

전기설비의 진단기술

1. 서론

전력수요에 따른 공급이 안정되면서 수용가는 보다 양질의전력을 요구하게 되고 따라서 전기설비의 장기간에 걸친 원활한 운용과 신뢰성확보가 매우 중요한 문제가 되고 있다. 더욱이 전력설비의 용량이 커짐에 따라서 사고시 그 파급효과가 커져서 정치, 사회 문제로까지 비화 될 수 있다. 이와 같은 사회적 요청에 따라 전기설비를 합리적으로 유지 보수함으로써, 안정성과 신뢰성을 확보하며 사고를 미연에 방지하는 것은 매우 중요하며, 이때 전력공급의 중단 없이 설비의 이상 유무를 진단, 감시하기 위한 기술이 활발히 연구되고 있다.

발전기와 같은 전력설비는 회전부분이 있어서 고장날 가능성이 큰 만큼 유지보수에 많은 관심을 기울이고 있으며 예방보수에 역점을 두어서 1년에 한번은 고장이 없더라도 정지 시킨 다음 분해, 검사를 하고 재조립하는 과정을 거친다. 그러나 변압기는 정지기기로서 고장이 잘 나지 않는 설비여서 예방보수 보다는 고장이 나면 교체하기위한 예비변압기를 준비하는 정도이고, 절연열화를 검사하기 위한 유중가스분석이 고작이었다. 그러나 80년대 들어서면서 우리 나라에서도 변압기 고장율이 급격히 증가하면서 전력용 변압기의 예방진단에 관하여 관심을 갖기 시작하였으며, 본 고찰은 전력 설비중에서 변압기의 진단기술에 관하여 초점을 맞추고자 한다.

2. 국내 연구 동향

2.1 전력공급의 신뢰성과 변압기 사고 증가

정밀공업의 발달도 양질의 전력에 대한 욕구가 크게 증가함에도 80년대 중반까지도 국내에서는 변압기의 예방보수에 큰 관심을 보이지 않았다. 그러나 전력용 변압기의 사고가 잦아지면서 이에 대한 대책수립을 시작하였으며 1988년부터 전기연구소가 주가 되어 전력용 변압기의 사고 유형과 원인을 분석하기 위한 연구가 진행되었다.[A1]

2.2 설비 유지보수 기술의 동향

2.2.1 설비유지보수의 발달

설비 유지보수의 기법에는 설비가 사용 가능하게 함과 동시에 건전한 상태로 유지되어야 한다는 관점에서 과거에는 설비 또는 부품이 파손되면 수리하고, 교환한다는 “사후보수”의 생각이 일반적이였다. 그러나 설비의 대형화, 고속화가 추진되어 그 가동률도 대폭 높아지게 됨에 따라 “사후보수”로서는 생산성을 향상시킬 수 없게 되었다. 따라서 현재 적용되고 있는 보수개념은 “예방보수”이다. 예방보수의 사고방식은 1925년경 미국에서 생겨났고, 그후 “생산보수”, “개량보수” 등 여러 가지 보수기법들이 제안되었는데 이것을 연대순으로 나타내면 표 1과 같다.

표 1

내부사고유형	원인	수용예비진단기법	원리	비고
기계적 권선 탈락 왜형	과도한 고장전류에 의한 전자력으로 발생하는 권선이완, 진동, 탈락 및 왜형	· 저압 Surge법	변압기 단자에 저압 Surge를 인가하여 그 응답 파형을 분석함. 권선탈락 왜형검출	활선상태에서 시험불가
		· 진동신호 분석에 의한 예방 진단	철심자화에 따른 철심 진동, 부하전류에 의한 전자력에 기인한 권선 진동 현상을 정밀분석, 권선이완 왜형검출	On-line 가능
열적과열	권선 용접불량, 제작 불량 등에 기인한 국부적 과열개소와 변압기 과부하에 의한 온도과도 상승으로 절연물 탄화	유중용해 가스 분석	유중 용해가스 분석을 통해 내부과열 개소, Arcing 유무 예측가능	· 운전중 Sample 채취가능 · On-line 감시시스템 개발중
적기적 절연파괴	뇌현상 및 차단기 개폐시 발생하는 -고체절연물 열화 -절연유 열화	· 절연유 수분 침적률 측정 (Double Tester)	절연유 수분 및 침적률을 측정하여 절연유 열화정도 판정	
		· 부분방전 측정	변압기 내부의 미세한 Corona 발생을 감지하여 기준치와 비교	On-line 감시시스템 개발중
		· 유중수소농도 감시법	절연지등 고체절연물의 열분해시 발생하는 유중 수소가스의 함유량 측정	

의 패턴은 8[%]에 지나지 않는다는 보고가 있다. 또한 후자에 속하는 형태의 설비 중 예방보수가 오히려 무의미할 뿐만 아니라 66[%]은 오히려 유해하다는 결과를 얻었다고 한다. 모든 설비가 이와 같은 비율로 되는 것은 아니나 적어도 이와 유사한 값을 갖는 설비에 대해 “시간을 기준으로 한 보수방식(TBPM)”만을 적용한다면 이것은 재검토되어야 할 것이다.

