

2001 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

주파수 분석을 이용한 원자력 발전소 케이블 상태감시 방법

Condition Monitoring Method for Nuclear Power Plant's Cable using Frequency Analysis

강윤식, 안상필, 김철환

구철수, 김복렬

성균관대학교
경기도 수원시 장안구 천천동 300

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

원전 전력케이블의 상태감시의 목적은 전력케이블이 사용되는 환경 및 기타 요인으로 인해 발생하는 열화에 의한 전력케이블의 상태 변화를 관찰하여 사고를 미연에 방지하는 것에 그 목적을 두고 있으며, 원전 전력케이블 상태 감시는 전력케이블의 사용여건과 상태를 비교하여 주변 기기에 미치는 영향을 극소화할 수 있고, 또한 원전 전력케이블의 적절한 교체 시기를 판별할 수 있다는 것에 중요성을 둘 수 있다. 그런데 원전 전력케이블의 절연물은 배합내용이 다양하기 때문에 종래의 자료로부터 전선과 케이블의 열화 또는 수명, 즉 케이블의 상태를 판단하기가 극히 어렵다. 따라서 본 논문에서는 새로운 케이블 상태감시 방법으로서 전력케이블의 열화에 의해서 발생하는 제 3고조파를 이용한 주파수 분석 방법을 제시하였다.

Abstract

Cables are vital components of I&C(Instrumentation & Control) systems in nuclear power plants(NPPs) since they link the system components. All equipment important to safety, including cables, therefore needs to be qualified to perform its function both under normal operating conditions and under a design basis event(DBE) occurring at any time during its service life. From this point of view, effective condition monitoring techniques for aging are required to assess the functional capability and operational readiness of cables in NPPs. In this paper we suggests that the 3rd harmonics by frequency analysis can be a condition indicator of degradation of cables in NPPs.

1. 서 론

원전 전력케이블은 열화정도를 관측하여 그 결과에 따라 전력케이블을 유지 및 관리작업을 수행하는 것이 바람직하다[1-4]. 결론적으로, 전력케이블의 열화상태를 파악하기 위하여 무정전 상태에서 이용할 수 있는 상태감시 방법의 개발이 무엇보다 중요하다[5-6]. 기존의 전력케이블의 열화상태 파악방법에는 전력케이블 시편을 채취하거나 외부의 손상 여부에 따른 상태감시 방법들이 있다[7-8]. 그러나, 전력케이블 시편을 채취하는 방법은 전원이 공급되고 있는 전력케이블에는 적용하기 어려우며, 외부의 손상으로 전력케이블의 열화정도를 판단하는 방법은 전력케이블 내부에서 일어나는 열화현상에 대해 정확히 판단할 수 없다[9-13]. 이에 반해 본 논문에 제안하는 주파수 분석을 이용한 케이블 상태감시 방법은 전원이 공급되고 있는 상태에서 전력케이블 내부의 상태를 판단할 수 있을 뿐만 아니라 제 3고조파의 발생 비율 정도에 따라 케이블 열화의 진행상태를 추정하는 것이 가능하다.

2. 케이블 상태감시 방법

우리나라는 1975년대 후반의 CV 케이블의 도입 개시이후, 물에 의한 자연 발화 사고가 문제화되었다. 이것을 방지하기 위하여 전력케이블 구조상의 개량·개선 및 전력케이블 상태감시 기술의 개발 등 장기적인 연구·개발이 시작되었다. 이러한 자연 발화에 대한 문제점 중 구조상의 문제는 1981년경 개발된 3층 동시 압출제법에 의하여 거의 해결되었다.

