

### 현장적용형 케이블 열화진단 설비 개발

이동영\*, 송일근, 김주용  
 위덕대학교 전기공학과\*, 한전 전력연구원

### Development of Field Applicable Global Assessment System for Power Cable Systems

Dong-Young Yi\*, Ju-Yong Kim, Il-Keun Song  
 Dept. of Electrical Eng., Uiduk University\*, KEPCO KEPRI

**Abstract** - We have developed the global assessment system for medium voltage power cable systems. Our purpose of diagnostic activity is the economic discrimination and maintenance of bad cables which is likely to cause cable system failure. We have adapted the Voltage Decay Method to construct the power cable assessment system for our diagnostic purpose. From the field application test results, we have concluded that our system is successful and convenient for the discrimination and maintenance of the damaged cables economically.

에 적용해 보았다. 그림 1.은 케이블시스템 구조도이다. 국내의 경우 주절연층의 주된 열화요인은 수트리 열화이다. 그림 2.는 수트리 열화의 개념도 이고 그림 3.은 수트리열화시 등가회로이다. 수트리열화가 아닌 보이드 등으로 인한 열화의 경우 PD발생과 급속한 전기트리로의 진전을 통한 파괴가 대표적이며 이는 직류시험법으로 검출이 불가능하다. 또한 수트리열화 초중기에 서지 등의 유입시 급속하게 전기트리로 진전될 수 있으며 이는 검출 가능한 절연저항의 저하를 동반하지 않으므로 절연저항법으로 검출이 힘들다. 그러나 상기 열화는 주된 열화요소가 아니므로 본 논문의 목적상 배제하기로 한다.

#### 1. 서 론

전력케이블 절연진단의 목적은 사고를 초래할 수 있는 열화를 진단대상으로 하여 주절연층을 포함한 케이블시스템 전체를 범위로 케이블의 열화상태 및 열화위치(Location)를 평가하고 궁극적으로 수명평가를 하는데 그 목적이 있다. 또한 전력회사 및 사용자의 입장에서는 상기의 목적을 가장 경제적으로 달성함으로써 선로 유지보수비용을 절감하고 전력공급의 신뢰도를 확보하는 것이 주된 목표가 될 것이다. 그러나 모든 종류의 케이블에 대한 전면적인 열화상태 평가나 수명평가는 현재 가능하지 않을뿐더러 경제적이지도 못하다. 따라서 국내 환경에 적합한 최소한 진단목표를 설정하고 이를 가장 경제적으로 달성할 수 있는 진단기법의 선정 및 장치 개발이 보다 현실적인 케이블 유지보수 및 관리기법의 대안이 될 것이다. 본 논문에서는 진단의 목표를 사고 가능성이 높은 선로의 선별 및 관리를 목표로 하고 국내에 가장 많이 포설되어 있는 케이블의 종류를 대상으로 최소 목표를 가장 경제적으로 달성할 수 있는 진단장치의 개발 및 현장적용 결과를 보고 하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전력케이블 절연진단의 개요

전력케이블 절연진단은 최소한 사고를 초래할 위험이 농후한 선로를 선별해 낼 수 있어야하며 그 신뢰도가 높아야 한다. 실제 잔존파괴강도가 낮은 즉 사고가능성이 농후한 선로를 양호로 판정할 가능성이 있는 진단기법이 라면 이는 매우 위험한 결과를 초래한다. 또한 양호한 선로를 불량이라 판정한다면 불량선로 관리의 혼란을 초래할 뿐 아니라 매우 비경제적인 일이 될 것이다. 본 논문에서는 상기와 같은 최소한의 진단목표를 설정하고 국내에 포설된 케이블 중 그 수가 가장 많은 XLPE 압출 절연 CN/CV(strippable shield, swelling tape, PVC jacket) 케이블을 그 대상으로 하여 케이블 시스템중 주절연층과 접속부, 단말부 열화중 사고를 초래할 가능성이 농후한 열화의 종류 및 정도를 검출 타겟으로 하여 전력케이블 절연진단 설비를 개발, 제작, 현장선로

