

전력케이블 열화진단용 측정장치 개발

이동영*, 권혁일, 정진호
 위덕대학교 전기공학과*, 포항제철 설비기술부 전기기술팀

Development of Power Cable Diagnostic and Insulation Measurement System

Dong-Young Yi*, Hyuk-Il Kwon, Jin-Ho Chung
 Dept. of Electrical Eng., Uiduk University*, Electrical Technology team POSCO

Abstract - We have developed the automatic diagnostic system for power cable insulation using DC voltage decay method in this work. Test condition, test method and diagnose criteria of our diagnostic system are adjustable to a class of power cables such as 3.3, 6.6, 11 and 22kV power cables. We have also developed measurement and diagnostic programs for win95 which is suitable for the management of database such as test condition, diagnose results and cable operation data.

하다고 볼 수 있다. 단심케이블의 경우 도체표면에 단위 길이당 전하 Q가 충전되었을 때 시정수 τ 는 다음 <식 2>와 같이 표현된다.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{Rc}} = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{<식 1>}$$

$$\tau = R \times C = \epsilon \cdot \rho \quad \text{<식 2>}$$

위 식에서 ϵ 과 ρ 는 각각 케이블절연체의 유전율과 저항률이다. 이 식에서 보는바와 같이 전압감쇄의 속도를 나타내는 시정수 τ 는 절연체 고유의 물성인 유전율과 저항률만의 함수가 되어 케이블의 크기나 길이와 같은 케이블구조와 무관하게 케이블의 절연열화 상태를 판정할 수 있다.

1. 서 론

현재 국내에서 사용하고 있는 지중배전용 전력케이블은 가교폴리에틸렌 (XLPE)으로 절연되어 있고 반도체층을 사용하고 있으며 외피는 염화비닐수지 (PVC)를 사용하는 CV 케이블이 주종을 이루고 있다. 이러한 구조는 생산공정이 간단하여 경제적이고 사고 발생시 보수가 수월하다는 장점이 있는 반면, 주절연층이 전압, 수분 또는 기타요인에 의하여 열화되어 절연파괴된다는 단점이 있다. CN-CV 전력케이블의 설계 내용년수는 30년이나, 수트리 열화현상 등으로 인하여 실제 수명은 8-12년 정도이며, 기대수명에 비하여 훨씬 떨어지고 있다. 본 연구는 현장에서 사고 전에 신속하게 대처할 수 있는 간편한 전기적진단의 필요성이 긴급하게 대두됨에 따라 소형경량의 열화진단용 측정장치 시제품을 개발, 제작하여 현장에 시 적용할 수 있도록 하여 향후 현장적용 경험 및 자료가 축적됨에 따라 진단용 측정장치 자체의 성능 개선을 통한 열화진단 설비의 구축은 물론 장기적으로 경제적이고 현장 적용성 있는 전력케이블 관리시스템 개발을 위한 토대 마련에 그 목적이 있다.

