50% 미만 부하조건에서의 3상 몰드변압기 진동 측정과 분석

The vibration detection and analysis of 3-phase cast resin transformer in less than 50% load conditions

송길목* · 방선배* · 김중민* · 김영석* · 최명일*

(Kil-Mok Shong · Sun-Bae Bang · Chong-Min Kim · Young-Seok Kim · Myung-Il Choi)

Abstract - In this paper, we were analyzed the vibration characteristics of the three-phase cast resin transformer using less than 50% of load in the field. Most of the cast resin transformer is less than 50% in the domestic field is used for load conditions. Consisting of a solid insulator cast resin transformer is generating lots of noise and vibration. In addition, because it is affected by Joule's heat is used in light load conditions. As a results, the transformer vibrations at frequencies below about from 200Hz to 500Hz were detected. Vibration velocity depends on the load variations were found. Load up to approximately 20-30% in most cases the vibration velocity was found at 4,000 $\mu\text{m/s}$ or less, 8,000 $\mu\text{m/s}$ or more. Vibration frequency at light load conditions were generated at the 120Hz, 240Hz, 360Hz and 480Hz. At the load condition of from 10% to 20%, vibration velocity is higher than another. Most of the vibration velocity were identified at the 1,000 $\mu\text{m/s}$ or less. Using the vibration frequency and velocity measurements data, the load on the cast resin transformer analyzed the correlation of the burden. Therefore, this data could be found in the vibration characteristics of the light-load conditions. If the field measurements using the data perform diagnostics on the transformer, it's expected to be very effective.

Key Words : Vibration velocity, Vibration frequency, Solid insulator, Cast resin transformer, Live diagnostics

1. 서론

전력설비를 안전하게 운영하는 가장 중요한 목적은 안전이 확보되지 않았을 경우에 나타나는 설비고장, 정전, 폭발에 의한 주변영향, 인체에 영향을 미치게 되어 발생하는 패닉 등을 동반할 수 있기 때문이다. 전력설비의 안전이 확보되지 않으면, 산업시설은 생산의 차질과 막대한 경제적 손실을 초래한다. 따라서 설비진단은 설비의 상태를 확인하고 점검하는 수준에서 벗어나 산업활동을 원활하게 하는 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 국내 전력설비는 1960년대 이후부터 증가하여 1980년대에 급증하는 추세이다. 최근 부하설비가 대용량, 첨단화되면서 그 수요가 매우 빠르게 증가하고 있다. 따라서 전기에너지의 이상상태를 감시하고 적절한 조치를 취하기 위하여 정기적 또는 부정기적인 진단이 필요한 실정이다. 몰드변압기는 유입변압기에 비해 안전관리자의 유지보수가 용이하다는 간편성으로 수요가 빠르게 증가하고 있다. 몰드변압기가 이상이 발생하여 계통에 영향을 주는 사고동향에 있어서 과거에는 균열, 축열, 보이드에 의한 절연파괴 등 제조상의 결함이 많은 것으로 나타나 있으나 최근에는 생산기술이 발달되어 제조상의 결함에 관련된 사고비율은 낮아지는 반면, 지속적으로 사용되는 동안 부하

의 특성에 따라 기계적 특성이 변하면서 몰드변압기의 고유진동주파수가 변하는 과정에서 내부 부하에서 발생하는 주파수와 결합하여 공진을 일으켜 공진이 발생하는 것으로 추정되는 사고가 다수 나타나고 있다[1],[2]. 몰드변압기에 의한 사고를 예방하기 위해서는 고장 또는 사고원인에 대한 명확한 규명이 요구된다[3]. 본 연구는 몰드변압기의 특성상 부하 이상 또는 정상의 상태에서 코일의 진동이 에폭시수지에 전달되어 외부로 전달되는 과정에서 레이저를 이용하여 비접촉 방식에 의한 진동을 측정한다. 국내 현장에 설치되어 있는 몰드변압기의 사용에 있어서 50% 미만의 부하 조건에서 발생하는 진동을 측정하여 주파수변환을 실시하였다. 측정된 자료는 주파수 변환을 통해 진동이 발생하는 주파수대역에 대한 해석과 부하조건에 따른 몰드변압기 진동 경향을 파악하는데 매우 효과적이었다. 레이저 진동검출에 의한 방식으로 측정자의 안전을 확보함과 동시에 현장에서 몰드변압기 진동에 대한 안전관리 측면에서 매우 효과적인 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 몰드변압기 고장 또는 사고에 대한 현장 실태