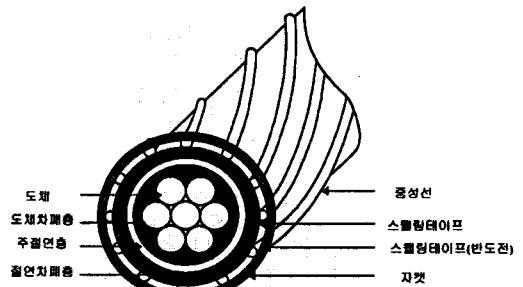


그림 1. 케이블 시스템

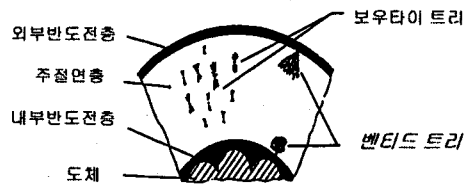


그림 2. 수트리열화 개념도

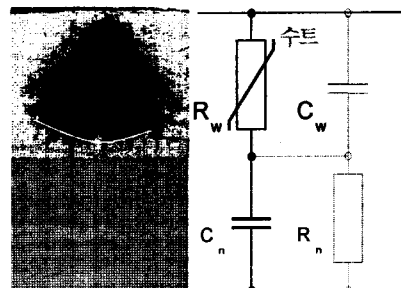


그림 3. 수트리열화 등가회로

수트리열화에 관한 수많은 연구보고들이 있으며 최근에는 수트리영역에서의 전도도와 유전율의 변화를 실측한 결과, 수트리영역의 전도도가 비수트리영역에 비해  $10^{10}$  배 이상 크고 유전율은 거의 변화가 없거나 미미한 증가를 보인다는 연구결과가 보고된 바 있다. 그리고 수트리 특성중 사고를 초래하는 것은 주로 최대성장길이이며 밀도는 파괴기구와 상대적으로 관련성이 적으며 벤티드트리가 더욱 위험하다고 알려져 있다. 이러한 수트리열화의 결과 나타나는 물리적 변수는 계면분극특성과 전도도 또는 저항율의 변화이다. 일반적으로 분극특성 측정법은 수트리 길이보다는 밀도에 의한 완화전류의 양적 검출을 반영한다. 수트리열화의 초기와 성장기 그리고 성장장이가 중간정도 진전될 때까지는 분극특성의 변화가 지배적이며 후기 이후에는 수트리가 절연층 전체에 걸쳐 bridging되기 전까지 전체등가저항의 저하가 저압상태에서도 상시적으로 존재하고 수트리 성장에 따라 저하 경향이 증가한다. 물론 분극특성의 변화 또한 동반된다. 그러나 브릿징이후에도 파괴로 진전되지 않는 경우 수트리전단의 계면분극은 급감하고 등가저항의 저하는 급증한다. 따라서 수트리열화를 검출하기 위한 변수는 전단의 목표설정이 전술한 바와 같은 사고 가능성이 농후한 선로의 선별이라면 등가저항율의 감소가 타당하다고 할 수 있다. 물론 분극특성을 측정함으로써 이 목표를 구현할 수 있으나 브릿징과 같은 극단적인 열화의 경우 분극특성법은 오판의 사례가 보고되고 있으며 최소의 진단 목표를 추구하는 경우 초·중기 열화의 검출은 경제성의 원리에 따라 고려 대상에서 제외될 수 있으므로 직류시험법중 절연저항법을 채택하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 그리고 국내 케이블시스템과 같이 중성선과 절연차폐층사이에 반도전스웰링 테이프층이 있는 경우 열화와 무관한 분극특성이 반영되어 진단 오판 즉, 양호를 불량으로 판정하는 원인이 될 우려도 있다.

### 2.1 진단기법의 선정 및 장치 설계

직류시험법은 크게 절연저항법과 분극특성법으로 나눌 수 있으며 절연저항법에는 누설전류법과 감쇠전압법이 있고 분극특성법에는 등온완화전류법과 회복전압법이 있다. 절연저항법중 누설전류법은 일본 등에서 많은 적용 사례가 있으며 국내에서도 30kV의 직류전압을 인가하는 직류누설전류법이 채택되어 적용된 바 있다. 그러나 누설전류법은 고압으로 인한 위험성 등으로 인해 그 사용을 제한하고 있으며 원리상 고압의 가압상태에서 미소전류측정을 시행하므로 단말 도체부 코로나, 누설, 전원 노이즈 등의 영향을 받고 접지상태의 영향을 심하게 받게 되어 측정상의 곤란함이 종종 그 신뢰도에 영향을 준다. 그리고 케이블 공장에 따른 영향이 지대하므로 그 해석이 힘들다는 단점이 있다. 물론 이러한 단점을 보완하기 위해 Tip-Up Test와 Battery의 적용과 같은 시도들이 있으나 가압상태에서의 미소전류측정이라는 원리상 그 단점의 보완은 무척 힘든 작업이다.