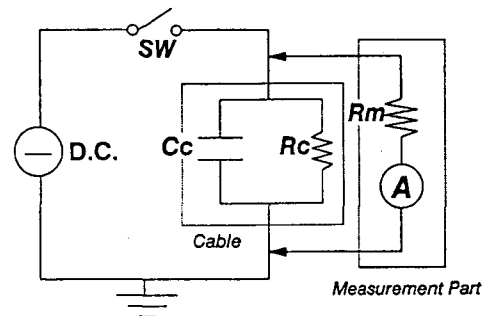


그림 1. 직류전압감쇄시험 개념도

2. 본 론

2.1 직류전압감쇄법의 원리

직류전압감쇄법은 케이블에 일정시간 동안 직류전압을 인가하였다가 제거한 후 케이블에 충전된 전하가 케이블 절연체를 통해 방전되는 것을 관찰하여 케이블의 절연상태를 판정하는 방법으로 측정이 간단하고 비교적 짧은 시간에 열화판정이 가능하며 또한 측정신호가 전압이므로 외부잡음등의 영향을 적게 받는 장점이 있다. 단심케이블의 경우 그 등가회로를 R-C 병렬회로로 볼 수 있으며 케이블의 열화가 심해지면 R-C 등가회로에 저항 R'가 병렬로 연결되는 효과가 나타날 것이다. 그림 1은 직류전압감쇄법 시험의 결선도이며 R_c , C_c , R_m 은 각각 케이블의 등가저항, 정전용량, 측정장치 내부임피던스이다. 케이블에 직류전압을 인가한 후 스위치 (SW)를 개방시키면 C_c 에 충전된 전하가 R를 통해 방전된다. 이때 스위치 개방후 초기 충전전압을 V_0 라고 하면 시간에 따른 전압 V의 변화식은 <식 1>과 같다.

시정수 τ 가 클수록 전압감소는 완만하고 절연이 양호

2.2 진단장치 하드웨어

본 연구에서는 케이블의 열화현상을 검출해내는 수단으로 직류전압의 시간적 감소를 측정하는 직류전압감쇄법에 관한 연구가 주요 목적이다. 따라서 피계측량인 전압의 정확한 측정이 올바른 열화진단을 위해 필수적이다. 그러나 접촉식 계측기를 이용한 어떠한 계측의 경우에도 측정하고자 하는 물리량의 왜곡이 없이는 계측이 불가능하며 그 정도의 차이만이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 측정과 판정의 자동화를 위해 부하효과를 고려한 저항식 측정법을 이용하여 진단장치를 구성하고자 한다. 그림 2는 진단용 측정장치 시제품의 개념도이며 각 부분에 대한 설계기준 및 구성은 다음과 같다.

일반적으로 22.9 kV CN/CV 케이블의 절연저항과 정전용량은 각각 km당 1.5~3 GΩ, 0.21~0.38 μF 정도로 매우 큰 값을 지니고 있다.

이때 시정수 τ 는 다음 <식 3>과 같이 표현된다.

$$\tau = R \times C = C_c \times \frac{R_m R_c}{R_m + R_c} \quad \text{<식 3>}$$

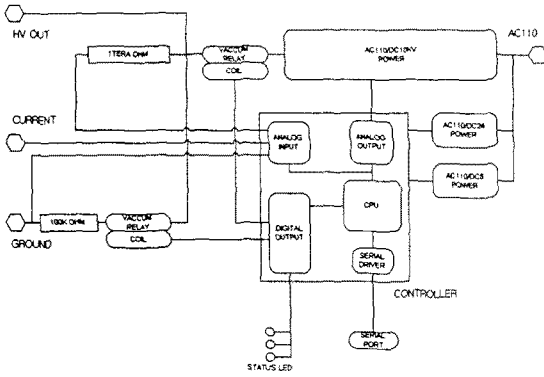


그림 2. 진단용 측정장치 하드웨어 구성도

위 식에서 보면 R_m 이 R_c 에 비해 크면 클수록 측정오차가 감소한다. 따라서 측정오차를 1% 이내로 유지하기 위해서는 $R_m : R_c$ 가 100 : 1 이상이어야 하므로 케이블의 절연저항이 3 G Ω /km 정도라면 케이블의 길이가 0.5 km, 1 km일 경우 측정장치의 내부저항은 각각 600 G Ω , 300 G Ω 이상이 되어야 한다. 따라서 내부저항을 내압 10 kV, 1 T Ω 의 단원저항으로 대체하여 전압, 전류 시간 지연 및 비선형성을 제거하여 측정의 신뢰도 및 안정성을 높이고 실 선로에서 통상의 측정구간인 300 m 이상에서 1% 이하의 측정오차를 확보할 수 있도록 하였다. 또한 매우 큰 표면저항과 발수성을 지닌 Teflon을 이용하여 연면누설거리를 확보할 수 있는 고저항셀을 설계하여 외부의 습기 등으로 인한 표면저항의 영향이 최소화될 수 있도록 하였다.