설비에 대해 열화상태나 고장의 유무를

보수기법의 변천에 따라 설비고장의 검출 또는 예측기술 등 보수기술이 개발되기 시작하였으며, 보수에 대한 관심도 세계적으로 높아지게 되어 여러 분야에서 보수기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

2.2.2 설비유지보수 기술의 동향과 과제

설비유지보수 기술에는 설비의 안전확보 및 이용율 향상, 보수비용의 절감과 설비의 보수를 위한 운영정지 감소(정전시간감소)가 주요한 과제로 되고 있다. 현재의 보수기술자들의 관심사는 설비의 보수를 실시하는 시점(Timing) 및 합리적 보수방법을 결정하기 위해 적용되는 “설비진단기술”에 있다. 그러나 설비를 항상 적절한 상태로 유지하여 될 수 있는 한 보수(수리)를 하지 않도록 하는 무보수(Maintenance Free) 기술이 가장 바람직하다. 무보수 기술은 설비 필수품의 내스트레스성을 향상시키고, 각종 스트레스를 감소시키며, 유지, 보수활동을 통해서 설비의 수명연장을 도모하기 위한 기술체계라고 말할 수 있다. 그러나 설비의 완전한 무보수가 실현되기까지는 많은 시간이 소요될 것이다.

현재 보수기법의 주축이 되고 있는 “예방보수”는 주로 Preventive Maintenance)이다. 이것은 설비의 열화가 시간에 따라 진행된다는 가정에 기초를 두고 있다. 그러나 설비의 열화패턴에 있어서 예방보수가 유효한 것은 시간과 함께 고장 확률이 증가하는 설비(부품)뿐이고, 고장확률이 시간의 경과에 따라 변화가 없거나 또는 감소하는 설비에 대해서는 이 방식은 무의미하게 된다. 항공기의 부품에 대한 분석자료에 의하면 후자에 속하는 형태의 패턴이 92[%]이고, 전자에 속하는 형태

관찰하여 그 결과에 따라 보수를 실시할 필요가 있으며, 이와 같은 보수 기법 즉 “상태기준보수”를 뒷받침하는 중요한 기술이 곧 “설비진단기술(CDT:Condition Diagnosis Technique)”이며, 미국, 유럽 및 일본 등에서는 1970년대 초부터 이 분야에 대해 많은 투자와 연구가 진행 중이다.

설비진단기술	연도	설비 보수방식	비고
	-	사후보수 (BM:Breakdown Maintenance)	고장나면 수리, 교환
	1925	예방보수 (PM:Preventive Maintenance)	정기적인 점검 및 부품교환하는 시간기준 예방보수 (TBPM:Time Based PM)
	1955	생산보수 (PM:Preventive Maintenance)	생산성 향상을 목표로 하는 설비의 보수
	1959	개량보수 (CM:Corrective Maintenance)	설비의 개량을 중요시한 보수
	1961	보수예방 (MP:Maintenance Prevention)	설비단계에서부터 신뢰성, 보수성 향상을 고려
제 1 세대 (진단기술의 연구개발단계)	1971	예지보수 (PdM:Predictive Maintenance)	설비열화상태의 감시에 의한 보수
	1972	상태기준보수 (CBM:Condition Based Maintenance)	설비의 상태를 파악하여 그것에 근거한 보수
제 2 세대 (진단기술의 실용화)		"	"

2.3 진단기술의 동향

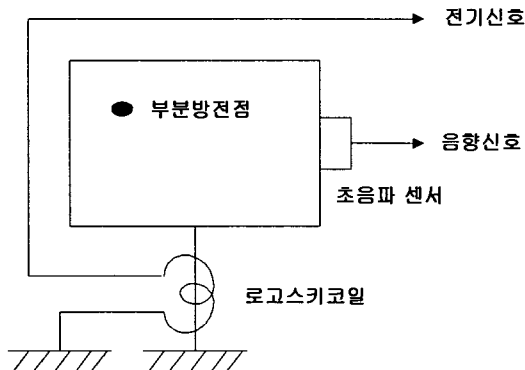
변압기에 이상이 있을 시 혹은 이상이 발생할 가능성이 있을 시에 곧 바로 경보를 발할 수 있으려면 상시감시 체제구축이 필요하다. 변압기의 사고는 애자의 파손과 같이 외부에서 육안으로 관찰 가능한 것도 있

지만 외함 내부의 사고를 탐지하는 것이 중요하다. 내부사고 유형별 원인 및 주요 예방진단 기법은 표(1)과 같다.[A1,A14]

여러 가지 예방진단 기법 중에서 상시감시 체제 구축이 집중적으로 연구되고 있는 것은 (1)유증가스 분석법 (2) 부분방전 측정법 및 (3) 진동신호 분석법이다. 위에서 처음 두 가지 방법은 절연열화 상태를 측정감시하기 위한 것이고, 세 번째 것은 철심이나 권선에 변형이 발생했는지를 감시하기 위한 것이다. 또한 유증가스 분석법은 열화 상태에 따른 유증가스의 변화에 대한 연구는 이미 실용화되었으므로 측정 탐측자의 개발에 초점이 맞추어지고 있으며 마지막 두가지 기법은 탐측자 개발보다는 측정값을 분석하여 이상상태를 예측하는 기술 개발에 보다 초점이 맞추어지고 있으며 다음 장에서는 이들 방법에 대하여 상술하고자 한다.