노화 구조와 상태감시 기술 연구에 있어서의 세계적인 추세는 다음과 같다. 대부분의 연구의 초점은 전력케이블의 절연성, 기계적 성질의 열화를 통한 수명예측에 대한 것으로서, 그중 보편적으로 이용되는 방법으로는 온도 반감 법칙을 이용한 방법이 있다. 이 법칙은 온도가 8~10°C 상승하면 수명이 반감된다는 10°C 반감법칙을 사용하는데, 광범위한 온도에서 사용되는 전력케이블에는 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 아레니우스 도(Arrhenius plot)를 이용한 수명 예측 방법이 있다. 아레니우스 수명 예측 방법은 활성화 에너지 및 기체상수 그리고, 절대온도(Kelvin)를 이용하여 그래프를 작성하고, 신장율이 처음 값의 50%가 되는 점을 측정하여 전력케이블의 수명을 예측하는 방법이다. 이밖에 최근에는 부분방전 특성 열화를 통한 상태감시 방법들과 연신율 측정을 통한 상태감시 방법들 그리고, 전기적 성질을 이용한 전력케이블 상태감시 방법 등이 개발되어지고 있다.

2.1 절연체 성질을 이용한 상태감시 방법

원전 전력케이블 상태감시 방법은 시설 위치가 원자력 발전소 내라는 특수한 환경조건에 따라 다른 장소에서 사용되는 전력케이블 상태감시 방법과는 구분되어 고려해야 한다. 이러한 특성에 의해 현재 세계적으로 이용되고 있는 전력케이블의 상태감시 방법들은 매우 다양하다. 이 방법들은 고려된 특성에 따라 여러 가지로 분류해 볼 수 있는데, 이중 케이블 절연체의 특성을 사용한 상태감시 기법들을 정리하면 다음과 같다.

다음 표 1은 케이블의 상태감시 방법 중, 화학적, 물리적, 전기적 성질을 이용한 방법과 각 방법들과 각각의 시료 손상 여부를 정리한 것이다.

표 1. 절연체의 성질을 이용한 방법

절연체 성질 이용 방법	상태 감시방법	시료의 손상 여부
1. 화학적 성질을 이용한 방법	① 산화유도 시간/온도	No
	② 적외선 분광기(FTIR)	No
2. 물리적 성질을 이용한 방법	① EAB	Yes
	② 인덴터	No
	③ 경도	No
	④ 적외선 온도 기록계	No
	⑤ 육안 검사	No
3. 전기적 성질을 이용한 방법	① 절연저항	No
	② TDR	No
	③ 유전손	No
	④ 내전압 시험	Yes
	⑤ 기능 시험	No
	⑥ 전류의 특징	No
	⑦ EMF 측정	No

절연체의 성질에 따른 각각의 상태감시 방법들 중 가장 널리 쓰이고 있는 산화유도시간/온도(OIT/OITP)와 EAB, Indenter의 장·단점은 다음과 같이 나눌 수 있다. 산화유도시간 방법의 장점은 현장에서 극미샘플링(micro-sampling)이 가능하며 대부분 비파괴적인 샘플링이다. 그러나 이 방법은 산화 방지제(anti-oxidants) 물질에만 적용이 가능하며, PVC에서는 적용이 쉽지 않으며, 특별히 주의를 해야만 사용 가능하다는 단점이 있다. 샘플 채취에 있어서도 극미샘플은 보통 케이블 외피에서 추출하는데, 벌크 절연물은 샘플로 사용할 수 없다. 또한 오염된 전력케이블은 샘플링에 어려움을 주며, 오염 물질의 제거를 위한 화학적 정화는 표피의 변화를 막기 위해 피해야만 한다. 그리고 외피와 절연 조사량의 상관관계의 도출이 불가능하며, EAB방법 또는 케이블 기능을 나타내는 다른 특성과의 상관관계정립이 필요하다는 것 또한 단점이다. 두 번째로 인장시험에 근거를 둔 EAB방법은 국제적으로 표준화가 되어 있어서 매우 유용한 상태감시 방법이다. 그러나 이 방법은 인장 시험시 매우 큰 샘플이 필요하고, 파괴적이며, 가교 폴리에틸렌(XLPE)에 대해서는 좋은 특성을 보이지 않는다. 그리고, 시험물이 2개 이상의 다른 층으로 구성되어 있는 혼합물이라면, EAB방법은 대표적인 시험법이 될 수 없다는 것이 단점이다. 마지막으로 Indenter를 이용한 방법은 현장에서 적용하기가 쉽고, 시각검사를 포함한 빠른 시험을 할 수 있으며, 현장에서 즉시 결과를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면, 전력케이블의 외피나 절연물 두께의 변화가 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 PVC와 XLPE에서는 좋은 상태감시 특성을 갖지 못한다. 이러한 Indenter를 이용한 방법은 단지 외피의 측정만 가능하므로, 절연특성에 대한 상관관계가 필요하다. 그리고, 온도상관인자를 필요로 하는 몇몇 절연물에서 시험중의 온도는 그 결과에 영향을 준다. 아울러, 산화유도시간/온도 방법과 마찬가지로 EAB와의 상관관계가 필요하다.