시험전원의 투입과 차단은 수작업으로 수행해도 시험이 불가능한 것은 아니나 이로 인해 발생가능한 인사사고나 진단시험 수행상의 번거로움을 피하기 위해서도 물론이거나 정확한 시점에서 전원을 투입, 차단하고 감쇄전압 측정상의 오차를 줄이기 위해 진단시험의 자동화가 필수적으로 요구된다. 케이블 절연열화진단을 위한 측정장치의 고압스위칭부가 지나야할 특성은 주 사용목적인 케이블 충전을 위한 고압전원 투입 및 차단이므로 cold switching에 준해 설계해도 무방하나 arc의 가능성을 배제할 수 없기 때문에 절연매체로 진공을 이용한 스위칭을 사용하는 것이 바람직하다. 더욱이 케이블 부하는 용량상과 저항상의 결합으로 나타나므로 진공을 사용하여 arc 전압 및 지속시간을 최소화할 필요가 있다. 그리고 빠른 동작속도(수십 msec 이하)와 간헐적 접촉 오동작(contact bounce)의 방지를 위해서도 진공 스위칭 설계가 필수적이다. 한편 진공을 이용한 스위칭을 함으로써 스위칭모듈의 수명도 최대화 할 수 있다. 그리고 무엇보다 중요한 스위칭 모듈의 요구성능은 차단(open) 시 접점사이의 절연저항이다. 감쇄전압 측정을 위한 입력 고저항모듈의 크기가 1T Ω 이고 케이블의 절연저항이 수G Ω 에서 수백 Ω 에 달하므로 측정오차를 최소화하기 위해서는 스위칭모듈의 차단시 절연 저항이 최소한 고저항모듈의 100배 이상 즉, 100T Ω 이상은 되어야 한다. 이러한 스위칭 특성은 일반적인 스위칭소자에는 규격에도 존재하지 않으며 고저항 부하를 지니는 케이블의 감쇄전압을 측정해야하는 본 측정장치에서 요구되는 필수적인 특성이다. 일반적으로 진공은 고전압 스위칭을 위한 이상적인 유전체이며 대단히 높은 절연 파괴강도를 지니고 있고 회복속도가 매우 빠르다. 진공스위칭에 사용되는 진공도는 일반적으로 10^{-7} Torr 이상이며 따라서 작은 접점거리에도 매우 큰 절연저항을 지닐 것으로 기대된다. 따라서 측정장치에 적용할 스위칭 모듈은 진공

스위칭을 이용하는 것이 바람직하다는 결론에 이르게 되었다.

한편 진단 및 측정 종료후 케이블에 남아있는 충전전하를 제거하는 작업이 필수적인 바 종래에는 수작업으로 접지봉등을 이용하여 방전작업을 하려고 하였으나 작업자의 안전문제와 시험전과정의 자동화를 위해 시험종료 후 접지 작업도 고압진공릴레이를 이용하여 자동으로 이루어 질 수 있도록 방전모듈을 고압스위칭모듈내에 함께 설치하였다. 이 방전모듈 또한 통상적으로 케이블 도체 직접 연결되어 있어야 하므로 고압스위칭모듈의 경우와 마찬가지로 100T Ω 이상의 차단 절연저항이 요구되며 방전작업의 특성상 용량성부하의 방전에 해당하므로 상당한 크기의 surge가 발생할 수 있다. 따라서 고압스위칭모듈에서 사용된 고압진공릴레이 이상의 특성을 지닌 진공 스위칭이 필요하며 직접접지시 발생하는 surge current를 억제하여 회로를 보호하기 위해 약 100k Ω 의 방전저항을 통해 방전이 이루어지도록 하였다.

본 진단장치는 시험전압을 노트북 PC상에 설치된 열화진단용 소프트웨어(MMI : Man Machine Interface)를 통해서 제어가 가능하도록 함으로써 진단장치의 실 적용과정 또는 개발과정에서 시험전압을 적절한 수준으로 조절 할 수 있도록 하였다. 고압전원은 출력전압 0-10kV, 출력전류 0-7.5mA에서 조절 가능하다. 진단시의 시험전압을 적절한 수준으로 결정하는 것은 다음과 같은 의미에서 매우 중요하다.

