

## 배전용 전력케이블 시스템 포괄진단 설비 개발

(Development of Global Insulation Assessment System for Medium Voltage Power Cable Systems)

이동영\*

(Dong - Young Yi)

### 요 약

본 연구에서는 국내 배전계통에 사용 중인 전력케이블에 대한 평균열화평가시스템을 개발하였다. 절연진단의 최소한의 목적은 전력공급의 중단을 초래할 수 있는 열화 즉, 사고가능성이 높은 전력케이블을 효율적으로 선별하고 경제적으로 관리하는데 있다. 따라서 이러한 최소한의 진단 목표를 달성하기 위한 가장 효율적인 진단원리로 열화 시정수법을 채택하고 감쇠전압을 측정변수로 하여 진단설비를 개발하였다. 현장적용성 시험 및 파괴강도 시험 결과 열화상태 평가결과와 파괴강도의 상관관계를 확인하였으며 본 연구를 통해 개발된 진단장치는 사고를 초래할 수 있는 열화의 효율적이고 경제적인 선별 및 관리에 유용한 설비가 될 수 있음을 알았다.

### Abstract

The global assessment system for medium voltage power cable systems has been developed. The minimum purpose of diagnostic activity is the economic discrimination and maintenance of bad cables which is likely to cause cable system failure. I have adapted the Aging Time Constant Method to construct the power cable assessment system for the diagnostic purpose. From the field application test and breakdown test results, it could be concluded that the diagnostic system was successful and convenient for the discrimination and maintenance of the bad cables, which is likely to fail sooner or later, economically.

Key Words : Power Cable Assessment System, Aging Time Constant Method

### 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 적합

\* 주저자 : 위덕대학교 정보전자공학부 조교수  
Tel : 054-760-1661, Fax : 054-760-1399  
E-mail : dyyi@mail.uiduk.ac.kr  
접수일자 : 2002년12월 9일  
1차심사 : 2002년12월16일  
심사완료 : 2003년 1월20일

한 최소한의 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 보고하고자 한다.

## 2. 진단설비 개발

### 2.1 전력케이블 절연열화특성 및 진단

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 진단기법이라면 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 압출절연케이블 (strippable shield, swelling tape, PVC jacket)을 그 대상으로 하여 케이블 시스템 중 주절연층과 접속부, 단말부 열화중 사고를 초래할 가능성이 농후한 열화의 종류 및 정도를 검출 타깃으로 하여 전력케이블 절연진단 설비를 개발, 제작, 현장선로에 적용해 보았다. 그림 1은 케이블시스템 구조도이다.

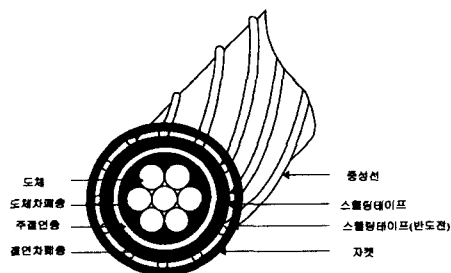


그림 1. 케이블 시스템(CN/CV)  
Fig. 1. Cable System(CN/CV)

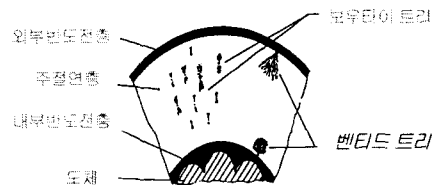


그림 2. 수트리열화 개념도  
Fig. 2. Schematic diagram of water tree deterioration

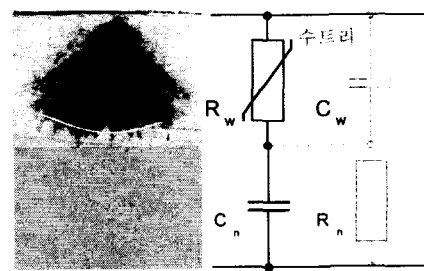


그림 3. 수트리열화 등가회로  
Fig. 3. Equivalent circuit of water tree

국내의 경우 주절연층의 주된 열화요인은 수트리 열화이다. 그림 2는 수트리 열화의 개념도이고 그림 3은 수트리 열화시 등가회로이다. 수트리 열화가 아닌 보이드 등으로 인한 열화의 경우 PD발생과 급속한 전기트리로의 진전을 통한 파괴가 대표적이며 이는 직류시험법으로 검출이 불가능하다. 또한 수트리 열화 초중기에 서지 등의 유입시 급속하게 전기트리로 진전될 수 있으며 이는 검출 가능한 절연저항의 저하를 동반하지 않으므로 절연저항법으로 검출이 힘들다. 그러나 PD등으로 인한 전기트리와 같은 열화는 주된 열화요소가 아니므로 본 연구의 목적상 배제하기로 한다.