2.2 손실전류고조파법을 이용한 전력케이블 상태감시방법

손실전류고조파법은 현재 열화가 고조파의 함유량에 관련이 있다는 것을 기반으로 한 케이블

상태감시 기법이다. 전력케이블에 교류 전계를 인가했을 경우 그 전류는 절연 저항분에 흐르는 손실전류분과 용량성분에 흐르는 충전전류 성분으로 나눌 수 있으며, 수트리에 의해 열화 된 CV 케이블에서는 절연저항이 저하하고, 건전한 경우에 비하여 손실전류성분이 증가한다고 생각되어진다. 교류손실전류과형에는 전하담체의 인가전에 대하여 비선형 거동에 관련한 고조파성분이 포함되어지는 것이 보고되었다. 수트리에 열화 된 CV 케이블에 있어서도, 수트리의 전류-전압 특성이 비선형이라는 것에 기인한 손실전류의 고조파성분이 관측되었으며, 현재 교류손실전류 측정에 의한 CV케이블의 열화진단기술이 각 기관에 있어서 검토되고 있다. 수트리에 의해 열화 된 케이블에 있어서 고조파성분이 발생하는 것은 수트리가 단순한 보이드의 집합체가 아니고, 가는 세션모양의 Pass가 존재하기 때문이라고 볼 수 있다. 고전계의 인가시 보이드내 수분이 맥스웰 응력에 의해 전계 방향으로 인장되고, 가는 선상의 Pass에 흐르기 때문에 전류가 급증한다. 이 때문에 관통 수트리의 직류 누설전류는 전류-전압특성이 비선형이 된다고 할 수 있다.

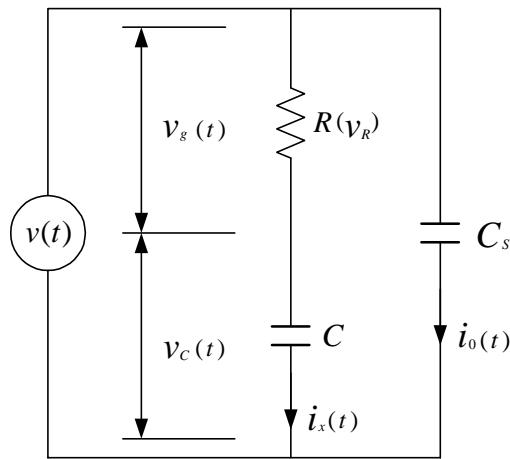


그림 1. 미관통 수트리 모델

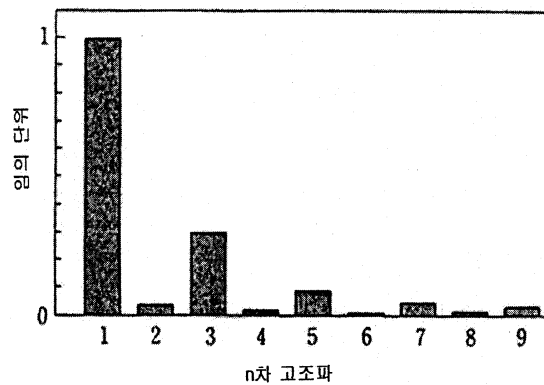


그림 2. n차 고조파

그림 1은 미관통 수트리부를 비선형 전류-전압특성을 가진 저항성분 $R(v_R)$, 미관통부를 용량성분 C 로 가정하는 것에 의해 고조파성분을 발생하는 것을 나타내었으며, 그림 2는 미관통 수트리 모델에 교류전계를 인가한 때에 발생하는 고조파 성분을 회로해석 소프트웨어에 의해 시뮬레이션한 결과이다.