첫째, 시험전압은 측정의 신뢰도나 정밀도가 손상 받지 않는 범위 내에서 작을수록 케이블에 미치는 악영향이 줄어들며, 둘째, 진단 대상 케이블의 규격이나 운전전압에 따라 시험전압을 달리 함으로써 다양한 선로에 대한 진단이 가능하다. 셋째, 시험전압의 수동조작으로 인한 오차를 최소화하고 진단시험 전과정을 자동화 할 수 있다.

신호측정 및 처리모듈은 하드웨어의 전 구성부분을 제어하며 PC상에 설치된 소프트웨어와의 통신을 통해 케이블 진단시험 전과정을 제어하고 측정데이터를 적절한 형태로 가공하여 진단용 PC로 보내는 역할을 담당한다. 신호측정 및 처리 모듈은 일차적으로 시험전원의 기동 및 차단과 시험전압의 설정을 담당하고 고압스위칭모듈을 제어함으로써 제어된 시험전원을 진단 대상 케이블에 투입하거나 직류전압의 감쇄를 측정하기 위해 전원을 대상케이블로부터 완전히 분리하는 과정을 제어하는 역할을 담당하는 역할을 한다. 둘째, 진단 대상 케이블로부터 감쇄되는 전압신호를 받아 증폭, 필터링등 적절한 전처리과정을 거쳐 A/D Converter를 통해 디지털 신호로 바꾸어 주고 데이터의 가공과정을 거쳐 진단 및 판정에 적합한 형태로 진단데이터를 처리하는 역할을 담당한다. 셋째, 사용자의 입력사항을 받아 처리하고 시험 전과정을 정해진 순서에 따라 제어하는 역할을 담당하며 제어 및 진단용 PC와 통신하여 진단데이터를 진단용 PC 및 진단소프트웨어에 적합한 형태로 실시간 공급한다. 그리고 시험종료후 방전시 발생하는 surge로 인한 입력부의 손상을 방지하기 위해 측정모듈상에 보호회로를 구성하였다.

2.3 진단장치 소프트웨어(MMI)

본 열화진단용 측정장치는 전력케이블의 열화진단시험을 위한 하드웨어 부분과 이 하드웨어를 구동하고 제어하기 위한 Notebook PC 그리고 PC에 탑재된 소프트웨어로 구성된다. 본 장치의 제어에 사용되는 소프트웨어는 하드웨어와의 통신을 통해 시험의 전과정을 제어하며 측정결과를 실시간으로 표시하고 측정이 끝난 후 전력케이블의 열화정도를 판정하는 역할을 기본회로 수행한다. 진단신뢰도를 높이기 위해서는 각각의 진단시험시 각 선로에 대한 운영 및 환경자료 등을 동시에 축적

함으로써 각 현장 실정에 적합한 진단 및 열화판정기준을 구축할 필요가 있다. 그리고 대 공장 등 각각의 부하 환경과 지중 전력케이블의 관리에 적합한 형태로 진단시스템이 구축될 필요가 있으며 따라서 각각의 진단결과가 종합적인 전력케이블 관리에 기여할 수 있도록 진단용 소프트웨어가 구성되는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 따라서 본 열화진단용 소프트웨어는 이상의 정보환경 및 관리환경의 구축이 가능하도록 설계되었으며 이를 위하여 전기적 진단을 위한 측정, 실시간 표시, 열화판정 뿐만 아니라 시험조건, 진단결과, 열화판정조건, 케이블관리자료 등을 데이터베이스화 할 수 있도록 구성하였다.

