

혁신적인 오일 센서 시스템으로 절연유의 유전체 파라미터에 대한 심층적인 온라인 분석 :

고장을 감소 및 수명 향상을 위한 고압 변압기의 주요 작동 상태 확인

(Deep online analysis of dielectric parameters of insulation oils with an innovative oil sensor system: Identification of critical operation conditions of high voltage transformers for reduction of failure rates and live time enhancement)

Manfred R. Mauntz¹, Dr. Jörn Peuser²

¹ CMC Instruments GmbH, Eschborn, Germany
mrm@cmc-instruments.de

초록

재생가능 에너지 분야에서 육상 및 해상 풍력발전 터빈에 설치된 고압 변압기 및 대형 산업용 변속기(gearbox)에 대한 요구사항이 증가하고 있다. 동시에 이들에 대한 최고의 작동 신뢰성과 긴 수명 부분에 유연성이 훨씬 더 많이 요구되기 때문에 오일 및 오일 상태 모니터링에 대한 요구사항도 그에 따라 증가하고 있다. 이 자료는 두 가지 에너지 부문에서 언급된 우선사항들에 대한 솔루션을 제공할 수 있도록 새로운 온라인 오일 상태 모니터링시스템에 대한 정보를 줄 것이다. 고압 변압기에 초점을 맞추고 있지만 하이브리드 분야(전기차)에서의 절연유 모니터링에 적용 가능성 또한 다루었다.

키워드 : Oil condition monitoring, oil aging, condition based maintenance, minimizing failure rates, high voltage transformers, industrial gearboxes, smart grids, industry 4.0

1. 도입

온라인 오일 센서 시스템은 전도도(κ), 유전상수(ϵ_r) 및 온도(T)를 서로 독립적으로 측정한다. 오일 조성물의 전도도 및 유전상수의 작은 변화도 매우 정확하고 감도가 아주 좋은 측정 방법에 기초하여 신뢰적으로 측정할 수 있다. 새로운 센서 시스템은 산업용 변속기, 고압 변압기 및 전기차용 시험설비(test rig)의 적절한 작동 조건을 효과적으로 관리해준다. 여기서 오일은 윤활과 절연이라는 이중 기능이 있다.

이 시스템은 임계 작동 상태에 대한 사전 경고를 통해 고압 변압기의 손상을 예방할 수 있게 해주고, 전기전도도, 유전상수, 손실계수($\tan \delta$) 및 오일 온도를 높은 시간 해상도로 정밀하게 측정하여 파라미터 트렌드를 알 수 있게 해준다. 실제로 손상이 발생하기 전에 조치 또는 유지보수를 수행할 수 있다.

오일 상태 모니터링 센서시스템은 고압변압기 또는 풍력터빈 변속기 설치되는 즉시 측정데이터는 전체 온라인 상태 모니터링 시스템에서 표시되고 어디서든 평가가 가능하다.

운영하는 동안 시스템(변속기 또는 고압변압기)을 항시 실시간 모니터링 할 수 있으므로 엄격히 정해진 정기적인 검사 주기와는 별개로 특정의 예방차원의 상태 기반 유지보수를 할 수 있다.

2. 작동 원리

일반적으로 유지 보수 분야는 세 부문으로 나눌 수 있다 : 예방 유지보수(시간 기반), 지능형 유지보수(상태 기반) 및 사후 유지보수(고장시 실행), 이들은 각각 고장 횟수와 비용 간의 의존성이 서로 다르다. 그림 1은 다양한 유지보수 전략과 관련된 비용을 보여준다[1].

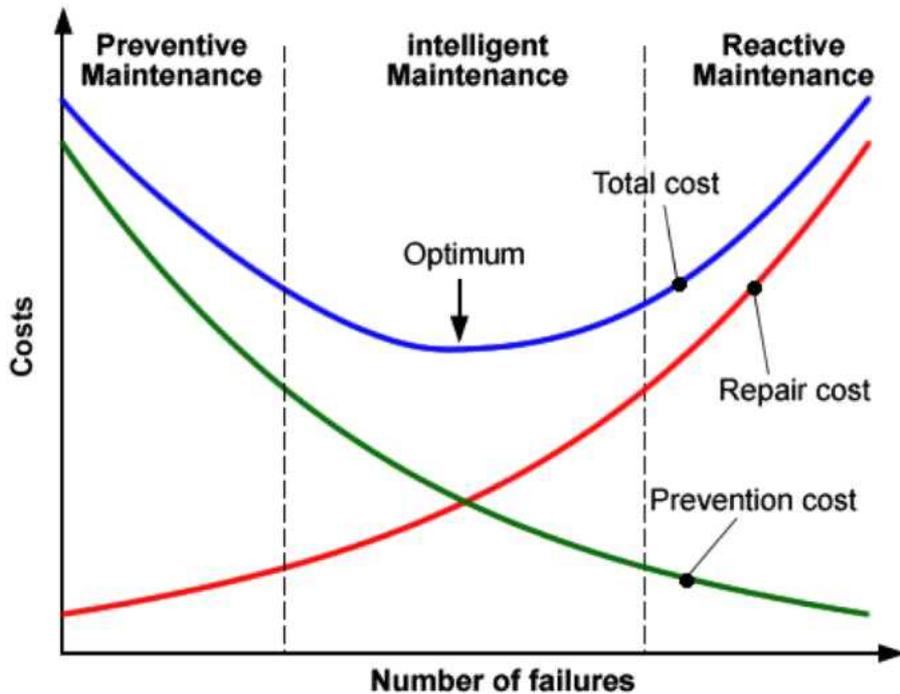


그림 1. 전통적인 유지보수 전략에 관련된 비용[1]

이 그래프에서 고장 횟수와 비용 면에서 최적 포인트는 지능형 유지보수 부문의 가운데 지점이다. 지능형 유지보수는 온라인 상태 모니터링 솔루션을 통해 실현될 수 있다. 지난 세월 동안 다양한 종류의 모니터링 시스템이 만들어졌다 : 온도, 수분, DGA. 이들 시스템 모두 모니터링하는 파라미터의 뚜렷한 변화를 필요로 한다. 이런 경우 장시간동안 임계 작동상태에 있게 되어 이미 손상이 발생했음을 의미한다.