손실전류측정의 특징으로는 관통 수트리 열화뿐만 아니라 미관통 수트리 열화도 검출 가능하며, 정전상태에서의 CV 케이블 열화진단법에 속하고 있지만 활선상태에서의 열화진단도 가능하며, 손실전류에 포함되어 있는 고조파 성분은 홀수 차수의 성분이 크다.

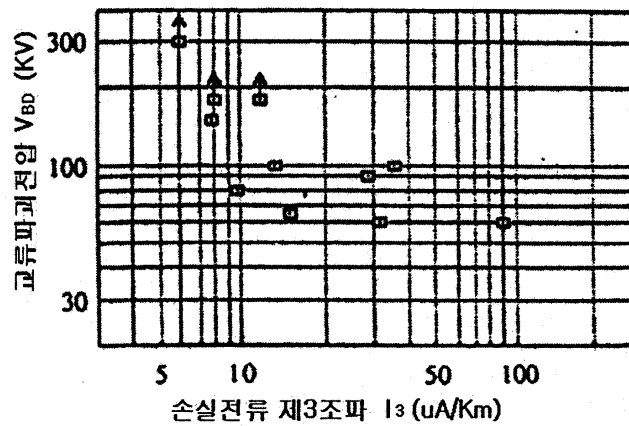


그림 3. 제 3고조파 전류의 위상과 파괴전압의 관계

그림 3은 손실전류측정결과에 관해서는 손실전류의 제 3고조파 성분과 파괴전압과의 상관관계에 대해서 나타낸 것이며, 제 3차 고조파전류가 클수록 파괴전압이 작게 되는 경향을 얻을 수 있다. 하지만, 손실전류측정법은 아직 측정할 예가 적고, 열화판정기준 확립되지 않은 상태이다.

3. 주파수 분석을 이용한 상태감시 방법

본 논문에서 제안하는 주파수 분석을 이용한 상태감시 방법은 케이블에 대한 지속적인 열화는 케이블에 흐르는 전류에 영향을 미치며, 이러한 영향은 전류에 함유된 고조파 성분의 증가로 나타나게 되며, 이러한 고조파 성분 중에 제 3고조파의 함유율이 가장 클 것으로 추측된다. 이러한 이론은 케이블에 지속적인 열화가 진행된 뒤에 주파수 스펙트럼의 변화로 알 수 있다. 본 논문에서는 전류의 고조파 성분을 분석하여 원전 전력케이블 절연체의 열화진단 방법을 도출해내고자 한다.

3.1 가속열화 시험

주파수 분석을 이용한 전력케이블 상태감시 방법에 있어 먼저 실험에 이용되어질 케이블의 등가수명을 산정하기 위해 아레니우스 법칙을 이용하였다. 아레니우스 법칙은 전력케이블의 등가 수명을 예측하는 방법으로서 온도가 8~10°C 상승하면 수명이 반감된다는 10°C 반감 법칙을 이용하여 초기의 수명을 예측하고 그 후 반응 속도식에 의한 아레니우스 식을 적용하게 된다. 아레니우스 식은 물질의 반응속도는 온도가 높아질 때 화학적 반응이 빨라짐을 나타내는 것으로 활성화 에너지를 발견하기 위해 사용되어지기도 하며, 절연체의 온도와 사용기간에 따른 등가 수명을 예측하는데 일반적으로 이용되어지는 방법이다. 아레니우스 식은 비율 상수 k 와 온도 T 의 관계로 표현

할 수 있다. 다음 식 (1)의 양변에 로그를 취하면 식 (2)와 같이 전개할 수 있다[7].

