 진동파전압으로 발생하는 과정이 잘 나타나 있다. 이 때 진동파의 周波數는 5.9kHz로 나타났다. 絶緣破壞가 일어나는 시점에 대해서, 낮은 전압

(표 3.2) 4.5mm 침 결함에 대한 진동파전압시험 결과

충전 전압	시험대상 시료수	절연파괴된 수	인가 회수 및 특이사항
40kV	2	0	150회 인가시 절연파괴 되지 않고 전기트리만 발생
45kV	3	3	73회, 130회, 149회 인가시 승압도중 절연파괴
50kV	3	3	58회, 64회, 72회 인가시 진동파 음의 피크에서 절연파괴
55kV	5	5	17회~28회 인가시 진동파 음의 피크에서 절연파괴



(그림 3.1) 승압중 절연파괴된 경우의 전압파형
(충전전압 45kV, 130회 승압시 절연파괴)



(그림 3.2) 음의 피크에서 절연파괴된 경우의 전압파형
(충전전압 55kV, 17회에서 절연파괴)

으로 시험할 때에는 (그림 3.1)과 같이 직류로 승압하는 과정에서 절연파괴되는 경우가 많았으나, 전압이 높은 경우에는 (그림 3.2)와 같이 직류 전압이 진동파로 전환되면서 가장 낮은 음의 피크

부분에서 절연파괴 되었다. 전압이 낮을 때에는 많은 진동파 전압인가 횟수로 인해 계속적으로 전기트리가 진전되지만, 전압이 낮아 진전속도(1회 당 전기트리 진전거리)가 느리기 때문에 직류전압

으로도 절연과괴가 일어날 만큼의 절연두께까지도 절연과괴되지 않고 진전될 수 있다고 생각된다. 그러나 전압이 높을 때에는 진동과 1회 인가시의 전기트리 진전이 크기 때문에 주로 진동과전압이 인가되면서 절연과괴가 일어나며, 충전전압이 높은 만큼 충전시 케이블 절연층에의 空間電荷 蓄積 효과가 크기 때문에 극성이 반대인 음의 피크 부위에서 절연과괴가 일어난다고 생각된다.

4. 結 論

本 研究에서는 地中 電力케이블의 竣工檢査의 代替 試驗方法에 대해 檢討하기 위하여, 既存의 試驗方法 問題點과 代替 試驗方法의 長短點을 調査하였고, 실제 22.9kV CN/CV 케이블을 대상으로 인위적인 缺陷에 대해 진동과전압시험을 修行하여 이 方法이 國內 地中配電系統에 適合한가를 檢討하여, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 交流電壓試驗은 케이블 缺陷檢出에 가장 效果의이지만 試驗裝置가 大容量이 되어 現場適

用이 어렵고 價格이 비싸며, 直流電壓試驗은 試驗裝置가 작고 經濟的이지만 큰 缺陷 조차도 檢出하지 못하며 試驗으로 인해 케이블에 새로운 損傷을 일으킬 수 있다.

2. 代替試驗方法으로 진동과전압시험은 缺陷에서 電氣트리를 開始시키는 能力이 뛰어나며, 초저주파전압시험은 이미 發生된 電氣트리를 빨리 進展시키는데 有利하다. 따라서, 새 케이블의 竣工檢査로는 진동과전압시험이 보다 適合한 것으로 判斷된다.

3. $2U_0/30$ 분의 交流電壓試驗을 통해 把握한 22.9kV CN/CV 케이블의 인위적인 基準 缺陷의 깊이는 4.5mm이며, 이 缺陷을 檢出하기 위한 진동과전압시험의 條件은 55kV 50회로 나타났다.

理想과 같은 結論으로부터, 國內 22.9kV 配電線路에는 새로운 竣工檢査方法으로 진동과전압시험이 適合하리라 生角되며, 實際 現場試驗을 통해 現場適用性이 우수한 試驗裝置가 開發되어야 한다고 思料된다.