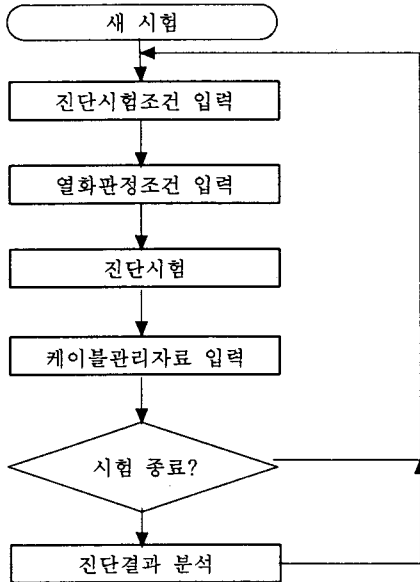


그림 3. 진단시험의 흐름도

진단시험조건은 진단시험방식의 선정, 포철선로의 경우와 같이 다양한 전압별 케이블이 포설되어 있는 경우 시험전압, 가압시간, 측정시간등과 같은 각 전압등급별 시험조건을 설정하는 부분으로 구성되어 있으며 이들이 매 시험마다 상이한 ID로 DB화되어 진단결과가 축적됨에 따라 포철환경에 적합한 최적의 시험조건이 구축될 수 있도록 하였다. 먼저 진단시험방식은 직류감쇄전압 단독시험, 직류누설과 직류감쇄전압의 동시시험의 두 가지 시험법 중 하나를 선택하도록 구성하였으며 직류누설 전류시험은 직류전압감쇄법에 의한 진단을 보완하기 위한 보조시험을 위해 설정되었다. 다음으로 각 전압등급별로 진단대상케이블을 선택하고 이에 따라 시험조건이 설정되도록 하였으며 전압등급은 현재 포철에서 사용하고 있는 3.3kV, 6.6kV, 11kV, 22kV의 네 가지로 구성하였으며 각각의 전압등급에 따라 시험전압, 송압시간, 가압시간, 측정시간이 입력되도록 하였다. 각 시험조건은 환경설정에서 미리 입력되도록 하여 시험의 편의를 도모하였으며 필요에 따라 변경 가능하도록 함으로써 진단이 케이블에 악영향을 끼치지 않는 최적의 시험조건 정립이 가능한 구조로 되어있다. 그림 4.는 진단시험조건 입력창이다.

열화판정조건은 경우 최종적인 케이블의 열화상태를 판정하기 위 진단의 핵심부분이라 할 수 있으나 판정기준은 모의선로 및 현장선로에 대해 장시간 동안 방대한 자료를 축적하고 분석 평가함으로써 각각의 현장에 적합한 합리적이고 신뢰성 있는 열화판정 조건을 설정하는 연구가 선행되어야 가능하다. 본 장치는 현재의 상태로도 잠정적인 판정은 가능하며 판정의 신뢰도 향상을 위해 매 시험마다 판정조건이 변화가 가능하도록 열화판정

조건을 구성하였으며 매 시험마다 상이한 판정ID로 판정조건을 DB화하여 향후 계속적인 판정신뢰도의 향상이 가능하다. 본 소프트웨어에서 사용되는 열화판정기준은 잠정적으로 설정된 것이며 판정의 범주는 양호, 양주의, 불량이다. 그리고 각각의 판정 범주 내에서 열화정도를 일목요연하게 구분할 수 있도록 Percentage(%)를 표시하였다. 판정기준은 양호와 양주의의 경계 값인 양호기준시정수, 불량과 양주의의 경계값인 불량기준시정수 두 가지로 구성된다. 당분간 현재의 판정기준으로는 열화정도의 도식적 판정이 그 판정기준이 잠정적 기준에 따름으로 인해 큰 의미부여에는 문제가 있고 또한 케이블의 열화정도를 수치화 하여 향후의 새로운 판정기준으로 함은 물론 대상케이블의 열화정도를 서열화하여 현실적으로 케이블관리를 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 열화지수(Aging Index)를 도입하였다.

$$AI = \left| \ln \frac{\tau_M}{\tau_N} \right| \quad \text{〈식 4〉}$$

τ_M = 진단대상 케이블의 측정시정수

τ_N = 건전케이블의 시정수

상기의 열화지수는 건전케이블의 시정수(τ_N)를 일반적으로 알려진 11000으로 할 경우 완벽한 신케이블의 경우 0에서 극단적인 불량케이블의 경우 7정도의 범위로 열화지수값을 표시하게되어 열화지수값이 증가할수록 열화정도가 심한 케이블로 판정할 수 있다. 상기 열화지수의 경우 케이블의 열화정도를 수치화하여 표시해줌으로써 케이블 절연의 건전성에 대한 서열화가 가능하여 전력케이블 관리에 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