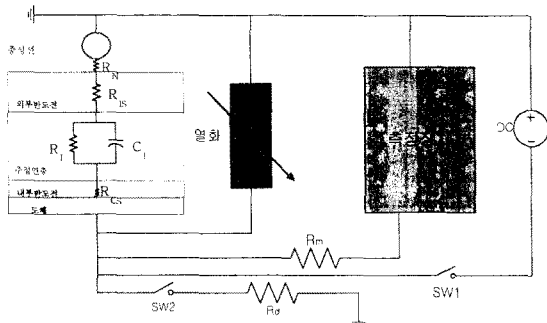


그림 4. 진단시험 개념도

따라서 본 연구에서는 측정변수가 전압으로 외부잡음 영향의 제거가 용이하고 측정의 재현성이 비교적 높고 충전후 open상태에서 감쇠전압을 측정하여 등가절연저항의 검출하는 방법인 전압감쇠법을 기본원리로 하여 진단설비를 설계하였다. 전압감쇠법은 저압시험이 가능하여 진단시험이 선로에 악영향을 줄 우려가 없으며 - 대개  $2U_0$  이상이면 시험중 파괴를 초래할 우려가 있다.  $1U_0$  정도라도 장시간 인가되는 경우 공간전하의 축적을 초래할 우려가 있다. - 식(1)에서 보는바와 같이 원리상 케이블 공장의 영향을 받지 않는다. 또 전압측정기법이므로 접지상태와 비교적 무관하고 3상 동시진단이 가능하다는 장점이 있다.

$$\tau = \epsilon \cdot \rho$$

식 (1)

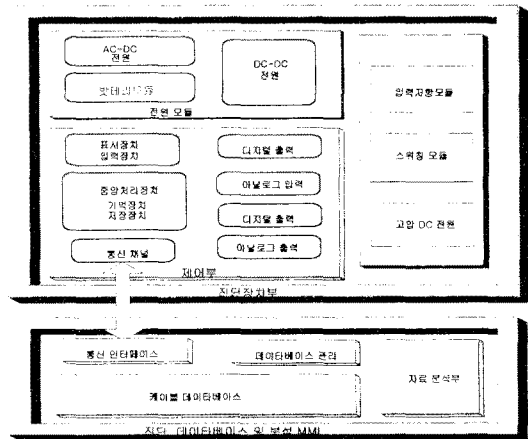


그림 5. 진단장치 구성도

### 2.3 진단장치의 구성 및 개요

그림 4.와 그림5.는 전압감쇠법을 이용한 진단장치 구성 및 시험의 개략도이다. 케이블 주절연층 및 접속부, 단말부 열화의 결과 등가절연저항의 저하가 케이블 RC 등가회로에 병렬연결되는 효과가 발생하고 이로 인한 전압 감쇠 속도 증가를 측정함으로써 열화의 검출을 가능하게 한다. 측정된 데이터로부터 일련의 알고리즘을 거쳐 감쇠시정수를 계산하고 이를 토대로 열화지수 (Aging Index)를 계산한다. 열화지수는 대개 0 - 7 사이의 값으로 나타나며 3.3보다 큰 경우 불량, 1.7 - 3.3 이면 요주의, 1.7이하이면 양호로 판정한다. 이러한 경계값은 국내 케이블의 최소화저항 및 규격상 자료를 근거로 도출되었으며 불량의 경우 향후 더욱 세분화 작업이 필요하다.

그림 6.은 본 연구에서 개발된 진단설비를 이용하여 상기와 같은 기준을 적용하여 실 선로에서 진단시험을 수행한 결과의 한 예이다. 열화지수가 4.8정도로 상당히 열화정도가 심각한 케이블이다.

본 연구에서 개발된 장치는 장치전원, 시험전원, 고압 스위칭부, 장치제어용 PC 및 진단 소프트웨어를 단일 설비 내에 탑재하여 진단시험 및 작업의 편의성을 도모 하였으며 Battery의 채용으로 전원인입이 어려운 현장에서도 시험이 가능하도록 하였다. 또 PC 일체화 및 Battery 채용은 시험의 편의성뿐만 아니라 측정오차 및 장비단가, 유지보수에도 장점이 있다. 진단시험의 소요 시간은 상당 15분이며 시험전압은 3kV로 시험도중 파괴와 전하축적의 위험은 없다고 볼 수 있다.

열화의 판정 및 자료의 저장은 본 연구에서 개발된 단일 장비 내에서 가능하며 시험자료의 축적과 DB화 및 이력관리, 열화분석작업이 가능하도록 별도의 진단자료

관리 및 분석 소프트웨어를 개발하여 보다 용이한 자료의 분석 및 DB화가 가능하도록 하였다. 상기 소프트웨어와 진단설비간의 자료교환을 위해 RS232C, USB, Ethernet등의 통신포트를 설치하여 다양한 환경 하에서 자료관리 및 정보교환, 축적이 가능하도록 하였다.