여기서 소개된 온라인 진단 시스템은 오일의 특정 복합 임피던스 구성요소인 전기전도도(κ) 및 유전상수(ϵ_r)를 각각 독립적으로 측정한다. 예를 들어, 조립 시의 오염, 생성된 산, 알데히드 및 과산화물은 오일 오염도에 직접적인 관련이 있는 전기전도도를 증가시킨다. 이것은 슬러지를 형성시켜, 셀룰로오스 절연체를 공격하고 오일 흐름을 방해하며 변압기 내부에 열을 가두어 결과적으로 변압기를 고장나게 된다(그림 2 참조).

불순물의 측정 또는 오일의 품질 저하 및 화학적 노화의 준연속(quasi-continuous) 평가는 오일-변압기 시스템의 상태 변화에 대한 실시간 모니터링의 총체적 접근방식을 따른다. 오일 상태 모니터링 센서시스템을 고압변압기에 설치하면 측정데이터를 다른 곳에서 표시 및 평가할 수 있다.

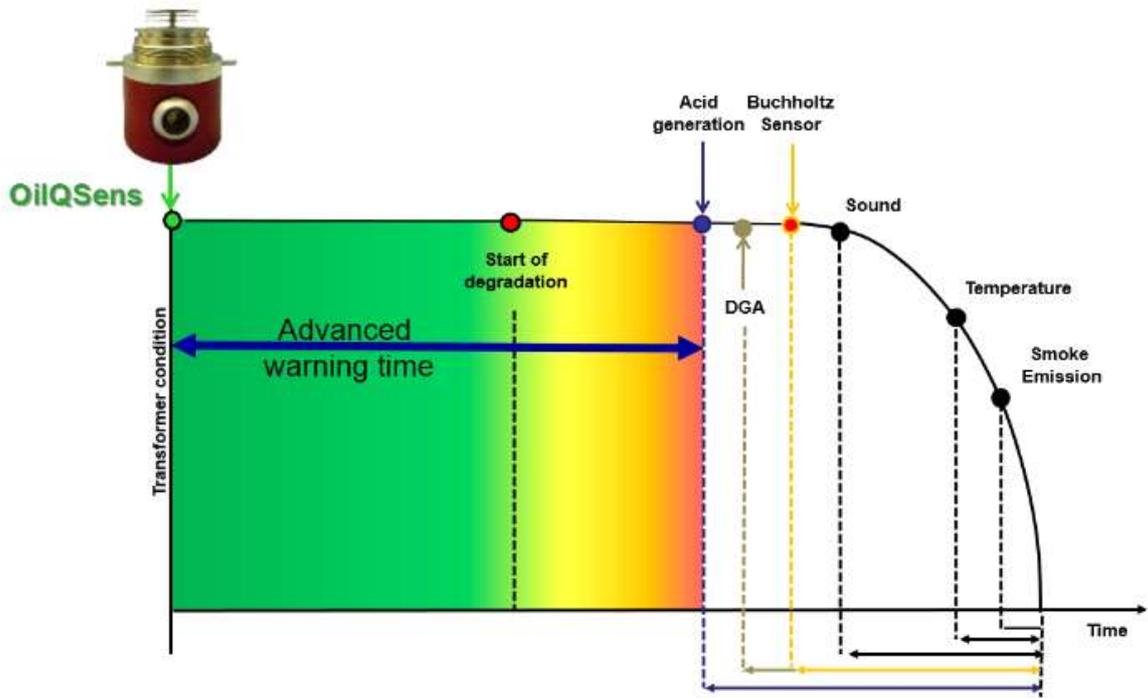


그림 2. 설치 첫날부터 조기에 사전 경고 시간, 기계 상태에 대한 트렌드 모니터링.

신호는 GSM, LAN, WLAN 또는 센서 장치의 직렬 인터페이스를 통해 웹 기반 상태 모니터링시스템으로 전송된다. 작동 중 손상메커니즘을 구성요소의 허용한계 이하로 모니터링하면 엄격히 정해진 검사 주기와 관계없이 특정적으로 예방 및 상태지향 유지보수가 가능하다[2-4].

전기 전도도 및 유전상수를 측정하기 위해, 베이스오일을 저항성물질 및 유전체로 사용하여 센서 어셈블리의 전기저항 및 정전용량(capacitance)을 결정하는 전극어레이(electrode array)에 오일을 통과시킨다. 그림 3은 삼중 플레이트 설계의 센서 전극어레이에 대한 상세 사진과 간략한 전자회로도를 보여주고 있다. 고감도 시간측정방법을 사용하므로, 센서시스템은 기존기술보다 훨씬 더 조기에 임계 작동 상태를 감지한다[5].