케이블관리자료는 각 선로마다의 케이블 운영환경, 포설환경등을 자료화함으로써 포철내의 전력케이블을 효과적으로 관리할 수 있도록 함은 물론 자료가 축적되면 향후의 연구 및 분석을 통해 열화판정의 변수로 적용할 수 있을 것이다. 이는 크게 선로명, 공장명, 전기실명, 시험일자, 온도도등의 기본입력자료, 제작회사, 생산시기, 포설시기, 케이블종류, 도체굵기, 접속재개소, 접속방법 등의 케이블기본자료, 사용년수, 포설환경, 사고빈도, 침수여부, 중성선부식여부, 선로중요도, 평균부하등의 케이블운영자료 그리고 등온완화전류법, 직류중첩누설전류법, 직류성분법등의 타진단결과입력부로 구성되어 있다. 상기의 관리자료를 지수화하고 가중치를 부여하여 열화판정의 변수로 적용하는 것은 방대한 양의 작업과 장기간의 연구 및 분석이 소요되므로 현재로써는 진단결과에 대한 참고자료나 케이블의 효과적인 관리를 위해 사용될 수 있으리라 사료된다. 그림 5.는 케이블관리자료 입력창이다.

진단결과는 상기의 열화판정부에서 설명한 바와 같이 직류전압감쇄법에 의한 양호, 양주의, 불량 판정결과, 열화지수(Aging Index) 산출결과가 기본자료로 DB화되도록 구성되어 있으며 참고자료로 감쇄전압 측정을 위한 고전압 가압시의 누설전류를 측정하여 평균 및 최대, 최소를 자료화하도록 하였다.

다음 그림 6.은 본 장치를 이용하여 모의선로에 적용한 진단결과의 한 예이다. 진단의 주요 결과는 열화지수로 주어지며 이 열화지수에 의해 관리 대상 케이블의 열화정도에 대한 서열화가 가능하다. 그리고 시험종료후 언제나라도 관리대상 케이블에 부여된 진단ID를 입력하면 열화판정이 가능하며 수정된 열화판정ID에 의한 재판정 또한 가능한 구조로 되어있다.

이상의 모든 진단 및 케이블 관련자료는 진단ID, 판정ID, 선로ID를 Primary Key로 각각 DB화되어 관리되며 각각의 ID는 동일한 값을 가지도록 함으로써 전체 자료가 하나의 ID로 효과적으로 관리 될 수 있도록 하였다.

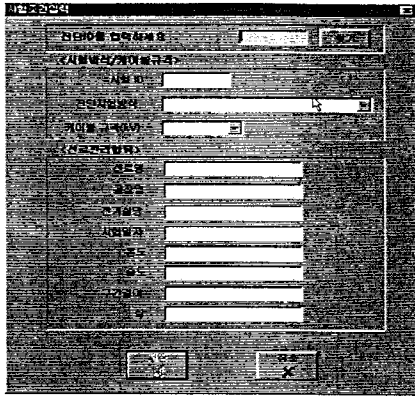


그림 4. 진단시험조건 입력창

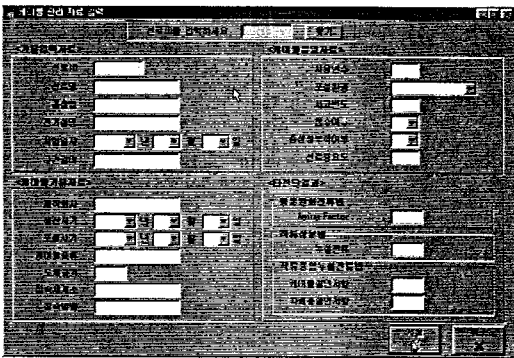


그림 5. 케이블관리자료 입력창

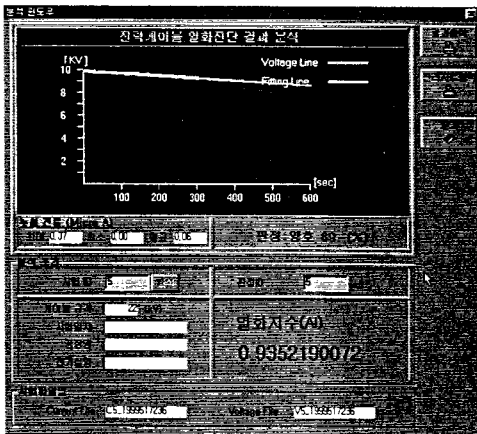


그림 6. 진단결과 분석창(모의선로 분석예)