수트리 열화에 관한 수많은 연구보고들이 있으며 최근에는 수트리 영역에서의 전도도와 유전율의 변화를 실측한 결과, 수트리 영역의 전도도가 비수트리영역에 비해  $10^{10}$  배 이상 크고 유전율은 거의 변화가 없거나 미미한 증가를 보인다는 연구결과가 보고된바 있다. 그리고 수트리 특성 중 사고를 초래하는 것은 주로 최대성장길이이며 밀도는 파괴기구와 상대적으로 관련성이 적으며 벤티드트리가 더욱 위

## 배전용 전력케이블 시스템 포괄진단 설비 개발

힘하다고 알려져 있다[1-3]. 이러한 수트리열화의 결과 나타나는 물리적 변수는 계면분극특성과 전도도 또는 저항율의 변화이다. 일반적으로 분극특성 측정법은 수트리 길이보다는 밀도에 의한 완화전류의 양적검출을 반영한다. 수트리열화의 초기와 성장기 그리고 성장길이가 중간정도 진전될 때 까지는 분극특성의 변화가 지배적이며 중기 이후에는 수트리가 절연층 전체에 걸쳐 관통(bridging)되기 전까지 전체등가저항의 저하가 저압상태에서도 상시적으로 존재하고 수트리 성장에 따라 저하 경향이 증가한다. 물론 분극특성의 변화 또한 동반된다. 그러나 관통 이후에도 파괴로 진전되지 않는 경우 수트리선단의 계면분극은 급감하고 등가저항의 저하는 급증한다. 따라서 수트리열화를 검출하기위한 변수는 진단의 목표설정이 전술한 바와 같은 사고 가능성이 농후한 선로의 선별이라면 등가저항율의 감소가 타당하다고 할 수 있다. 물론 분극특성을 측정함으로써 이 목표를 구현할 수 있으나 관통과 같은 극단적인 열화의 경우 분극특성법은 오판의 사례가 보고 되고 있으며 최소의 진단 목표를 추구하는 경우 초, 중기 열화의 검출은 경제성의 원리에 따라 고려 대상에서 제외될 수 있으므로 직류시험법 중 절연저항법을 채택하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 그리고 국내 케이블시스템과 같이 중성선과 절연차폐층사이에 반도전 스웰링 테이프 층이 있는 경우 열화와 무관한 분극특성이 반영되어 진단 오판 즉, 양호를 불량으로 판정하는 원인이 될 우려도 있다.

## 2.2 케이블절연진단의 목표 및 기준

그림 4는 진단설비의 개발 및 진단기법을 선정하기 위한 기준과 절차를 Flowchart로 나타낸 것이다. 즉, 진단시험의 목표를 사고가능성이 농후한 선로의 선별 및 관리라는 최소한의 목표로 설정하고 국내에 가장 많이 포설되어 있는 케이블시스템을 평가 대상으로 하였으며 등가절연저항의 저하를 검출변수로 하여 주절연층의 수트리열화와 단말, 접속부의 계면, 표면절연열화 상태를 평가하고 불량판정의 신뢰도를 높이는 것을 최우선의 기준으로 하였다. 이러한 기준과 목표를 가장 경제적인 방법으로 달성하기 위해 진단원리의 경제성, 시험 및 분석 작업의 경제성,

진단 및 선로관리비용의 경제성을 근거로 직류시험법을 진단의 기본 원리로 하고 절연저항검출법을 진단기법으로 채택하였다. 또한 절연저항법 중 측정의 재현성, 난이도 및 잡음의 영향등과 시험으로 인한 해악 및 3상 동시진단 가능성 등을 고려하여 열화시정수측정법을 최종적인 진단기법으로 선정하였다.