3. 부분방전 측정에 의한 변압기의 절연상태 진단.

변압기 내부 권선 사이에 절연 상태가 좋지 않으면-절연 열화가 진행되면- 절연과파가 일어나기 전에 부분방전이 발생하게 된다. 부분방전은 절연체나 변압기유에 화학반응을 일으켜 변압기유에 포함된 개스의 양과 분포를 변화시킨다. 이를 검출하여 분석함으로써 변압기 내부의 절연상태를 진단하는 기법이 유증가스 분석법이고 이미 실용화되어 모든 전력용 변압기에 대해 정기적으로 자료를 수집하고 있으며 50%이상의 정확한 진단을 하고 있으나 적합한 탐측자가 없어서 흠이다. 이와는 달리 부분방전이 발생되면 임펄스 전류가 중성선에 흐르게 되고 초음파를 발생하게 된다. 따라서 중성선에 흐르는 임펄스 전류를 탐지하거나(전기 신호 측정법) 발생한 초음파를 탐지함으로써(음향신호 측정법) 변압기 내부에서 발생하는 부분방전을 탐지할 수 있다. [A5,A6,A7]



그림(가). 부분방전 측정개념도

3.1 전기신호측정법

부분방전에 의한 전하 q 가 중성선을 타고 대지로 이동하게 되고 이에 의해 중성선에 임펄스 전류가 흐른다. 이 임펄스 전류는 상용주파수 전류에 매우 미약한 크기이나 로그스키코일을 이용하여 측정이 가능하다. 이 임펄스 전류를 측정하여 부분방전 발생여부를 진단하는 방법을 전기신호측정법이라 한다. 전기신호의 크기(적분값)는 부분방전량을 표시함으로 절연열화의 정도를 정확히 알 수 있으며, 부분방전발생 시간을 정확히 알 수 있는 이점이 있다. 그러나 부싱에서 발생하는 부분방전에 의한 임펄스 전류와 구분이 어려운 약점이 있다. 임펄스전류가 매우 작은 값이고 상용주파수의 중성선 전류는 평상시에 큰 값을 가질 수 있으므로 이를 분리하는 기술, 부싱에서 발생하는 부분방전에 의한 전류와 구분하는 기술 및 기타 변전소 현장에서 있을 수 있는 외부잡음과의 분리기술이 이 기법이 해결해야 할 애로기술이다.

3.2 음향신호 측정법

부분방전이 발생되면 초음파영역의 음향신호가 발생한다. 초음파탐지기를 변압기 외벽에 설치하여 측정할 수 있으므로 전기적으로 절연기 용이하고, 측정점의 이동이 가능한 장점이 있다. 그러나 우박이나 비가 와서 변압기 외벽에 충격을 주었을 때에도 초음파신호가 발생될 수 있으므로 외부잡음에 쉽게 노출되며, 부분방전에 의한 음향을 측정하는 방법이므로 부분방전의 전하량을 간접 측정하게 된다.

그림(A)은 전형적인 초음파신호의 파형으로서 발생한 임펄스 형태의 초음파가 변압기의 구조물에 반사되고, 감쇄되며 서로 간섭하여 나타나는 복잡한 양상을 보인다.[A5,A6,A7,A8,A9,A10]

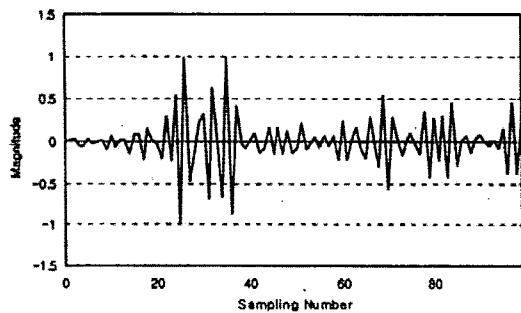


그림 A

그러나 일정크기 이상의 초음파 신호수와 전기신호수의 상관관계는 그림(B)와 같다. 그림(B)는 모의 변압기의 유증에 침대평판 부분방전장치를 설치하고 로그스키코일로 전기신호를 측정하고 동시에 초음파신호를 측정하여 얻은 결과이다. 그림(B)는 평판과 전극사이의

방전전압이 12[kV]인 경우이고 그림(C)는 평판과 전극 사이의 거리를 변화시켜 방전전압을 변화시키면서 측정된 결과이다. 그림(B)와 그림(C)를 보면 음향신호(AS count), 전기신호(ES count) 및 방전량(E.PD) 상이에 상관관계가 있음을 알 수 있으며 탐촉자의 탈착이 용이한 음향신호 측정법이 될 수 있음을 확인할 수 있다.[A3,A4,A5]

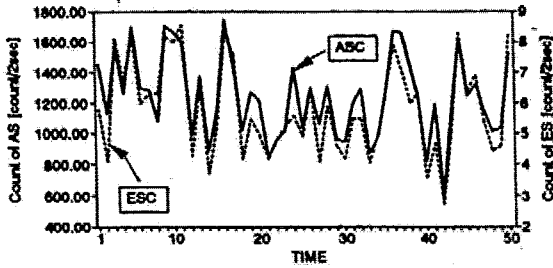


그림 B

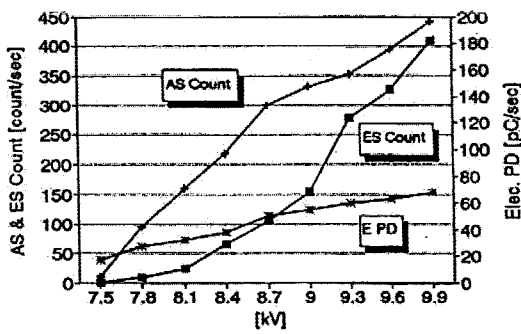


그림 C

3.3 부분방전의 위치측정

부분방전이 발생할 때 부분방전의 위치를 알 수 있으면 다음과 같이 2가지 이득이 있다.