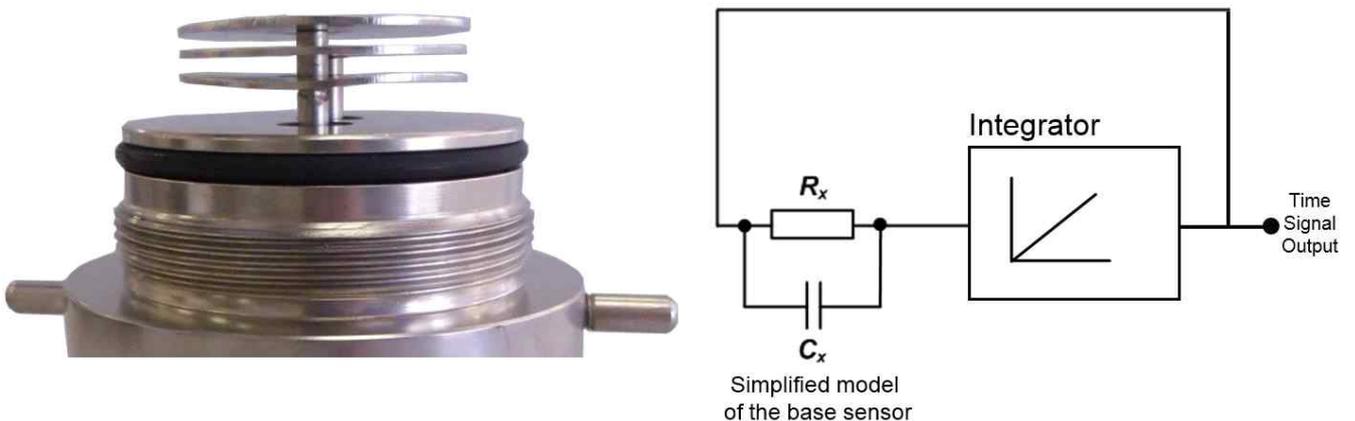


그림 3. OilQSens® 베이스 센서의 삼중 플레이트 디자인의 세부 사진 및 그에 해당하는 간략한 전자회로도

오일은 저항(R)이 매우 높고(몇 GOhm) 용량(C)이 매우 낮기 때문에 RC회로에서 AC값을 직접 측정하여 전도도와 유전율을 결정하는 것은 정확하지 않다. 이것은 높은 불확실성, 예러 및 저분해능을 초래한다. 전도도와 유전율 측정은 오일 내 영향을 추적하는 데 필요한 것이다. OilQSense® 시스템에서, 전기전도도(κ) 및 유전상수(ϵ_r)은 time/bandwidth가 높은 통합측정 기술에 기반한 정확도와 재현성이 매우 좋은 정밀 시간측정으로 결정된다: 전도도 측정범위는 0.1pS/m~10,000pS/m이고 분해능은 0.001pS/, 유전상수 측정범위는 1~5이고 분해능은 1×10^{-6} 이다.

오일은 전기도체가 아니다. 순수한 오일의 전기전도도는 0.5pS/m 이하이다. 오일의 변성과정과 오염물 생성은 절연유의 전도도를 변화시킨다. 이온농도와 이동도가 증가하면 전도도는 증가한다. 원래의 순수한 오일의 전도도가 극도로 낮은 것과 비교하면 거의 모든 불순물의 전기전도도는 높은 편이다. 전기전도도와 오일 오염도 사이의 직접적인 상관관계가 밝혀졌다. 오일 오염은 작동중인 오일의 전기전도도 증가에 의해 확인될 수 있다. 가설은 유전상수 변화로부터 수분의 변화를 선형 추세로 찾는 것이다. 손실계수(loss factor) $\tan \delta$ 는 전기전도도(κ)와 유전상수(ϵ_r), 진공 유전율(ϵ_0), 각주파수 $\omega=2\pi f$ 로부터 계산된다.

$$\tan \delta = \frac{\kappa}{\epsilon_r \epsilon_0 \omega}$$

수식을 온도에 독립적으로 표시하기 위해, 직접 측정한 값을 온도보상된 값 TC로 변환한다.

$$\tan \delta_{TC} = \frac{\kappa_{TC}}{\epsilon_{rTC} \epsilon_0 \omega}$$

3. 측정 정확도 및 온도 보상

이온 이동도 및 이와 유사한 전기전도도(κ)는 오일의 내부 마찰에 의존하고, 따라서 그 온도에도 의존한다. 오일의 전도도는 온도에 따라 증가한다. 오염의 유형과 그 온도 의존성은 아는 값으로 가정할 수 없다. 측정값의 비교가능성을 향상시키려면, 자체학습 적응형 온도보상 알고리즘이 필요하다. 비록 특정 오염이 측정할 수 없는 것이라 하더라도, 온도 보상된 전도도값으로 오일의 품질 변화를 평가할 수 있다[5]. 기준 온도 40°C에서 전기전도도 및 유전상수는 온도 의존성이 있는 다항식 형태를 사용하여 계산 가능하다.

$$\kappa_{T0} = \kappa_{T0a} + (a\Delta T_i + b\Delta T_i^2 + c\Delta T_i^3) \cdot \kappa_m$$

κ_{T0} 은 기준 온도 T_0 에서 오일의 대략적인 전기전도도이고, κ_{T0a} 는 기준 온도 T_0 에서 앞서 계산된 기준 전기전도도이고, κ_m 은 온도 보상이 안된 전기전도도 측정값이고, a, b, c는 센서시스템의 런타임동안 적용되어 결정될 근사 다항식의 계수이다.

$\Delta T_i = T_0 - T_i$ 는 온도 차이이다.