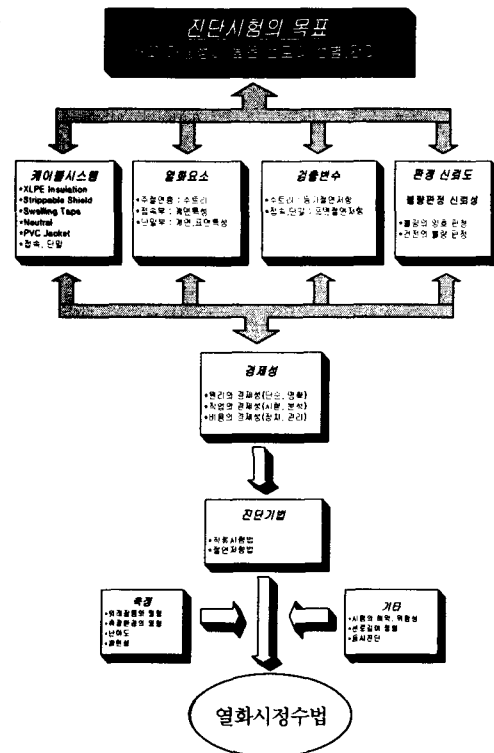


그림 4. 절연진단 기법선정 기준 및 절차도  
Fig. 4. Flowchart and criteria of diagnosis

직류시험법은 절연저항법과 분극특성법으로 나눌 수 있으며 절연저항법에는 누설전류법과 감쇠전압법이 있고 분극특성법에는 등온완화전류법과 회복전압법이 있다. 절연저항법중 누설전류법은 일본 등에서 많은 적용사례가 있으며 국내에서도 30[kV]의 직류전압을 인가하는 직류누설전류법이 채택되어 적용된바 있다. 그러나 누설전류법은 고압으로 인한 위험성 등으로 인해 그 사용을 제한하고 있으며 원리상 고압의 가압상태에서 미소전류측정을 시행하므로 단말 도체부 코로나, 누설, 전원 노이즈 등의 영

향을 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. 또한 종래의 직류전압감쇠법의 경우 케이블규격에 따른 판정기준의 상이함과 전압기준에 따른 오차 등의 문제가 있다[4][5]. 따라서 본 연구에서는 전압 측정을 통한 케이블시정수 측정을 검출변수로 하여 외부 잡음 영향의 제거가 용이하고 측정의 재현성이 비교적 높으며 충전후 open상태에서 케이블 시정수의 변화를 검출하는 방법인 케이블 시정수측정법을 근간으로 케이블 주절연층 및 접속부, 단말부 열화의 결과 등가절연저항의 저하를 검출하여 열화지수를 도출하고 전력 케이블의 절연상태를 자동적으로 판정하는 방법 및 장치를 개발하였다. 케이블 열화시정수법은 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. - 원리상 케이블 공장의 영향을 받지 않는다. (Tip-Up) 물론 실제 구현된 측정 장치의 경우 고입력임피던스의 한계와 전원용량등의 제한으로 인해 시험 가능한 선로의 길이에는 제한이 있다. 또 전압측정 기법이므로 접지상태와 비교적 무관하고 3상 동시진단이 가능하다는 장점이 있다.