몰드변압기는 설치조건이나 제조상태에 따라 균열, 파손 또는 소손에 이르는 다양한 사고원인을 가지고 있다. 사고의 예방을 위해서는 절연성능검사 또는 설치상태의 검사 등 선행적 안전검사가 요구되며, 사용 중에서는 상태감시를 통해 신속하게 이상징후를 검출하여 정전사고를 최소화하거나 설비사고의 파급이나 2차적인 전기화재로 전이되는 것을 차단하여야 한다. 한국전기안전공사[4]에서 조사된 국내 몰드

† 교신저자, 정회원 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원

E-mail : natasder@kesco.or.kr

* 정 회원 : 한국전기안전공사 전기안전연구원

접수일자 : 2012년 2월 23일

최종완료 : 2012년 6월 22일

변압기의 사고유형을 분석하여 사고위치에 대한 비율을 정리하면 그림 1과 같다. 몰드변압기의 사고발생지점 중 가장 많은 분포를 보이는 것은 고압 측 에폭시 부분과 고압 측 코일 부분인 것으로 확인된다. 고압 측에서의 사고분포가 전체의 약 55%에 해당하는 것으로 나타난다.

그림 1 몰드변압기의 사고분포 특성

Fig. 1 Characteristics on accident portion of cast resin Tr parts

따라서 몰드변압기의 내부 또는 외부영향에 의해 소손되는 과정에서 초기의 전조징후로 나타나는 다양한 신호 중 진동신호를 효과적으로 검출하고 분석하여 전기화재를 미연에 방지할 수 있는 기술이 요구된다. 기존의 진단방법은 고주파 전류프로브(HFCT; High Frequency Current Transformer)를 활용한 부분방전 진단과 열전대를 이용하거나 열화상 카메라를 이용한 온도상승 확인 등이 이용되었다. 몰드변압기는 고체절연을 하여 사용되는 정지기로서 부하의 상태와 고체절연체의 진동에 의한 균열상태를 확인하는 데는 매우 취약하다[5],[6]. 일반적으로 몰드변압기는 내부 이상신호가 발생하여 절연체에 전달되면서 소음과 진동이 발생하고, 진동 또는 줄열에 의한 발열이 발생된다. 따라서 변압기의 변형이 되기 전 확인이 가능한 진단기술이 요구되는 사항이다.

(a) crack

(b) electrical fire(secondary disaster)

그림 2 몰드변압기 고장 또는 사고 유형

Fig. 2 Fault or accident types of cast resin Tr

몰드변압기는 내화성을 가지고 있으나 전기에너지에 의해 소손될 때는 강력한 열에 의해 화재로 진전되는 특징을 가지고 있다. 사고 몰드변압기를 조사하면, 내부의 코일부분에서 지속적인 열팽창과 수축에 의한 스트레스와 고조파에 의한 진동이 원인이 되어 절연재 외함에 균열이 발생하여 사고로 이어지는 과정을 가진다[7],[8]. 고장 또는 사고를 미연에 예방하기 위해서는 열적 또는 기계적 피로에 의해 발생하는 진동을 효과적으로 측정하고 관리하는 방법이 최선이다. 진동센서를 활용한 설비진단기술은 전기설비 진단 및 모니터링 분야에서의 사업확대가 가능한 분야이다. 본 기술의 장점은 비파괴 검사기술로서 국내의 취약한 설비환경을 지속적으로 모니터링하고 관리하는 데 매우 효과적인 것으로 나타나 있다. 현재의 몰드변압기 진단기술로서는 열화상 진단, 절연성능평가에 한정되어 있으므로 사고 전조징후를 신속하게 검출하여 정확한 판단을 통해 고품질의 전기안전 서비스를 실현해야 할 필요가 있다. 부하의 사용에 따라 몰드변압기는 진동변화가 발생하므로 진동 검출 방식에 대한 신뢰성과 분석기술이 요구된다.

몰드변압기 소손에 의한 전기재해 확산이 크며, 본 기술의 개발로 전기재해 연결고리를 차단하여 안전을 확보할 수 있는 전기안전적 측면에서 매우 효과적일 것으로 판단된다.