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (1)$$

$$t_{ser} = t_{age} \exp\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ser}} - \frac{1}{T_{age}}\right)\right] \quad (2)$$

여기서, T_{ser} : 사용온도[K]

T_{age} : 가속열화온도[K]

t_{ser} : T_{ser} 에서의 사용수명[h]

t_{age} : T_{age} 에서의 가속노화시간[h]

E_a : 활성화 에너지 [eV]

k_B : Boltzman 상수 (8.617×10^{-5} [eV])

케이블이 사용되는 온도가 60℃이며, 130℃에서 가속열화를 시킨다고 가정하고 E_a 는 1.35[eV]라고 하였을 때, 식 (2)에 의해 표 2와 같이 케이블 등가 수명을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 40년 상당을 등가수명을 기준으로 하기 위해 XLPE 케이블 시료를 130[℃]에서 열화 시켰다.

표 2. 아레니우스 식을 이용한 가속열화 등가수명 예측

등가수명 [year]	10년상당	20년상당	30년상당	40년상당	50년상당	60년상당	70년상당
가속열화 시간[h]	24.744[h]	49.4875[h]	74.2312[h]	98.975[h]	123.719[h]	148.462[h]	173.206[h]

3.2 주파수 분석을 이용한 케이블 상태감시 방법

절연체의 전류 특성이 비선형적이고, 각 열화의 진행도 전체적으로 비선형의 정도가 강한 경우에는 각상 절연체에 흐르는 교류전류의 파형이 왜형되어 기본파 성분 이외에도 3차, 5차, 7차 등의 고조파 성분이 포함되며, 이러한 고조파 성분의 함유율은 열화의 진행에 따라 증가하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 기본파를 비롯하여 포함되는 각 고조파 중 함유율이 가장 큰 제 3고조파 성분만으로 열화를 판정하기 위하여 다음 그림 4에 나타낸 바와 같이 CT를 사용하여 전류 데이터를 추출하고자 한다. 이렇게 추출된 전류에 BPF(Band pass filter)를 사용하여, 제 3고조파 성분인 I_{3B} 만을 추출해 낸다. 이와 같은 과정을 통하여 열화 전 케이블의 I_{3B} 와 열화 후 케이블의 I_{3B} 를 비교하여 열화의 진행정도를 파악하고자 한다.