3. 결 론

본 과제를 통해 제작된 열화진단용 측정장치 시제품은 다양한 정격의 케이블에 적용 가능한 시스템으로 제작되었으며 시험조건, 시험방법, 진단기준등의 가변 및 재설정 가능한 시스템이다.

열화진단용 측정장치 시제품은 하드웨어와 소프트웨어의 두 부분으로 구성되어 있으며 하드웨어는 시험전원의 투입 및 차단, 측정, 진단, 평가, 방전접지의 시험전과정을 자동화하여 진단시험의 편의성을 제고하고 시험 소

요시간을 최소화하여 현장 적용 및 자료 축적이 용이하도록 하였다. 또한 시험전원, 시험방법등의 설정 및 조건등의 가변이 가능하도록 하여 다양한 선로 및 환경에 적용 가능한 구조로 하였다. 소프트웨어는 하드웨어와의 통신을 통해 시험의 전과정을 제어하며 측정결과를 실시간으로 표시하고 측정이 끝난 후 전력케이블의 열화정도를 판정하는 역할을 기본적으로 수행한다. 전력케이블의 열화진단, 나아가 수명평가는 단순한 전기적진단 더욱이 일회적 진단만으로 그 양,불량을 평가하는 것은 현재까지의 기술로는 신뢰도에 한계가 있다. 본 열화진단용 소프트웨어는 향후 각 선로의 운영 및 환경자료의 측정, 진단결과의 축적 등에 의한 진단신뢰도 향상이 가능하도록 정보환경 및 관리환경의 구축이 가능하도록 설계되었으며 이를 위하여 전기적진단을 위한 측정, 실시간표시, 열화판정 뿐만 아니라 시험조건, 진단결과, 열화판정조건, 케이블관리자료등을 데이터베이스화 할 수 있도록 구성하였다.

결론적으로 본 연구를 통해 개발한 전력케이블 절연열화 진단용 측정장치는 완성된 형태의 진단장치라기 보다는 모의선로 등 다양한 선로에 실적용하여 측정결과를 축적하고 이를 연구, 분석, 평가하여 시험전압, 가압시간등 최적의 시험조건을 설정함으로써 각각의 현장에 적합한 최적의 케이블 열화진단 조건을 찾을 수 있도록 설계되었다. 진단신뢰도의 향상을 위해서는 장기간의 자료축적을 통해 적절한 절연열화 판정기준이 정립되어야 하며 이력관리에 의한 열화판정기법의 정립 또한 우선적으로 연구되어야 할 중요한 과제이다. 그리고 무엇보다 본 장치에서 전기적진단외에 보조자료로 활용할 수 있도록 마련된 케이블관리자료를 사용경험의 축적을 통해 각 현장 선로에 적합한 형태로 개선하고 전기적진단의 신뢰도를 향상시키는데 기여할 수 있도록 체계적인 데이터베이스화를 기하여 전력케이블 관리 시스템을 구축하는 연구도 전기적진단의 확립 이상으로 중요한 추후 연구과제일 것이다. 마지막으로 실제 현장 시적용과정에서 발생할 수 있는 작업성등의 문제점의 개선, 3상 동시시험등의 진단 효율성 향상, PC의 Option화등 하드웨어, 소프트웨어의 성능향상을 통한 안정된 열화진단장치의 개발 및 진보된 진단시스템의 구축 또한 장기적으로 중요한 과제라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전력공사 기술연구원, "배전용 CN-CV케이블과 접속재의 열화사고 방지대책에 관한 연구" 한국전력공사 연구보고, 1992.11
- [2] 전기학회(일본), "전기설비진단·갱신기술에 관한 조사보고", 전기학회기술보고 (II부) 제376호, 1991.7