첫째, 발생한 부분방전이 변압기 내부에서 발생되었는지 외부에서 발생되었는지를 알 수 있다. 즉, 전기신호나 음향신호는 매우 미소한 양이므로 측정시 신호보다 더 큰 외부 잡음이 혼입될 수 있으므로, 정확한 위치를 측정할 수 있으면 잡음인지 내부 부분방전에 의한 신호인지를 판단할 수 있다.

둘째, 정확한 위치를 알 수 있으면 수리시에 시간과 경비를 절약할 수 있다.

부분방전의 위치를 측정하기 위하여 처음 사용된 방법은 전기신호와 음향신호를 동시에 측정하여 (그림(가) 참조) 그림(D)와 같은 파형을 얻는다. 전기신호는 광속으로 전달되므로 전기신호가 탐지된 시간을 부분방전 발생시간으로 추정한다. 음향신호는 유중에서 온도에 따라 약간 변화는 있지만 대략 1500[m/s]의 속도로 전파된다. 따라서 전기신호와 음향신호의 탐지시간차이가 부분방전점에서 음향신호 탐촉자까지 음향신호가 전파

되는 시간이 되므로 그 거리를 계산할 수 있게 된다. 음향신호 탐촉자를 옮기면서 3개 이상의 거리측정이 되면 입체공간에서의 위치결정이 가능하게 된다.[A8,A9]

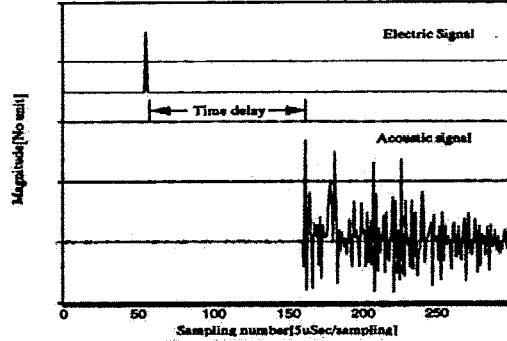


그림 D

부분방전의 발생위치를 측정하는 방법으로서 음향신호-음향신호 측정법이 많이 연구되고 있다. 이는 음향신호 탐촉자는 앞에서 언급한 바와같이 탈착이 용이하고 전기적으로 완전 분리된 측정 법이기 때문이다.

그림(E)는 평면인 경우 음향신호-음향신호법을 설명하는 개념도이고 그림(F)는 대표적인 측정된 신호파형이다. 그림(F)에서 시간차이를 정확히 측정할 수 있으면 방전점과 탐촉자와의 거리차이가 정확히 계산된다. 그러면 탐촉자의 위치 (a_1, a_2) 와 (b_1, b_2) 는 알고 있는 값이므로 부분방전이 발생하는 위치 (x, y) 를 계산할 수 있다. 또한 이 방법을 확장하면 3차원 공간에서도 위치측정이 가능하게 된다. 이때 잡음신호에 의한 측정오차를 줄이기 위해서 상호상관법이 사용되며, 측정신호의 자료길이를 잘 선택하지 않으면 반사파에 의한 허상이 나타나서 또 다른 오차의 원인이 되기도 한다.

최근에는 부분방전 발생점이 여럿일 때 신호원의 수와 위치를 측정하기 위한 연구가 진행되고 있다. 통신분야에서는 이미 많이 사용되고 있는 도착방향(direction of arrival:DOA) 측정법을 사용하며 모의실험 결과 그 가능성이 충분함이 밝혀졌으며[A2] 앞으로 이 방법이 실용화되면 잡음에 의한 허상은 보다 정확히 제거되므로 방전량측정에 의한 변압기의 열화진단기술의 신뢰성을 한층 높일 수 있으리라 기대된다.

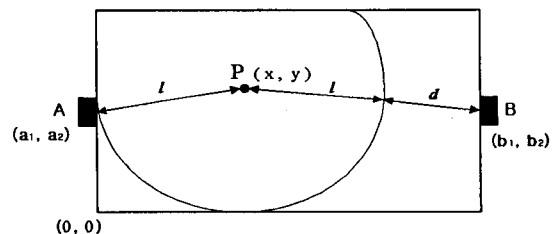


그림 E

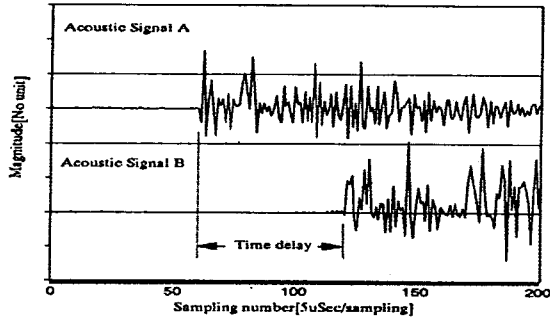


그림 F

4. 진동신호 측정에 의한 변압기 예방진단

변압기는 전자력에 의한 권선과 권선 사이의 인력과 척력에 의한 권선의 진동 및 표류부하손에 의한 철심의 진동에 의해 음성신호영역의 진동을 갖는다. 권선의 진동은 전류의 전자력에 의한 진동으로 120Hz를 기본 파로 하며 철심의 진동은 전압이 원인인 표류부하손에 따른 진동으로 권선의 진동과는 달리 보다 복잡한 형태의 진동 파형을 갖는다.[B1,B2,B3]