3. 몰드변압기 현장실측 구성과 분석

3.1 샘플링 방법과 데이터 취득장치 구성

데이터 취득 장치와 방법은 국내 현장에서 쉽게 적용이 가능하도록 구성한다. 진동검출장치는 레이저를 이용하였다. 그림 3에서 확인되듯이 레이저 발생 및 검출장치를 이용하여 일정 주파수로 변압기 표면에 레이저를 보낸 후 반사되

(a) system

(b) schematics

그림 3 진동측정을 위한 장치 구성도

Fig. 3 Experimental diagram for vibration measuring

는 특정주파수를 받아 기존 주파수와 비교하여 변압기의 진동을 검출한다. 레이저의 주파수 측정범위는 40kHz이며, 기계 진동에 의한 주파수는 대부분 1kHz 이내에 속하므로 데이터의 신뢰를 위해 2kHz 범위내에서 측정하였다.

속도범위는 $\pm 2,400\text{mm/s}$ 이며, 측정 대상물의 거리는 400mm에서 10m까지 가능하다. 시스템의 장점은 비접촉식으로 진동검출이 가능하여 측정자의 안전과 노이즈가 매우 적다는 장점이 있다.

데이터를 추출하여 저장하고 분석하는 장치는 현장에서 실측하면서 주파수변환된 부분을 실측 데이터와 함께 취득하였다. 현장에서 취득한 데이터는 총 60개로서 부하변동에 따라 동일 장소를 2회 측정하여 신뢰성을 확보할 수 있도록 구성하였다. 22.9kV 수전설비 중 측정대상 몰드변압기는 용량이 대체적으로 약 100kVA에서 300kVA 범위의 것을 선택하였다. 현장에서 설치 운영 중인 3상 몰드변압기 중 50% 미만의 경부하 조건에서 운영되는 몰드변압기를 대상으로 하여 데이터를 취득하고, 이때 실측데이터는 주파수변환이 된 결과치에 의해 약 2kHz 범위내에서 찾아낸 진동주파수에서의 진동속도를 저장하였다.

그림 4 3상 몰드변압기 현장 측정 및 분석 개략도

Fig. 4 Field measurement and analysis schematic in 3phase cast resin Tr

본 실험의 목적은 몰드변압기를 측정한 진동을 통해 부하 조건별 이상상태를 진단하기 위하여 건전성이 확보된 몰드변압기의 진동주파수에 대한 표준모집 부분을 분석하기 위한 것이다. 분석을 통해 부하변동이나 이상부하가 발생하여 진동주파수에 영향을 미치는 부분을 쉽게 찾아낼 수 있다는 장점이 있으므로 향후 진단기법의 자료로 제시될 수 있다.

3.2 현장데이터의 실측 및 주파수 변환

현장에서 취득한 데이터를 주파수 변환하여 비교하였다. 부하는 대부분 전등 및 전열부하에 해당되며, 일부 전산시스템이 운영된다.

측정은 부하변동에 따라 달라지므로 동일 변압기에 일정기간을 두어 측정되었다. 변압기 용량은 150kVA이다. 부하 변화는 약 5%에서 15% 범위내에서 측정하였다. 진동속도는 120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz 등의 주파수에서 검출되었다. 120Hz를 중심으로 하는 진동주파수에서의 진동속도가 검출되는 것은 내부 코일에서 발생하는 자왜진동에 관련된 것으로 추정된다. 또한, 각 상의 부하 조건에 따라 진동속도가

(a) U phase

(b) V phase

(c) W phase

그림 5 150kVA 3상변압기에서의 고압 측 진동 측정

Fig. 5 Vibration measuring data at HV side of 150kVA 3phase Tr

달라지는 것을 확인할 수 있다. 변압기의 진동속도변화는 특정변압기만으로는 구분하기 어려우므로 다양한 현장실측을 통해 진동 속도에 대한 트렌드를 관리할 필요가 있다. 변압기 용량이 2배 높은 경우의 300kVA 3상 몰드변압기에서 약 5%에서 15%의 부하변화에 대응한 진동주파수 변화를 측정한 결과는 그림 6과 같다.

3.3 주요 인자 추출 및 분석

진동주파수에 따른 진동속도와 부하의 연관성을 확인하기 위하여 3축 그래프에 표시하였다. 진동속도는 대부분 500Hz 미만에서 발생하는 것으로 확인된다. 부하변동은 약 20% 미

(a) U phase

(b) V phase

(c) W phase

그림 6 300kVA 3상변압기에서의 고압 측 진동 측정

Fig. 6 Vibration measuring data at HV side of 300kVA 3phase Tr

만에서 진동속도가 검출되었으며, 진동속도에 대한 분포가 가장 크게 검출되는 주파수는 120Hz와 240Hz에서 확인된다.