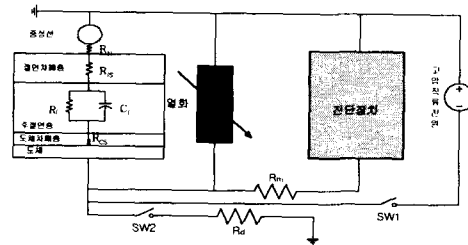


그림 5. 진단기법 개념도  
Fig. 5. Schematic diagram of diagnostic method

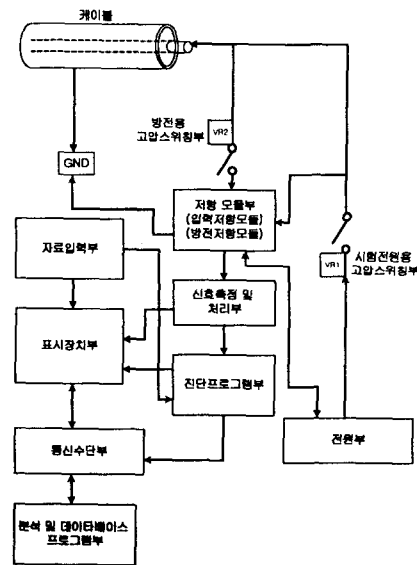


그림 6. 진단장치 구성도  
Fig. 6. Block diagram of diagnostic apparatus

2.3 절연진단설비의 개발 및 구성

본 연구를 통해 개발된 진단설비의 원리 및 구성은 다음과 같다. 그림5는 열화시정수법을 이용한 진단시험의 개념도이며 그림6과 그림7은 각각 진단장치 구성 및 시험도와 절연진단 및 열화상태 판정 절차도이다. 열화시정수법은 그림6에서 보는 바와 같이 케이블 주절연층 및 접속부, 단말부 열화의 결과, 즉 등가절연저항의 저하를 개방회로 상태에서의 전압변화 즉, 케이블 자체 등가저항의 변화를 측정하고 이를 통해 케이블 열화시정수의 변화를 계산하여 케이블의 열화상태를 평가하는 방법이다.

그림 6과 그림 7에서 보는바와 같이 일련의 진단 시험절차를 거쳐 전압신호를 검출하고 측정된 데이터는 진단 및 열화판정 알고리즘부로 보내져 케이블의 열화시정수를 도출하고 이를 토대로 열화지수 (Aging Index)를 계산한다. 열화지수는 대개 0 - 7 사이의 값으로 나타나며 3.3보다 큰 경우 불량, 1.7 - 3.3 이면 주의, 1.7이하이면 양호로 판정한다. 이러한 경계값은 국내 케이블데이터상의 최소저항율, 경험자료 및 규격상 자료를 근거로 도출되었으며 불량의 경우 향후 더욱 세분화 작업이 필요하다[6]. 이러한 열화상태 판정결과는 장치내의 표시장치부인

## 배전용 전력케이블 시스템 포괄진단 설비 개발

Graphic LCD로 보내지고 동시에 저장장치에 저장된다. 저장장치에는 열화판정결과와 측정데이터를 비롯한 모든 진단 관련 자료가 저장되며 이는 추후 사무실 등의 PC에 설치된 분석 및 데이터베이스프로그램부로 통신장치부를 통해 전송되어 사고이력 등 선로의 제반 환경변수와 동시에 관리되고 선로 분석이 가능하다.

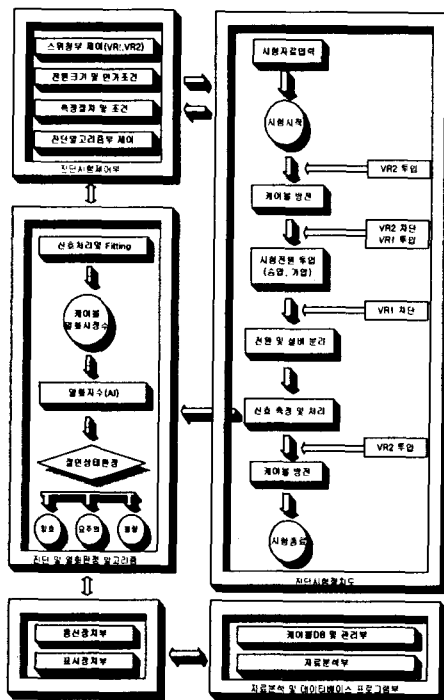


그림 7. 절연진단 및 열화상태 평가 절차도  
Fig. 7. Flowchart of insulation diagnosis and aging assessment

그림 8은 본 연구에서 개발된 진단설비를 이용하여 상기와 같은 기준을 적용하여 실 선로에서 진단 시험을 수행한 결과의 한 예이다. 열화지수가 4.8 정도로 상당히 열화정도가 심각한 케이블이다. 그림8은 진단 및 데이터베이스 프로그램부에서 재분석된 화면의 예이고 이 화면에는 선로길이, 사고이력, 포설환경등 선로환경 관련 DB부와 진단시험조건, 열화상태판정결과, 시험 당시 온습도등 진단결과 DB부가 동시에 표시되며 사용자는 선택적으로 선로상태를 분석하고 관리할 수 있다.