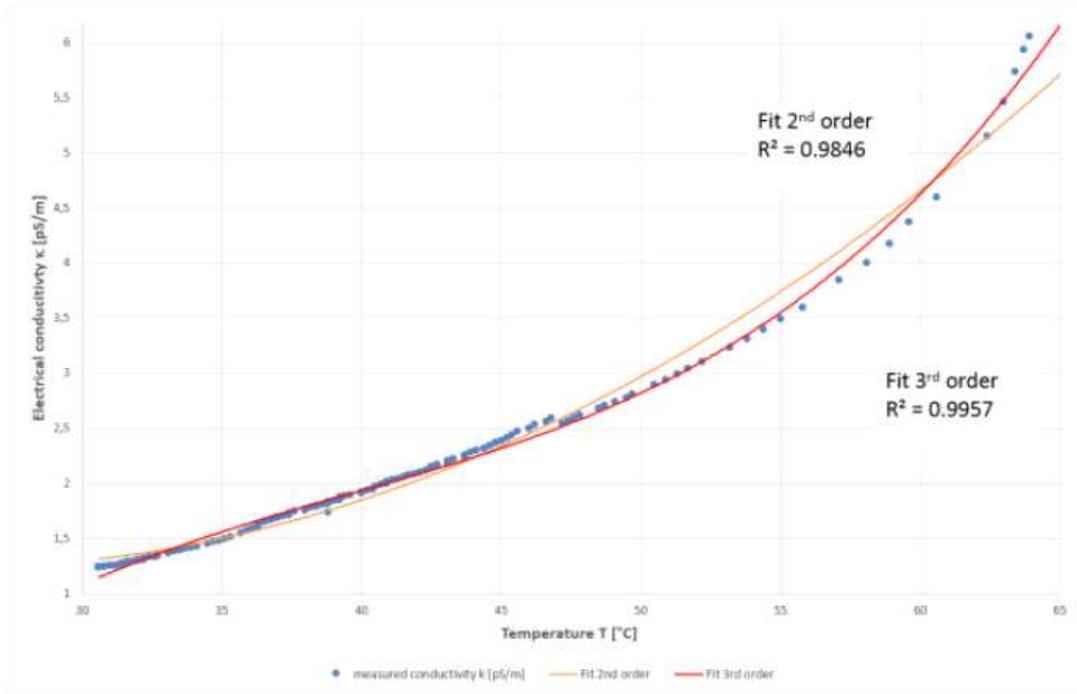


그림 4. 2차 및 3차 곡선 피팅에 의한 전기전도도 vs. 온도 그래프

그림 4는 일반적인 절연유의 전기전도도가 온도에 따라 달라지는 것을 보여준다. 두 개의 서로 다른 추세선은 측정된 데이터에 2차 피팅과 3차 피팅을 한 것이다. 3차 다항식 근사법은 최적의 결정계수 R^2 로, 사용한 마이크로컴퓨터가 계산하는 노력을 매우 적게 하고도 좋은 근사치를 보장해 준다. 다항식 계수 a , b , c 의 선택적 결정을 위해, N 개의 측정값 및 근사 다항식으로부터 가우스 최소제곱법에 기초하여 위험함수(risk function)가 정의되며, 그것의 최소화(minimization)로 원하는 계수를 결정할 수 있다.