진동주파수와 부하변동에 대한 상관성을 확인한 결과에 의하면, 그림 8(a)에서 확인이 가능하듯이 경부하에서는 진동주파수가 120Hz에서 500Hz, 약 5%에서 30% 이하의 부하에서 발생하는 것으로 확인된다. 진동주파수와 진동속도의 연관성에 대해서 보면, 대부분 진동속도는 1,000 $\mu\text{m/s}$ 미만에서 검출되었다. 일부 변압기에서는 진동속도가 10배 높은 경우도 있으므로 향후 특이진동에 대한 정밀분석이 요구된다.

부하변동에 따른 진동 특성 분포를 확인하였다. 부하의 부담에 대하여 변압기 용량에 따른 부하정도를 평가하여 10% 미만, 10%에서 30%, 30%에서 50%까지의 부하변화에 따라 발생하는 진동주파수의 분포가 달라지는 것을 확인할

그림 7 진동주파수, 진동속도 및 부하의 상관성

Fig. 7 Correlations of vibration frequency, velocity and loads

(a) frequency, load

(b) frequency, velocity

그림 8 진동주파수에 따른 진동속도 또는 부하변동에 대한 상관성

Fig. 8 Correlations of vibration velocity or load variations in according to frequency

수 있다. 부하의 부담정도가 10%에서 30% 정도인 경우에는 몰드변압기에서 발생하는 진동주파수의 범위가 약 1kHz까지 진동속도가 검출된다. 그러나 부하의 부담정도가 상대적으로 높은 30%에서 50%범위에서는 진동주파수가 360Hz까지에서 진동속도가 검출된다. 진동속도 크기에 대한 분포특성

을 보면, 부하의 상태에 따라 경향성을 가지는 것으로 나타났다. 그림 9에서 확인된 사항을 요약하면 진동주파수가 같더라도 부하의 상태에 따라 진동속도의 크기는 다름을 확인하였다. 부하가 약 20%에서 30%에 이르는 경우의 진동속도는 200Hz에서 500Hz 범위에서 대부분 $4,000\mu\text{m/s}$ 이하이거나 $8,000\mu\text{m/s}$ 이상인 것으로 확인된다. 몰드변압기에서 발생하는 진동상태를 검출하여 부하의 정도에 따라 달라지는 진동속도를 분석하게 되면 일정범위를 초과하거나 미달인 경우의 범위에서 일반적으로는 변압기의 상태에 대한 특이상태를 확인하는 정밀진단 방법으로 활용할 수 있다. 부하사용량이 급증하면서 50% 이상의 부하조건에서도 진동주파수와 진동속도의 상관성을 분석하여 판단한다면, 몰드변압기의 상태를 상시 진단하는 방법으로 활용이 가능하다.

그림 9 부하변동에 따른 진동 특성 분포

Fig. 9 Distribution of vibration characteristics due to load variations

3. 결 론

본 논문에서는 현장에서 사용되고 있는 3상 몰드변압기 중 50% 미만의 부하를 사용하는 변압기만을 선택하여 진동특성을 측정하였다. 국내 현장에서는 몰드변압기의 사용조건이 대부분 50% 미만에서 사용되고 있는 현실을 감안하여 50% 미만에서의 현장 실측자료를 분석한 결과를 통해 부하조건에 따른 몰드변압기 진동 경향을 파악하는데 매우 효과적이었다. 그러나 진동측정의 적정성에 대해서는 많은 데이터의 해석이 요구된다.

주파수 분석을 통해 120Hz에서의 진동과 부하와의 상관성에 대해서는 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 부하변동이나 내부의 고조파에 의한 영향은 고체 절연체에 대해 많은 진동 영향을 줄 것으로 파악되기 때문에 이에 대한 실험적 연구와 검증이 요구된다. 본 데이터는 현장에서 측정된 데이터의 일부로서 부하의 상태 변동에 대한 상세한 연구의 필요성이 인지되는 부분이다. 따라서 단순한 저항부하조건이나 무부하 조건에서 나타나는 진동을 측정하고 분석할 수 있는 실험구성이 요구된다. 현장 측정을 통해 얻은 결과를 통해 전원품질에 대한 다양성, 부하특성, 설치환경이