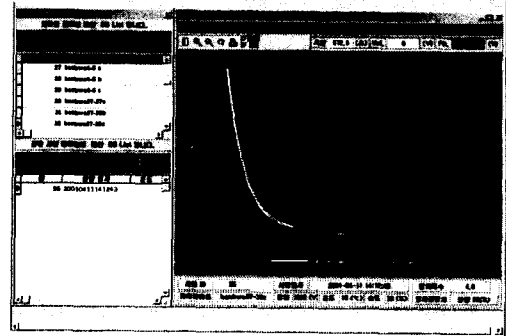


그림 8. 진단결과 분석화면에  
Fig. 8. Example of analysis window

결론적으로 본 연구에서 개발된 장치는 장치전원, 시험전원, 고압스위칭부, 장치제어용 PC 및 진단 소프트웨어를 단일 설비내에 탑재하여 진단시험 및 작업의 편의성을 도모하였으며 Battery의 채용으로 전원인입이 어려운 현장에서도 시험이 가능하도록 하였다. 또 PC 일체화 및 Battery 채용은 시험의 편의성뿐만 아니라 측정오차 및 장비단가, 유지보수에도 장점이 있다. 진단시험의 소요시간은 상당 15분이며 시험전압은 3[kV]로 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 환경에서의 자료관리 및 정보교환, 축적이 가능하도록 하였다.

### 3. 현장 적용시험

본 연구에서 개발된 진단설비의 열화상태평가의 신뢰도 확인 및 현장적용성 평가를 위하여 현장선로에 대한 실증시험을 수행하였다. 시험은 22.9[kV]급 CN/CV 케이블을 대상으로 실시되었으며 케이블 규격은 325[mm<sup>2</sup>], 포설년도는 1989년이다. 시험에 사용된 선로는 계통에서 약 13년간 사용되었으며 공장 151[m]이다.

진단시험은 정전작업후 포설현장에서 실시되었으며 진단결과의 검증을 위하여 시험을 마친 선로를 철거하여 파괴시험을 실시하였다. 철거된 케이블을 상별로 20[m]씩 절단하여 각각 5개씩의 파괴시험용 시료를 준비하였다. 파괴시험은 통상의 Step Test법을 이용하였으며 초기 30[kV] 인가후 5분간 유지하다가 이후 매 5분마다 10[kV]씩 시료가 파괴될 때까지 승압하는 방식으로 진행되었다.(ICEA S-61-402 Part6.)

다음 표 1은 이상과 같은 절차와 방법으로 진행된 진단시험 및 파괴강도 시험결과이다.

**표 1. 진단 및 파괴 시험결과**  
Table 1. Results of diagnostic and breakdown test

상	진단결과		파괴시험결과	
	평가	열화지수	시료	파괴강도[kV]
A상	불량	4.21	1	90
			2	100
			3	110
			4	90
			5	90
B상	불량	4.94	1	80
			2	90
			3	70
			4	70
			5	70
C상	불량	4.32	1	70
			2	130
			3	120
			4	100
			5	120

진단시험결과 대상 케이블의 모든 상이 불량으로 판정되었다. 본 연구에서 개발된 진단설비는 국부열화위치를 검출할 수 없는 평균열화진단설비(Global Diagnostic System)이므로 이상의 진단결과가 시험 구간 일부 열화 즉, 국부열화의 반영인지 전 구간에 걸친 고온 열화의 결과인지 확인은 불가능하나 파괴 시험 결과 대상구간의 길이에 따른 편차가 심하지 않은 것으로 보아 불량으로 판정된 진단결과는 대상

케이블 전체의 열화의 결과로 볼 수 있다.

각 상별 진단결과를 보면 3상중 B상이 열화지수 4.94로 가장 열화상태가 심각함을 보여주고 있으며 A상과 C상은 열화지수가 각각 4.21과 4.32로 열화상태가 거의 비슷하다. 그리고 진단결과의 검증을 위한 파괴강도시험결과를 보면 B상의 파괴강도 시험결과가 5.7U<sub>0</sub>로 A상과 C상의 7-8U<sub>0</sub>에 비해 가장 낮은 파괴강도를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 진단설비에 의한 전력케이블의 열화상태판정 결과는 타당하다고 할 수 있다. 한편 이미 상용화된 진단설비와의 비교시험을 위해 현재 국내에 도입되어 사용 중인 상용설비로 등온완화전류법을 사용하는 A설비를 사용하여 본 연구에서 개발된 진단장치(B설비)와의 비교시험을 실시하였다. 표2는 비교 시험 결과이다.