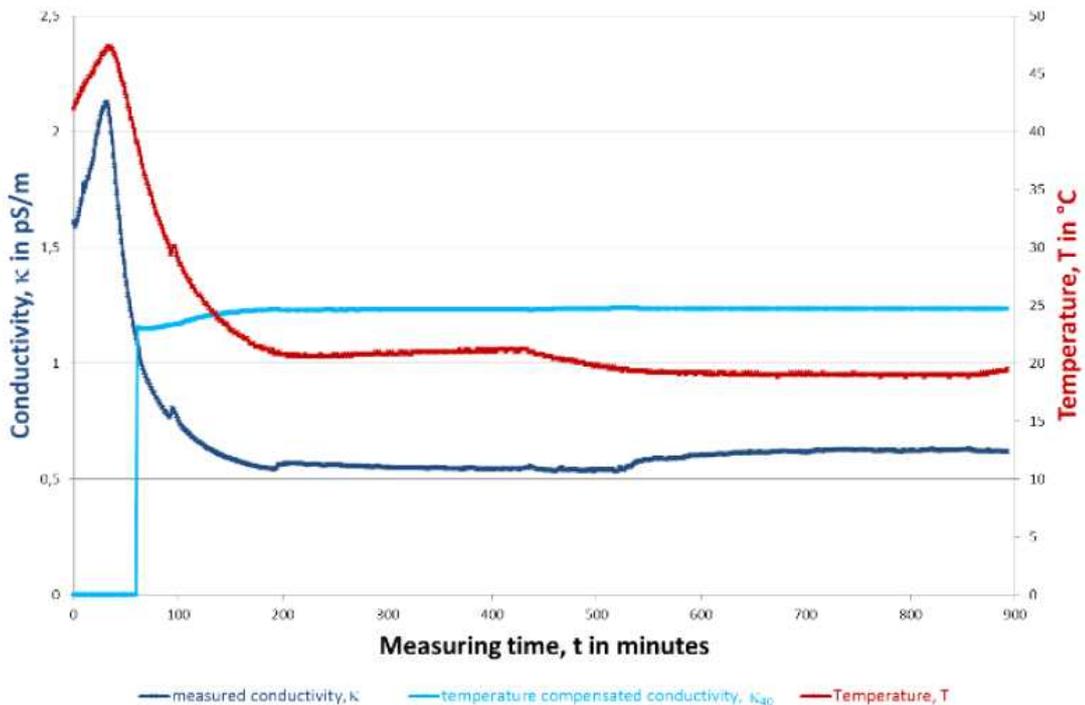


그림 5. 온도 보상 효과 그래프

그림 5는 전기전도도의 온도 보상 적용 효과를 보여주는 것이다. 알고리즘이 온도보상을 개시하려면 약 10개의 초기 측정값이 필요하고, 약간의 시간이 지난 후에 더 정확한 값을 얻을 수 있다. 측정된 전도도(κ)는 온도에 따라 크게 변하지만, 온도 보상된 전도도 K_{40} 은 거의 일정하게 유지된다. 실행된 조정 알고리즘은 측정절차의 백그라운드에서는 자율적으로 작용한다 : 새로운 윤활유에 적용하기 위해서는 오일 교환 후에만 리셋해야 한다. 조정된 온도 보상을 하지 않고는 모니터링 대상 시스템의 임계 작동 상태를 확인할 수 없는데 그 이유는 온도가 전도도와 유전상수에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다[6].

4. 적용 사례

A. 오일 재생 플랜트에서의 모니터링

클리닝공정에서 오일 품질을 온라인으로 모니터링하기 위해 오일재생 설비의 입구(inlet) 바이패스에 오일센서 장비를 설치하였다(그림 6 참조).



그림 6. 오일 재생 설비의 바이패스에 설치된 오일 센서

그림 7 및 8의 데이터는 약 9일동안 오일 평균온도 40°C에서 시간에 따라 연속적으로 기록된 것이다. 그림 7은 OilQSens[®]를 이용하여 측정된 오일의 전도도(κ)와 유전상수(ϵ_r)를 가지고 계산된 손실계수 $\tan \delta$ 를 보여주고 있다.

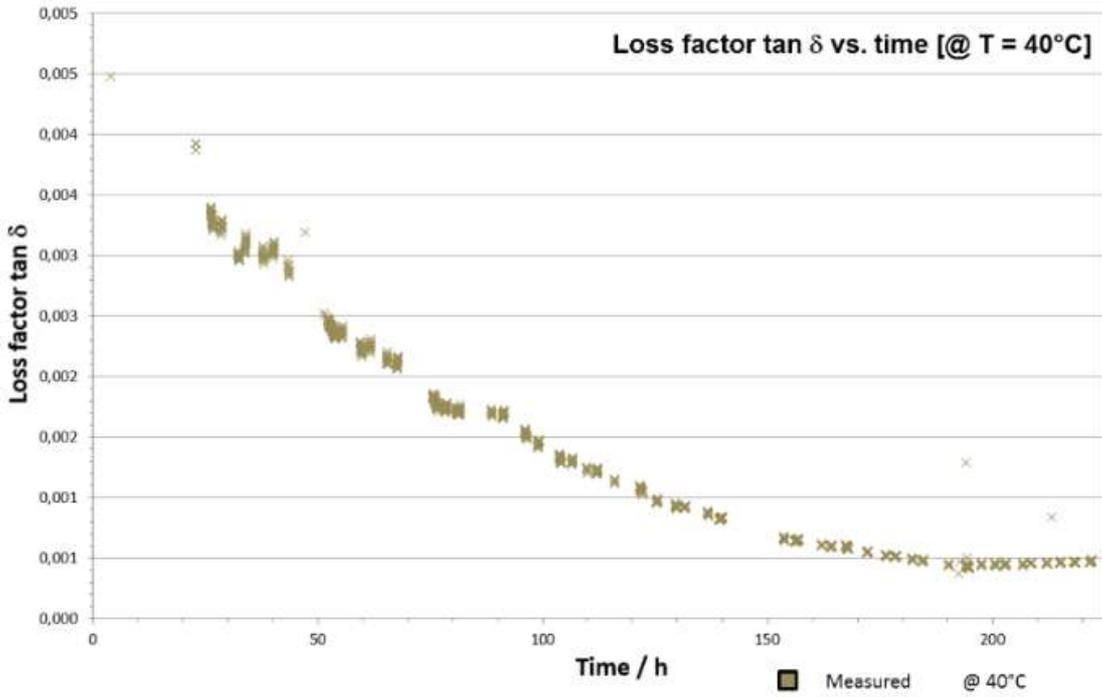


그림 7. 오일 재생 설비의 바이패스에 설치된 오일 센서

절연유의 유전성 손실은 손실계수에 비례한다. 오일 재생 설비에 적용할 때 손실계수 $\tan \delta$ 의 신호를 사용하여 오일 클리닝 공정을 제어할 수 있다. 손실계수 $\tan \delta$ 가 최소값에 도달하면 추가적으로 여과를 하더라도 전체적인 오일 품질이 향상되지 않는다. 클리닝 공정이 완료되었거나 필터가 모두 소모된 것이다. 그림 8은 실험실 측정결과와 최적 비교를 위해 90°C에서 보정된 값을 보여주는 것이다. OilQSens[®]로 온라인 측정된 데이터는 오프라인 실험실 측정 데이터와 잘 일치한다.