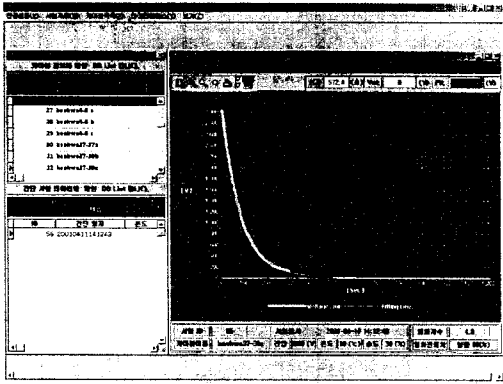


그림 6. 진단결과 분석화면

## 2.4 현장선로 비교시험결과

본 연구에서 개발된 진단설비를 이용하여 현장선로에서 실증시험을 수행하였다. 대상 모든 선로에 대해 현재 국내에 도입되어 사용중인 상용설비인 KDA-1(등온완화 전류법)과의 비교시험을 실시하였다. 표 1.은 비교시험 결과이다.

선로	상	CMI		KDA-1	
		측정값	Approximation Value	측정값	Approximation Value
1	A	양호	양호	양호	양호
	B	2.418 불량	오주의	0.1878 불량	양호
	C	불량	불량	0.7558 불량	양호
2	A	1.649 양호	양호	1.1221 양호	양호
	B	불량	불량	0.9149 불량	양호
	C	불량	불량	2.5511 불량	오주의
3	A	2.146 오주의	오주의	0.4945 불량	양호
	B	불량	불량	0.4744 불량	양호
	C	불량	불량	0.0229 불량	양호
4	A	불량	불량	3.7303 불량	불량
	B	1.859 오주의	오주의	3.7517 불량	불량
	C	2.632 불량	불량	3.0879 오주의	불량
5	A	불량	불량	4.409 불량	불량
	B	불량	불량	3.51 불량	불량
	C	불량	불량	3.415 불량	불량

표 1. 비교시험결과

시험결과를 보면 두 장치 모두 3상 불량인 선로는 동일한 판정결과를 보이며 CMI는 대체로 동일선로의 경우 판정결과가 상별로 일치하고 KDA-1은 상별로 극단적인 불일치를 보이는 경우가 다수 있다. 열화가 상별로 불균등하게 진전되는 경우가 실제로 존재할 수 있으나 양호와 불량의 극단적인 열화사례가 혼한 일이라고 보기는 힘들다. 그리고 3번 선로의 경우 두 장치가 전혀 상반되는 결과를 보이고 있다. 이는 두 장치중의 하나는 잘못된 판정을 하고 있거나 두 장치 모두 또는 두 장치중의 하나가 측정상의 에러를 일으킨 경우로 생각할 수 있다. 물론 어떠한 진단장치도 측정상의 오차를 완전히 배제할 수는 없으며 일부 선로의 시험만으로 타당성을 입증하기는 힘들다. 하지만 3번 선로의 경우 시료채취가 가능하다면 두 장치의 신뢰성 비교에 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

## 3. 결 론

본 과정을 통해 개발된 전력케이블 절연진단 설비는

진단의 최소한의 목표 즉, 사고가능성이 농후한 선로의 선별 및 관리라는 목표를 가장 경제적이고 효율적으로 달성하는데 그 목적을 두고 개발되었다. 열화의 초,중기 상태, 즉 양호 또는 양호에 가까운 오주의 상태의 열화는 경제성의 원칙에 따라 검출대상에서 배제하였으며 - 물론 불가능한 것은 아니다. - 현장에서의 작업성과 분석상의 편의성을 존중하여 전문적인 기술적 소양과 훈련 없이도 진단시험 수행 및 열화분석이 가능하도록 장치를 설계하고 개발하였다.

개발된 진단설비를 현장선로에 적용하여 현장적용성을 시험한 결과 시험시간, 작업성등 장치의 운용은 매우 만족스러운 결과를 보였으며 타 상용장비와의 비교시험 결과와 원리상의 특성을 종합해 볼 때 열화검출능력은 - 특히 불량검출능력 - 신뢰성이 우수하다고 사료된다. 하지만 본 설비는 아직은 현장적용경험이 일천하므로 보다 체계적인 신뢰성 검증작업이 필요하다. 향후 파괴강도와 상관관계에 대한 시험 및 검증을 통해 신뢰성 특히 불량판정의 신뢰성에 대한 확인작업이 필요하리라 생각되며 이러한 신뢰성 확인작업을 추진할 예정이다.

또한 추후 과제로 3상 동시진단이 가능한 진단설비를 개발하여 정전시간을 획기적으로 단축하고 진단의 신뢰도를 더욱 향상시키기 위해 필요하다면 다중진단설비도 개발할 계획이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] T. Toyoda et al., "Estimation of Conductivity and Permittivity of Water Trees in PE from Space Charge Distribution Measurements", IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol.8, pp.111-116, 2001.
- [2] R. Ross, "Inception and Propagation Mechanism of Water Treeing", IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol.5, pp.660-680, 1998.
- [3] M. Beigert, "Destruction Free Ageing Diagnosis of Power Cable Insulation Using the Isothermal Relaxation Current Analysis", IEEE 1994 ISEI, Pittsburgh, June 1994.