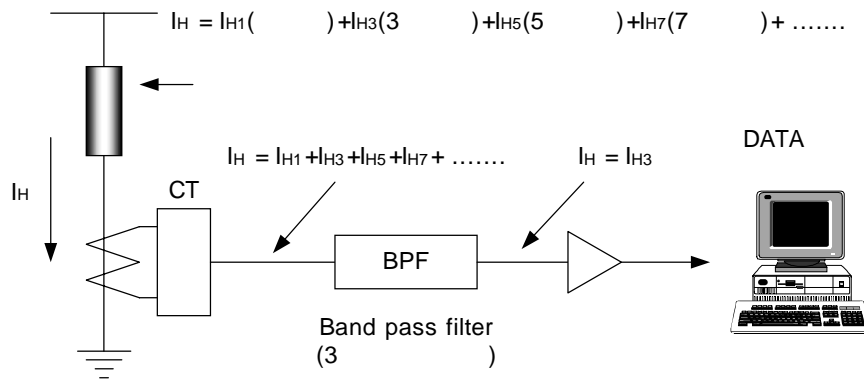


그림 4. 제 3고조파를 이용한 상태감시 방법

3.3 실험 장치 및 방법

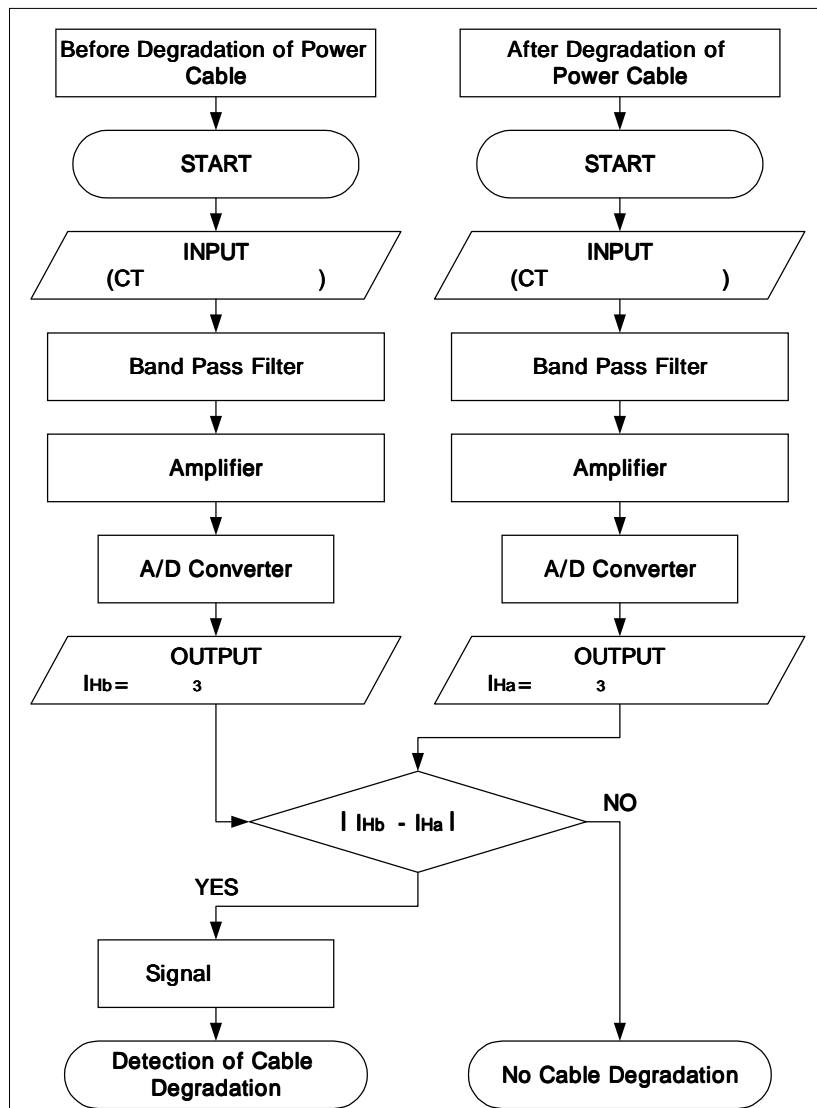


그림 5. 제 3고조파를 이용한 상태감시 방법의 알고리즘

위의 그림 5는 제 3고조파를 이용한 상태감시 방법의 알고리즘을 나타낸 것이며, 이 알고리즘은 최초 열화 전 전력케이블과 열화 후 전력케이블의 두가지 파형의 입력에서 시작되며, 각각의 입력 값은 기본파를 비롯하여 고조파를 함유한 파형이다. 각각의 고조파가 함유된 파형은 BPF를 통과하여 증폭되어진 후, A/D 컨버터를 거쳐 출력된다. 여기서 출력된 각각의 값이 다를 경우 YES의 경로를 거쳐 신호의 변화값에 따라 전력케이블의 열화 정도를 나타낸다. 만약, 출력되어진 신호의 변화값이 차이가 적을 경우 전력케이블에 열화가 발생하지 않았거나, 아주 미약한 열화가 진행되었다고 추정할 수 있다.