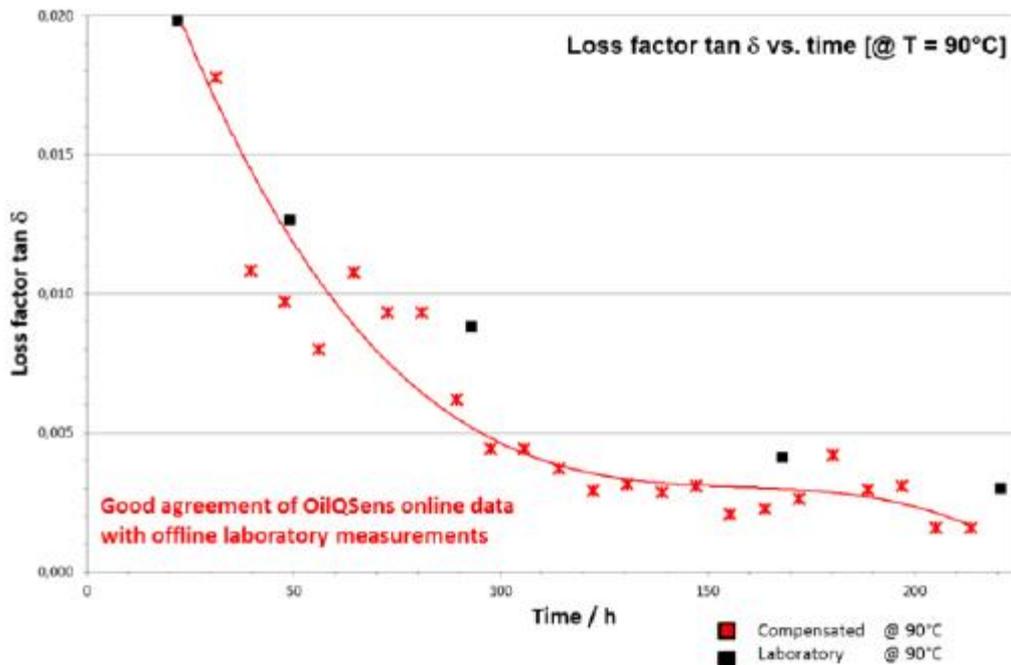


그림 8. 실험실 측정결과에 비교하기 위해 90°C에서 계산된 OilQSens[®] 손실계수 $\tan \delta$

결론적으로, 고압변압기에 설치한 OilQSens® 센서시스템은 온도보상 전도도 곡선의 최대 허용 변화도를 초과할 경우 경고를 주어 그에 따라 전력을 제한할 수 있다. 또한 최대 허용 전도도를 초과하면 2차 흐름에서의 오일 필터링과 같은, 오일 유지관리 조치를 실시하기 위한 경고신호를 생성할 수 있다.

B. 온라인 모니터링과 온라인 재생 장치의 결합

SmartSentry 시스템은 OilQSens® 센서시스템과 필터링 흡착제 카트리지를 결합한 장비이다. 이 장비는 하루 24시간 항시 온라인 오일 재생 및 오일 품질 모니터링용으로 사용된다. 이것을 설치하면 장기적으로 안전하게 변압기를 운영할 수 있으며, 수분과 극성물질이 흡착제 미디어에 포획되는 반면 OilQSens® 센서시스템은 오일의 전반적인 상태를 체크하고 더 나아가 임계 작동 상태를 확인한다.

특수 흡착제 미디어의 주요 규격은 다음과 같다 :

- 운반용량 > 자체 무게의 65%. 그래서 재료가 더 적게 필요함.
- 흡착제의 표면 활성도가 높음
- 극성 성분의 빠른 흡착
- 기공 크기 및 분포 정밀 제어
- 최적의 재현성
- 기계적인 강도가 높아서 뜨거운 변압기 유체에도 파괴되지 않음
- 수분, 산성 물질, 용존 슬러지 등을 제거

SmartSentry는 작동 중에 있는 고압변압기에 존재하는 자연적인 열대류(heat convection flow) 때문에 추가적인 펌프가 없이도 작동된다. 그림 9는 SmartSentry의 구성 및 설치시스템을 보여준다.

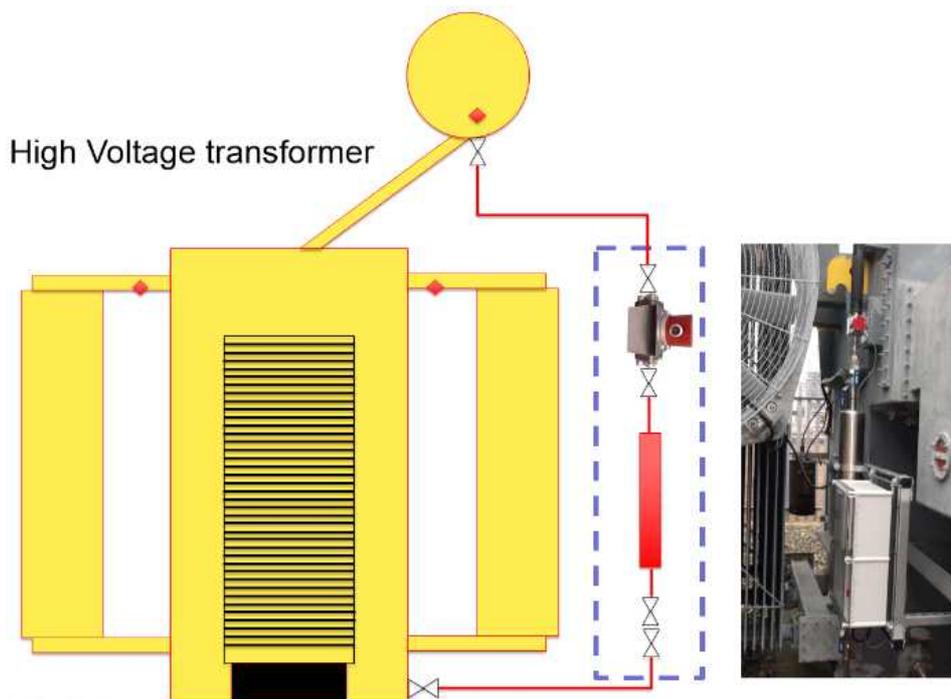


그림 9. Smartentry 세팅 및 고압변압기 설치 사례

두 개의 변압기가 건조시스템에 장착된 곳에서 주요 유틸리티를 테스트했다. 한 대의 변압기는 전통적 분자체에 설치되었고, 다른 한 대의 변압기는 특수 흡착제를 사용하는 SmartSentry 시스템에 설치되었다. 아래 그래프는 a)수분 감소 및 b)산도에 대한 6개월간의 두 시스템의 성능을 보여주고 있다.