그런데 발생된 진동신호는 권선, 철심 및 외함의 기계적 구조에 의해 공명을 일으키면서 변형되고, 따라서 권선이나 철심이 전자력에 의해 변형이 생기면 진동신호에도 변화가 발생하게 된다. 그림(G)은 진동신호를 측정하여 변압기를 예방진단할 수 있는 기구도이다.[B12]

그림(G)에 의하면 측정된 진동신호는 진동모형을 만들고 그 이전 모델의 출력과 비교되면서 경향의 변화를 관찰함으로써 권선이나 철심에 변형이 생겼는지를 판단하게 된다.[B4,B5]

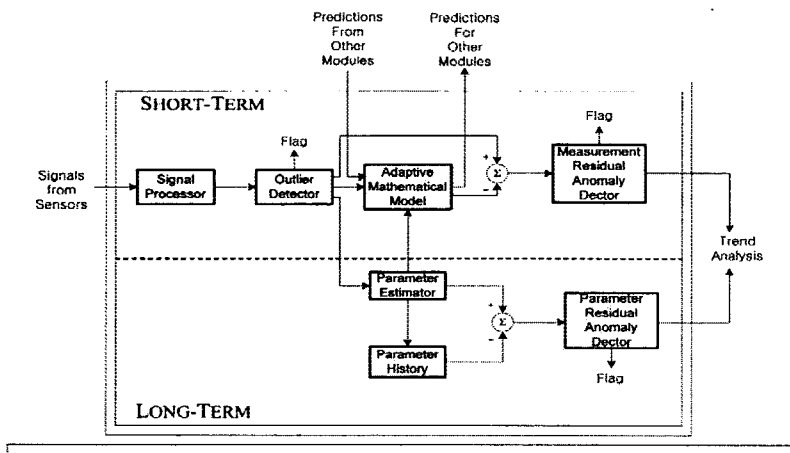


그림 G

4.1 진동모형

그림(G)의 모형을 처음 사용한 MIT연구진은 다음과 같은 선형모형을 사용하였다.

$$v_{\omega} = Bv_c + Cu_{\omega} + Du_{\omega}T_{\omega}$$

v_{ω} : Complex-Fourier components of winding vibration harmonic

B : Parameters multiplying harmonics core vibration

v_c : Complex-Fourier components of core vibration harmonics

C : Parameters multiplying harmonics of winding-current(squared)

u_{ω} : Complex-Fourier components of winding-currents(squared)

D : Parameters multiplying harmonics of temperature-compensated

T_{ω} : Winding interior temperature

그러나 온도가 일정이상 올라가면 세 번째 항에서 오차가 커지고 더욱이 권선에 진동탐측자를 붙여야 하는 기술적 어려움으로 인하여 그 이상의 연구가 진행되지 못하였다. 그러나 숭실대학교의 연구팀은 위의 모형대신에 보다 단순한 AR모형으로 고장 전후 모형이 달라짐을 확인하였으며[B1,B2] 그림(H)은 AR모형의 첫 번째와 두 번째 계수의 단락시험 전후의 값이다.

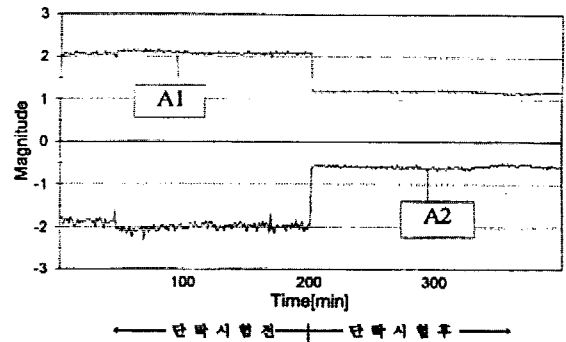


그림 H. a

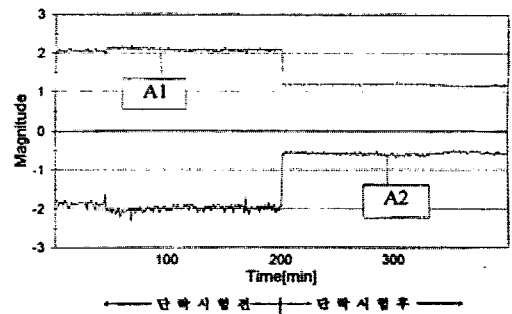


그림 H. b

그림(H)에서 보는 바와 같이 권선의 진동신호나 철심의 진동신호 모두가 단락시험 전·후에 크게 달라짐을 확인할 수 있다.