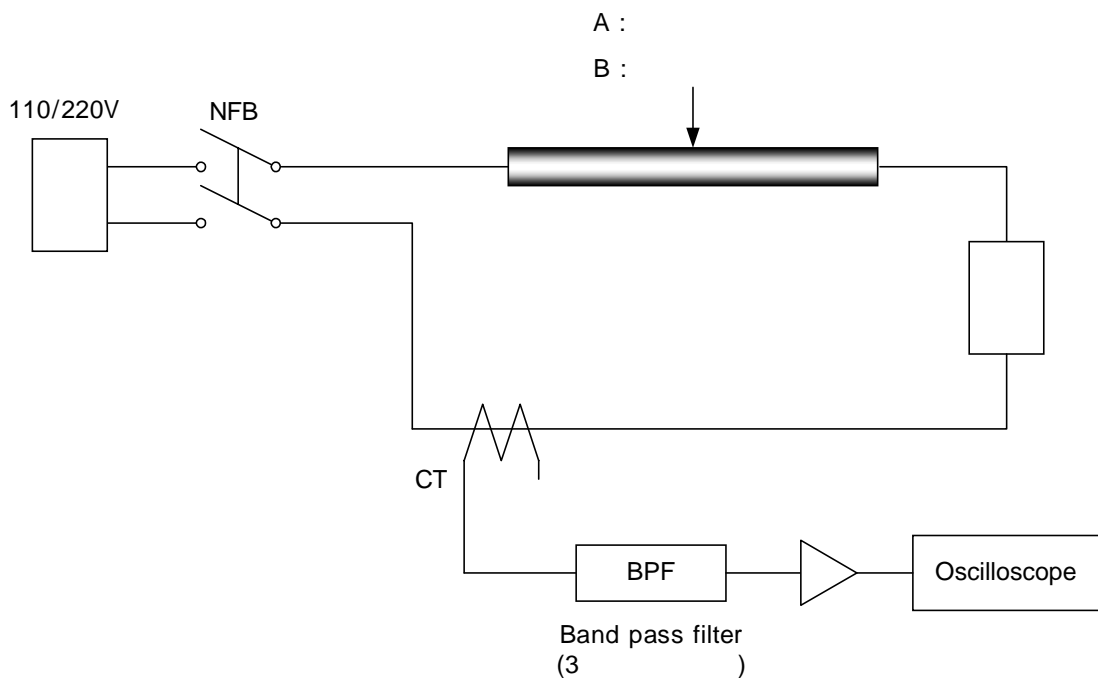


그림 6. 실험장치 구성

다음 그림 6은 그림 4에 표현된 방법을 실제 구성한 것으로, 먼저 열화 전 케이블을 시설한 상태에서 신호를 검출한 후 열화된 케이블을 구성 회로에 시설하여 신호를 검출한다. 최초 열화 전 전력케이블과 열화 후 전력케이블의 각 전류 파형은 기본파를 비롯하여 여러 차수의 고조파를 함유한 파형이며, 각각의 고조파가 함유된 전류는 CT를 통해 검출된 후, BPF를 통과하여 3고조파만 통과되어진다. 이렇게 추출된 두 케이블에 대한 전류의 3고조파 성분을 비교하여 전력 케이블의 열화정도를 판단한다.

구성된 회로도의 전원은 그림에서 알 수 있듯이 110/220[V]의 상용전원을 사용할 예정이며, 신호 검출시에는 고압, 대전류를 취급이 용이한 저압, 소전류로 변성시켜 교류용 계기의 측정 범위를 확대시킬 수 있는 CT를 사용할 것이다. 회로를 구성하고 있는 전선과 실험에 사용되어질 케이블의 접속은 그림 7과 그림 8과 같은 전선 및 케이블을 각종 기기 및 다른 전선과 접속할 때 이용되는 터미널을 사용하였다.