나 주변환경에 의해 변압기 진동 특성이 달라짐을 확인할 수 있었다. 본 연구는 진동주파수와 속도를 분석하여 몰드변압기에 걸리는 부하부담에 대한 상관성을 확인하여 경부하 조건에서의 진동 특성을 확인하는 자료가 되었다. 50% 이상의 부하조건이나 과부하 조건을 지속적으로 측정하여 분석한다면, 몰드변압기의 상태진단을 하는데 매우 효과적일 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.2010T100100327)

참 고 문 헌

- [1] R. Vogelsang et al., "The Effect of Barriers on Electrical Tree Propagation in Composite Insulation Materials", IEEE Trans. on DEI Vol. 13, No. 1, pp.373-382, Apr. 2006
- [2] Peter H.F. Morshuis, "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now", IEEE Trans. on DEI Vol. 12, No. 5, pp.905-913, Oct. 2005
- [3] Yong-Han Yoon, Chi-Hyoung You, Jae-Chul Kim, Chan-Soo Chung and Jung-Jin Lee, "Fault Discrimination of Power Transformers using Vibration Signal Analysis", Trans. KIEE, Vol. 48A, No. 1, pp.1-7, 1999
- [4] 한국전기안전공사, "전기재해통계분석", 제20호, 2011. 12.
- [5] Young Park, Ho-Sung Jung, Chulmin Park and Soon-ho Jang, "Implementation of a Condition Monitoring System for Mold Transformers in DC Substations", Trans. KIEE, Vol. 60, No. 9, pp.1788-1794, 2011
- [6] 송길목, 최명일, 김영석, 방선배, 김종민, "부하 형태에 따른 몰드변압기에서의 진동 데이터 비교에 관한 연구", Journal of th KIEE(2012), Vol. 26, No. 4, pp.75-81, 2012
- [7] 김종민, 송길목, 방선배, 김영석, 최명일, "몰드변압기 진동특성과 파손가능성 검증", 2011 KIEE 전기설비부문회 춘계학술 논문집, 2011
- [8] 송길목, 방선배, 김종민, 김영석, 최명일, 이명준, "몰드변압기 진단을 위한 레이저 진동검출 시스템 개발", 2011 KIEE 전기설비부문회 춘계학술 논문집, 2011

저 자 소 개

송 길 목 (宋 佶 穆)

1967년 3월 31일생, 1994년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업, 2003년 8월 동대학원 전기전자재료 및 대전력 졸업(석사), 2007년 8월 동대학원 졸업(박사), 1996년 3월~현재, KESCO-ESRI DTR team 책임연구원, 전기설비진단, 시스템

개발, 전기안전 컨설팅

Tel : (031)580-3061

E-mail : natasder@naver.com, natasder@kesco.or.kr

방 선 배 (方 善 培)

1968년 5월 18일생, 1994년 2월 명지대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 2월 강원대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2009년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1997년~현재 KESCO-ESRI DTR team 선임연구원, 아크 발생, 시험 및 검출장치

Tel : (031)580-3062

E-mail : bsb1586@kesco.or.kr

김 종 민 (金 鍾 旻)

1972년 7월 18일생 1998년 2월 창원대학교 공대 전기공학과 졸업, 2001년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년~현재 KESCO-ESRI DTR team 주임연구원, 관심분야 : 변압기 진동진단, 아크플래시 검출 시스템 개발

Tel : (031)580-3063

E-mail : cmkim@kesco.or.kr

김 영 석 (金 榮 錫)

1974년 4월 27일생, 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업, 1999년 2월 동대학원 졸업(석사), 2004년 2월 동 대학원 졸업(박사), 2001년~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원, 2003년~현재 KESCO-ESRI DTR team 선임연구원, 케이블진단, 코로나 진단시스템 개발

Tel : (031)580-3064

E-mail : athens9@naver.com

최 명 일 (崔 明 日)

1975년 5월 30일생, 2002년 2월 창원대학교 공대 전기공학과 졸업, 2004년 2월 동대학원 졸업(석사), 2009년 8월 광운대 정보통신대학원 졸업(석사), 2012년 2월 숭실대 박사과정 수료, 2006년~현재 KESCO-ESRI DTR team 주임연구원, PD 알고리즘, 피뢰설비, 무정전 진단

Tel : (031)580-3065

E-mail : ken2003@kesco.or.kr