4.2. 진동신호에 의한 변압기 고장 판별

진동신호의 변화를 감시하여 그 경향의 변화를 내부 구조(권선과 철심의 모양)가 변형되었는지를 판별할 수 있음을 알았으나 위의 진동모형을 사용하는 방법으로는 고장판별이 어렵다. 그 이유는 진동신호는 전압, 전류 및 온도의 함수로서 실제 변압기의 사용상태는 위 3개의 변수가 모두 수시로 변화하기 때문에 기준설정이 어려운점이다. 몇몇 연구진이 측정된 진동신호를 정격전압, 정격전류 및 기준온도로 환산하는 진동모형을 제시했으나 [B1,B12] 실제 운전상태에서 흔히 발생할 수 있는 높은 온도에서는 측정이 불가능했으므로 75℃ 이상에서는 그 방법은 실용성이 없다. 이런 단점을 극복하기 위한 연구가 진행되었으나. 그림(i)과 같은 분석이 그 첫 시도이다. [B7,B8]

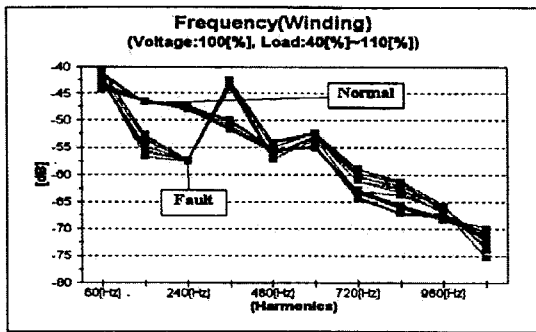


그림 1. a

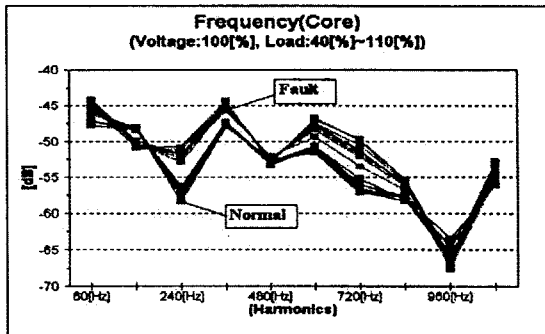


그림 1. b

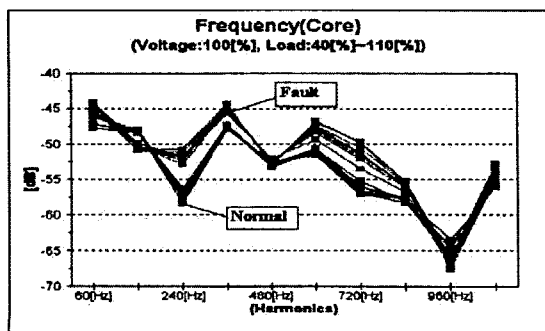


그림 1. c

그림(i)은 일정전압에서 부하를 변화시키면서 권선, 철심 및 외함에서 측정된 신호를 고조파 성분별로 겹쳐서 그린 것이다. 권선에서 측정된 진동신호인 경우에는 기본파(120Hz), 2고조파 및 3고조파에서 고장전후에 뚜렷한 차이점이 있으며 철심에서 측정된 진동신호는 제 2고조파와 제 3고조파에서 고장전후에 차이점이 있다. 외함의 경우는 권선이나 철심에서 발생된 진동신호가 여러 경로를 타고 전달됨으로서 진동신호가 변형이 생기겠지만 그림에서 보는 바와 같이 기본파와 제2고조파에서 차이가 있음을 알 수 있다. 그림(j)은 부하를 60% - 100%, 전압을 80% - 100%로 변화시키면서 권선에서 측정된 진동신호의 기본파를 중첩해서 그린 것이다. 전압이나 전류가 변화하여도 고장 전, 후의 차이가 어떤 경계선을 사이로 뚜렷이 구분된다. 이 경계선을 함수로 만들면 고장 판별함수가 될 수 있다. 앞에서 언급했듯이 높은 온도에서는 권선의 진동을 측정하는 것이 기술적으로 어려우므로 철심의 진동신호로 고장판별이 가능해야 실용화가 가능하다. 그림(k)은 그 가능성을 보여주는 것이라 하겠다.

실제 운전중인 변압기에 인가되는 전압은 정격전압의 5%를 넘지 않는다면 철심에서 측정된 진동신호의 고장판별을 위한 판별식을 주파수 성분에 따라 다음과 같이 얻을 수 있었다.

120Hz성분 : $V_{br} = 0.33V - 100.7$ [dB]

240Hz성분 : $V_{br} = 0.00099 V^2 + 0.05549V - 19.42$ [dB]

360Hz성분 : $V_{br} = -0.003 V^2 + 0.485V - 34.5$ [dB]

위 식은 전압V가 정격전압의 95 - 105%범위에서 사용될 수 있다. 사용된 변압기가 바뀌면 위 판별식도 바뀌게 되므로 측정값을 추정하면서 정상상태의 변압기에서 측정된 신호가 주파수 성분별로 어떤 범위에 모여 있는가를 분석하면서 누적시키면서 고장발생시 이상유무를 판단해야 할 것이다.