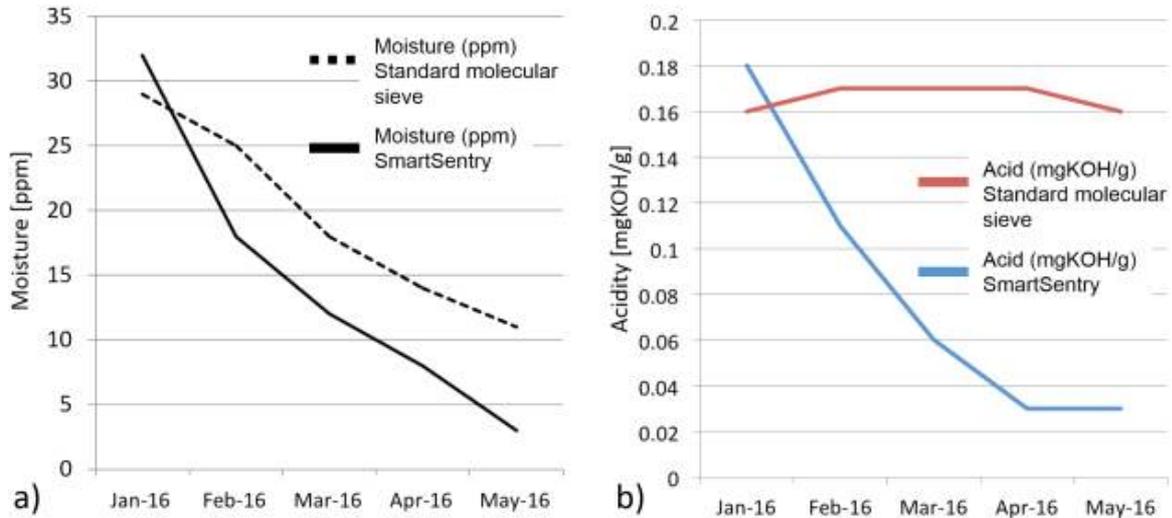


그림 10. a)수분감소, b)표준분자체와 SmartSentry 시스템에 사용된 특수 흡착제의 산도 추세 비교

결과적으로 두 건조시스템 모두 수분을 감소시켰으며 SmartSentry는 수분 함량을 5ppm 이하로 떨어뜨렸다. SmartSentry 시스템은 산도를 초기값 0.18mgKOH/g에서 0.04mgKOH/g 미만으로 현저하게 감소시킨 반면, 표준 분자체가 설치된 고압변압기의 산도는 아무런 변화도 보이지 않았다.

5. 결론

온라인 진단 시스템은 오일의 특정 복합 임피던스의 구성요소를 측정한다. 예를 들어, 형성된 산, 알데히드 및 과산화물은 오일 오염도와 직접적으로 관련되는 전기전도도를 증가시킨다. 손상 및 마모 정도는 오일 오염 정도, 오일 노화 및 산성화의 통합인자로 측정된다. 그것은 오일 노화와 전기전도도를 증가시키는 생성된 산(acids), 알데히드 및 과산화물에 대한 유익한 데이터를 제공한다. 이것은 사용된 윤활유를 적외선분광법으로 측정하여 입증된 것처럼 오일 오염도와 직접적인 연관성이 있다. 자산 보호, 효율적 기계 활용, 목표로 하는 손상 방지를 위해 새로운 OilQSens® 온라인 상태 모니터링 시스템은 엄격한 정기적 검사 주기 대신에, 필요시 예방 유지보수를 적시에 수행할 수 있는 기회를 제공한다. 불순물, 절연유의 품질 저하, 오일 노화의 측정 및 고압변압기의 작동상태 연속평가(그림 11 참조), 오일 충전된 회로 차단기 및 오일 재생시스템은 오일-변압기 시스템의 상태 변화를 실시간으로 모니터링할 수 있는 총체적 접근법을 충족시킨다. 센서의 신호는 LAN, WLAN 또는 직렬 인터페이스를 통해 웹기반 상태 모니터링 시스템으로 전송된다. 적절한 작동 중에 마모 메커니즘을 모니터링하면, 절연유의 허용한계 이하일 때 필요시 예방적으로 조건 중심의 유지보수를 수행할 수 있다. 이는 마모 및 오일 노화 문제로 발생하는 정전을 방지하는 동시에 오일-변압기 시스템의 전체 수명을 연장할 수 있다. SmartSentry와 같은 결합시스템은 온라인 오일 재생(건조, 정화) 및 온라인 오일 품질 모니터링을 하루 24시간 계속적으로 동시에 수행할 수 있다. 또한 자산 보호가 보장된다.