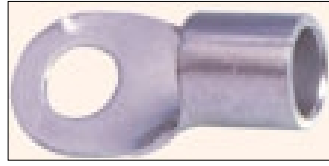


그림 7. O형 터미널

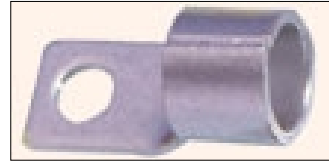


그림 8. 각형 터미널

비상시를 대비해서 과부하 차단기(NFB)를 설치하여 다른 곳의 전원 사용에 영향을 미치지 않도록 했으며, 실험에 이용되어질 부하의 설정에 있어서는 3고조파의 영향을 고려하여 회전기기는 사용할 수 없으므로, 이 시험을 하기 위해서 순수한 저항이나 백열전구를 이용한 진동부하를 사용할 것이다. 또한, BPF를 통해 증폭되어진 파형은 오실로스코프를 통해 나타낼 것이며, 파형 기록기(Recorder)를 이용해서 데이터를 추출할 것이다.

4. 결론 및 기대효과

원전 전력케이블은 그 수명에 있어 현재 국내외적으로 지속적인 상태 감시가 필요한 상태이다. 또한 원전 전력케이블을 비롯한 지중 전력케이블의 신뢰성에 대한 관심이 높아짐에 따라 전력을 안전하고 신뢰성 있게 공급하기 위하여, 열화 및 노후된 케이블의 효율적인 교체 시기를 예측하는 것이 중요하게 대두되고 있다. 원전 전력케이블에서 발생한 고장에 대해 빠르게 파악하는 것은 매우 중요하지만 보다 큰 사고가 발생하기 전 케이블 상태를 파악하여 적절한 시기에 교체를 하는 것은 전력공급의 신뢰성 향상에 있어 중요한 부분을 차지한다.

본 논문에서 제안한 주파수를 이용한 케이블 상태감시 방법은 여러 가지 측면에서 원전 전력케이블의 상태감시 방법에 있어 매우 효과적인 것으로 사려되며, 기타 다른 용도로 쓰여지는 전력케이블에 대해서도 적용 가능할 것이라 생각된다.

5. 참고문헌

- [1] 김복렬, 구철수, 강윤식, 안상필, 김철환, “원자력발전소 케이블의 상태감시 기법 연구동향”, 전기학회지, vol. 50, No. 1, pp. 31-39, 2001. 1.
- [2] 한국원자력안전기술원, “안전관련 케이블 상태 감시 방법에 관한 연구(위탁연구기관보고서)”, 2001. 3.
- [3] IAEA, “Assessment and management of ageing of major NPP components important to safety”, In-containment instrumentation and control cables, vol I, 2000. 12.
- [4] IAEA, “Assessment and management of ageing of major NPP components important to safety”, In-containment instrumentation and control cables, vol II, 2000. 12.
- [5] 김종석, “원전 케이블 노후화 진단기술”, 제 5회 원자력 안전 기술정보 회의, pp. 291-292, 1999. 12.
- [6] 한국전기연구소, 1998년 제2회 기술교육교재 “전력기기 절연진단 기술” pp. 12-16, 1998.

- [7] 기초전력공학공동연구소, “전기케이블 피막의 노화현상 규명을 위한 실험연구(최종보고서)”, pp. 22-26, 1999. 10.
- [8] 재료기술연구그룹 성능수명연구팀, 한국전력기술주식회사, “주요기기 수명 평가 및 노화관리 방안 분석(최종보고서)”, pp. 10, 2001. 3.
- [9] “절연열화진단시험방법”, 일본 전기학회 기술보고, 182호, 1984. 12.
- [10] “특별고압 CV케이블 절연 열화형태와 절연진단기술의 동향”, 일본 전기학회 기술보고, 668호, 1998. 2.
- [11] L. Simoni, “A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage”, IEEE Trans. on EI, vol. 16, pp. 178-189, 1981.
- [12] S. B. Pandey, “Estimation for a life Model of transformer Insulation under combined Electrical & Thermal stress”, IEEE Trans. on RE, vol. 41, No. 3, pp. 466-468, September 1992.
- [13] G. C. Montanari and A. Motori, “Electrical conduction measurements in Aged cable and compensation effect” IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 23-27, 1995.