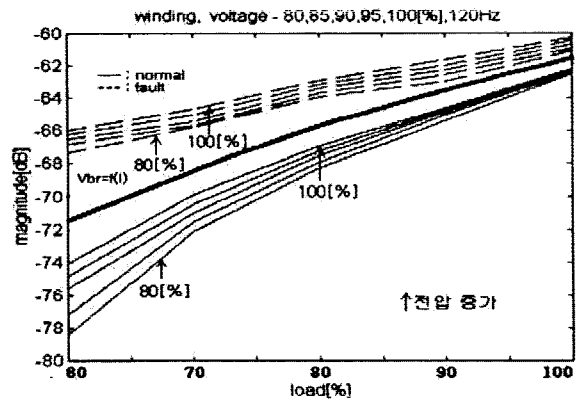


그림 J

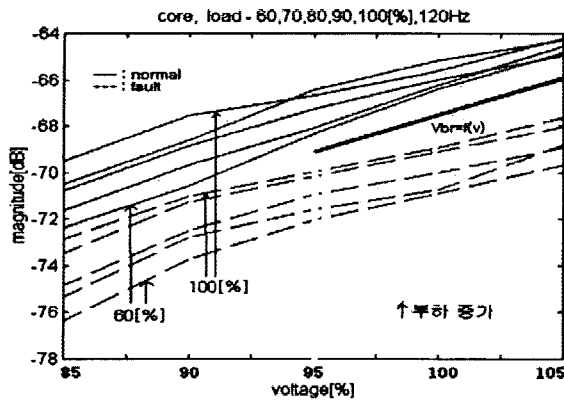


그림 K

5. 맺는말

지금까지 전력용 변압기의 예방진단 기술을, 절연열화에 대한 진단방법으로는 초음파음향신호 측정법을 중심으로, 기계적 점형에 대한 진단방법으로는 진동신호 측정법을 중심으로 살펴보았다.

변압기에 접속된 부하량이 많아지고 밀집되면서 변압기 가까운 곳에서 지락사고가 발생시 고장전류가 그만큼 커지고 따라서 기계적 변형에 의한 변압기 고장으로 이어질 가능성이 커진다. 또한 초고압으로 송전압이 높아짐에 따라 절연체의 전계강도가 높아지게 되며 이에 따른 절연열화에 의한 고장위험도 높아지게 된다. 통계에 의하면 변압기의 사고중에서 345[Kv]급 변압기는 전자와 후자의 비율이 6:4정도이고 765[Kv]으로 되면 4:6으로 된다. 어느 경우에도 사고에 의한 파급효과를 검토 못한것이 아쉽다. 이 분야에 대한 진단법 연구도 활발히 진행되고 있음을 언급해 두고자 한다.

참고문헌

(PD 관련 참고문헌)

[A1] 설비 예방진단 기술 워크샵, 설비진단센터, 숭실대학교 생산기술연구소, 1996. 2. 8.
 [A2] 유치형, 정찬수, 김재철, "부분방전 신호의 위치추정", 조명·설비학회지, 11권, 5호, pp. 80-85
 [A3] "변압기 예방진단 기술 - 그 현황과 전망" 1998.8 숭실대학교 전기공학과 자동제어연구실
 [A4] 정찬수 외 5명, "부분방전 신호와 잡음의 분리", 조명·전기설비학회논문지, 제13권, 제1호, pp. 21-30, 1999.2
 [A5] 정찬수 외 6명, "초음파 센서를 이용한 변압기 부분방전 기술 연구", 조명·전기설비학회논문지, 제3권, 제2호, pp. 46-53, 1994.4
 [A6] 권동진, 광희로, "변압기 예방진단을 위한 초음파 신호 검출에 관한 연구", 조명·전기설비학회논문지, 제9권, 제6호, pp. 65-70, 1995.12