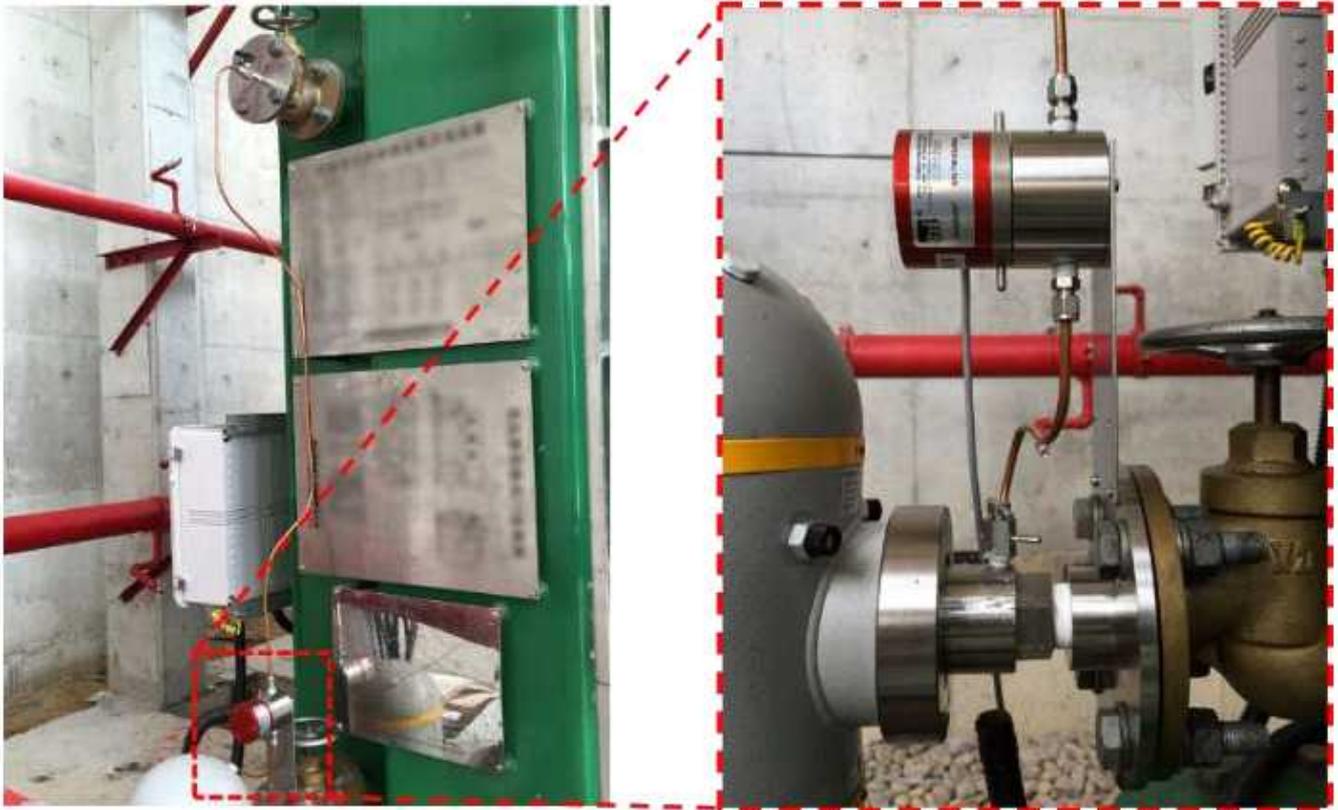


그림 11. 고압변압기에 OilQSens® 센서시스템 설치

참고 문헌

- [1] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F.S. Hasnaoui, T.A. Tameghe, G. Ekemb: Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges, *Energies* 2014,7, pp. 2595-2630, (2014).
- [2] M. Mauntz and U. Kuipers: Ölsensorsystem- Sensorsystem zur Messung von Komponenten der komplexen Impedanz elektrisch gering leitender und nichtleitender Fluide, dessen Realisierung und Anwendung, patent application no. 10 2008 047 366.9, German Patent Office, Munich, (2008).
- [3] M. Mauntz and U. Kuipers: Verfahren, Schaltungsanordnung, Sensor zur Messung physikalischer Größen in Fluiden sowie deren Verwendung, European patent application no. EP 09000244, European Patent Office, Munich, (2009).
- [4] M. Mauntz, J. Gegner and U. Kuipers: Ölsensorsystem zur Echtzeit-Zustandsüberwachung von technischen Anlagen und Maschinen, *Technisches Messen* 77, pp. 283-292, (2010).
- [5] M. Mauntz, U. Kuipers and J. Gegner: New Electric Online Oil Condition Monitoring Sensor – an Innovation in Early Failure Detection of Industrial Gears, The 4th International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation July 19th – July 22nd, 2011, Orlando, Florida, USA 2011, Proceedings Volume I, International Institute of Informatics and Systemics, Winter Garden, FL, USA, 2011, pp. 238-242, (2011).
- [6] M. Mauntz, U. Kuipers and J. Peuser: New oil condition monitoring system, WearSens® enables continuous, online detection of critical operating conditions and wear damage, Malaysian International Tribology Conference 2015 - MITC2015, Penang, Malaysia on November 16-17, 2015, Conference Proceedings, ISBN: 978-967-13625-0-1, S. 179-180, (2015).
- [7] M. Mauntz, U. Kuipers and J. Gegner: High-precision online sensor condition monitoring of industrial oils in service for the early detection of contamination and chemical aging, *Sensor + Test Conf.*, 7.-9.6.2011, Nürnberg, AMA Service GmbH, Wunstorf, pp. 702-709, (2011).