**표 2. 현장적용 시험결과**  
Table 2. Field test results

선로	상	A설비		B설비	
		Aging Factor	평가	Aging Index	평가
1	A	-	양호	0.282	양호
	B	2.418	요주의	0.1878	양호
	C	-	불량	0.7558	양호
2	A	1.649	양호	1.1221	양호
	B	-	불량	0.9149	양호
	C	-	불량	2.5511	요주의
3	A	2.146	요주의	0.4945	양호
	B	-	불량	0.4744	양호
	C	-	불량	0.0229	양호
4	A	1.859	불량	3.7303	불량
	B	2.632	요주의	3.7517	불량
	C	-	요주의	3.0879	요주의
5	A	-	불량	4.409	불량
	B	-	불량	3.51	불량
	C	-	불량	3.415	불량

시험결과를 보면 두 장치 모두 3상 불량인 선로는 동일한 판정결과를 보이며 B설비는 대체로 동일선로의 경우 판정결과가 상별로 일치하고 A설비는 상

## 배전용 전력케이블 시스템 포괄진단 설비 개발

별로 극단적인 불일치를 보이는 경우가 있다. 열화가 상별로 불균등하게 진전되는 경우가 실제로 존재할 수 있으나 양호와 불량량의 극단적인 열화사례가 흔한 일이라고 보기는 힘들다. 그러나 진단결과의 상별 불균형과 진단 신뢰도와의 상관성에 대한 입증은 진단결과 자체만으로는 불가능하다. 한편 3번 선로의 경우 두 장치가 전혀 상반되는 결과를 보이고 있다. 이는 두 장치중의 하나는 잘못된 판정을 하고 있거나 두 장치 모두 또는 두 장치 중의 하나가 측정상의 에러를 일으킨 경우로 생각할 수 있다. 물론 어떠한 진단장치도 측정상의 오차나 오진단의 가능성을 완전히 배제할 수는 없으며 일부 선로의 시험만으로 타당성을 입증하기는 힘들다. 하지만 3번 선로의 경우 시료채취가 가능하다면 전술한 파괴강도시험등을 통해 두 장치의 신뢰성 비교에 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

그리고 전력케이블의 효율적 관리를 위해 열화평가결과의 신뢰성 못지않게 중요한 장치의 현장적용성 또는 운용편의성의 측면을 살펴보면 최소한의 진단소요시간(상별 15분), 저전압시험(3kV), 휴대편의성(소형, 저중량), 작업성(단일 Set, 자동화설비)등의 측면에서 본 연구를 통해 개발된 진단설비의 현장적용성이 매우 우수함을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 과제를 통해 개발된 전력케이블 절연진단 설비는 진단의 최소한의 목표 즉, 사고가능성이 농후한 선로의 선별 및 관리라는 목표를 가장 경제적이고 효율적으로 달성하는데 그 목적을 두고 개발되었으며 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 보였다. 한편 실 선로에서 약 13년간 운전된 선로를 대상으로 한 진단 및 파괴시험결과와 운전 중인 선로에 대한 타 상용설비와의 비교시험 결과, 열화평가결과와 파괴강도의 상

관성을 입증하였으며 따라서 신뢰성 있는 열화상태 평가 -특히 불량검출능력면에서- 가 가능함을 확인하였다.

한편 진단설비의 열화상태평가에 대한 신뢰도의 검증은 일부 소수의 선로에 대한 반복진단 또는 다수의 선로에 대한 일회성 진단만으로는 그 신뢰도 여부에 대한 평가가 어려우며 - 진단의 특성상 상이한 진단장치들 간의 진단결과는 동일 선로에 대해서도 상이한 열화평가를 할 가능성이 상존한다.(오진의 가능성과 함께) - 의미 있는 신뢰도 평가를 위해서는 다수의 모의 선로에 대한 체계적이고 장기적인 현장시험 및 분석과 통계적인 접근이 필요하다고 사료된다.

## References

- [1] T. Toyoda et al., "Estimation of Conductivity and Permittivity of Water Trees in PE from Space Charge Distribution Measurements", IEEE Trans. Dielectrics E, Vol.8, pp.111-116, 2001.
- [2] R. Ross, "Inception and Propagation Mechanism of Water Treeing", IEEE Trans. Dielectrics E, 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.
- [4] IEEE P-400/D14-1999, "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems."
- [5] IEEE, "Electrical Facilities and Diagnostic techniques." IEEE Press, 1991, p. 276.
- [6] ESB 125-621~637 22(kV) Cv 전력케이블 한국전력 표준규격.

## ◇ 저자소개 ◇

### 이 동 영 (李東映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학부 졸업, 1985~1986년 삼성전자(주) 사원, 1990년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1995년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원. 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원. 1997년~현재 위덕대학교 정보전자공학부 조교수.