[A7] 권동진 외 3명, "초음파 신호 수의 이동평균에 의한 전력용 변압기 예방진단", *Trans. KIEE*, Vol. 45, No. 3, pp. 432-437, Mar. 1996
 [A8] 정찬수 외 4명, "상호상관법을 이용한 변압기 내의 부분방전 위치 측정", 1992년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, pp. 934-937, 1992.7
 [A9] 정찬수 외 3명, "초음파 신호 측정에 의한 변압기 내의 부분방전 위치 측정", 1992년도 한국음향학회 학술회의 논문집, pp. 87-90, 1992.11
 [A10] 정찬수 외 3명, "초음파-초음파 측정법에 의한 변압기 내의 부분방전 위치 측정", 1992년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 327-329, 1992.11
 [A11] 정찬수 외 2명, "Locating the PD source in power transformer using cross-correlation", *한국음향학회지*, 제9권, 제1호, pp. 73-79, 1993.7
 [A12] 정찬수 외 2명, "PD 위치검출을 위한 초음파 PD 신호의 상호상관 계산기법", *한국음향학회 음성신호 및 신호처리 워크샵*, 10-1, pp. 153-156, 1993. 8
 [A13] 정찬수 외 2명, "부분방전 위치 측정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제B권, pp. 468-470, 197.7
 [A14] 정찬수, "On-line Estimation of Partial Discharge Location in Power Transformer," *Journal of Electrical Engineering and Information Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 45-51, 1996
 [A15] 정찬수 외 3명, "Improvement in the correlation method for locating PD transformer," *Dielectric Diagnostics of Power Apparatus*, pp. 53-64, 1993.11
 [A16] T. Bertula et. al., "Partial discharge measurement on oil-paper insulated transformers," in *CIGRE*, pp. 12-07, 1968
 [A17] Channakesheva et. al, "Studies on partial discharge measurement in transformer windings," in *CIGRE*, pp. 12-09, 1982
 [A18] F. Vaile et. al., "Study of a correlations between for energy of partial discharges and degradation of paper-oil insulations," in *CIGRE*, pp. 15-12, 1982.
 [A19] T. H. Crowley et. al., "Expert systems for on-line monitoring of large power transformers," in *EPRI Conference on Expert Systems Applications for the Electric Power Industry*, 1989
 [A20] A. T. Thoeng, "Some aspects of the traveling wave detection method for locating partial discharges in transformers," *Proc. CIGRE*, pp. 12-02, 1968
 [A21] S. Haraldsen and K. Winberg, "Investigations on different partial discharge locating methods on power transformers," *Proc. CIGRE*, pp. 12-09, 1968
 [A22] A. Veverka and A. Hon, "New method of location of internal discharges in transformers," *Proc. CIGRE*, no. 109, pp. 1-9, 1966
 [A23] R. T. Harrold and A. M. Sletten, "Corona location in transformers by radio frequency spectrum analysis, part I: Theory," *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1584-1590, 1970
 [A24] R. T. Harrold and A. M. Sletten, "Corona location in transformers by radio frequency spectrum analysis, part II: Applications of technique and results of

measurements," *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1591-1599, 1970

[A25] R. E. James et. al., "Interpretation of partial discharge quantities as measured at the terminals of hv power transformers," *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, pp. 629-638

[A26] J. H. Carpenter et. al., "Ultrasonic corona detection in transformers," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 647-651, 1965

[진동관련 참고문헌]

[B1] 이성호 외 7명, "변압기 권선진동의 모형화 연구," '94 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 216-218, 1994.7.21 - 23.

[B2] 변압기 권선 고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발 연구 발표회, 한국전력공사 기술연구원

[B3] 정찬수 외 2명, "변압기 진동 소음의 모형화," 한국음향학회 음성신호 및 신호처리 워크샵, 10-1, pp. 149-152, 1993. 8

[B4] 정찬수 외 1명, "부하전류 변화에 대한 변압기 권선의 진동분석에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 54-57, 1994.8

[B5] 정찬수 외 3명, "변압기 기계적 권선변형에 따른 진동신호 특성변화," 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 39-42, 1995.3

[B6] 정찬수 외 3명, "단락시험 전·후의 변압기 진동신호 특성," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1359-1361, 1995.8

[B7] 정찬수 외 3인, "변압기 사고검출을 위한 진동 신호 연구," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 493-495, 1995.11

[B8] 정찬수 외 1명, "진동신호분석을 이용한 변압기 고장판별법 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제B권, pp. 1152-1154, 1996.7

[B9] Lackey, J.G., and Palmer, S., "Transformer Core Vibrations," *IEEE Power Engrg. Society Winter Meeting*, 1977, Paper A77117-5

[B10] Lavalle, J.C., *Failure Detection in transformers Using Vibrational Analysis*, Master Thesis, MIT, Department of Electrical Engineering, 1986

[B11] Swihart, D.O., Wright, D.V., "Dynamic Strifness and Damping of Trans -former Pressboard During Axial Short-Circuit Vibration," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 95, No. 2, March-April 1976, pp. 721-730

[B12] Transformer Monitoring Using Vibration Analysis Volume I, Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems and Energy Laboratory Electric Utility Program, MIT, August 16, 1989

[B13] "CIGRE International Survey on failures in Large Power Transformers in Service," *Electra*, No. 88, May 1983

[B14] Holt, C., "The Influence of Stress on the Harmonic Content of the Magnetostriction Loop and its Relevance to Transformer Noise," *IEE Conference of Magnetic Materials and their Applications*, 1967, pp. 96-100

[B15] Coquard, A., "The Magnetic Sources of Transformer Noise," *IEE Conference of Magnetic Materials and their Applications*, 1967, pp. 101-104

[B16] Hiraishi, K., et al, "Mechanical Strength of Transformer Windings Under Short-Circuit Conditions," *IEEE Trans. of Power Apparatus and Systems*, Vol. 90, September 1971, pp. 2381-2390

[B17] McNutt, W.J., et al, "Transformer Short-Circuit Strength and Standards - A State of the Art Paper," *IEEE Trans. of Power Apparatus and Systems*, Vol. 94, No. 2, March-April 1975, pp. 432-443

[B18] Waters, M. , "The Measurement and Calculation of Axial Electromagnetic Forces in Concentric Transformer Windings," *IEE Proceedings*, Vol. 101, Part II, No. 79, February 1954, pp. 35-46

[B19] Kirtley, J.L., Lavalle, J.C., and McCarthy, D.J., "Acoustic Monitoring of Transformer Structures," *Cigre Symposium on New and Improved Materials for Electrotechnology*, Conference Record, Paper 820-03, Vienna, May 1987

제 자 소 개



정찬수(鄭讚壽)

1949년 8월 10일생. 1972년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수.