

단상(345kV) 주변압기 압력 계전기의 진동절연에 관한 연구

A Study on the Vibration Reduction of the SPR(sudden pressure relay) in the Single Phase Main Power Transformers(345kV)

박철준†·이성욱*·최원호*·이욱륜**·권기영*

Chuljun Park, Seongwook Lee, Wonho Choi, Wookryun Lee and Kiyong Kweon

(2010년 2월 25일 접수 ; 2010년 4월 21일 심사완료)

Key Words : Main Power Transformer(주변압기), SPR(압력 계전기), Resonance Frequency(공진 주파수), Vibration Reduction(진동 저감)

ABSTRACT

In this paper, it is identified that high-level vibration of the single phase main power transformers shut down due to the mechanical fault. vibration sources of the SPR in the transformer's are identified and the SPR vibrations are reduced by structural modification. For vibration characteristic identification, vibration signals were measured with an accelerometer when the transformer is driving. These signals are presented in a FFT analysis in order to find the dependency of frequency components on the transformer. From finite element analyses and some experiments, it is also found that resonances occur because the natural frequencies of the SPR exist in usual driving range. To shift the natural frequencies outside the driving range, the SPR is modified by increasing stiffness. It is verified that considerable amounts of vibration are reduced by the structural modification.

1. 서 론

원자력발전소 주변압기는 발전소에서 생산된 전력을 계통에 공급하는 중요한 기기로써 높은 신뢰성이 요구되나 고장으로 발전정지를 유발하는 사례가 빈번한 실정이다.

현재 원전 주변압기의 건전성 판단 기준은 권선의 전기적인 절연특성 및 절연유의 화학적 평가에만 의존하고 있지만, 주변압기 고장유형 분석결과 40% 정도가 기계적인 고장(붓싱 파손, 보호 계전기 오동작, 냉각기 누설 등)인 것으로 나타나고 있다.

이 중 전자기력이 코어 적층판을 통과하면서 자속밀도의 변화에 의해 기계적 변형을 일으켜 발생하는 자왜현상과 변압기 부하의 증가에 의해 권선을 통과하는 전류 및 누설자속의 상호작용에 의한 부하 변동, 변압기의 냉각을 위해 설치한 냉각팬의 임펠러 블레이드 회전에 의해 발생하는 진동문제는 보통 변압기와 달리 154 kV, 345 kV 또는 765 kV의 고전압 처리를 위해 큰 규모를 가지며, 100% 부하상태로 정상시 운전을 실시하는 원전용 주변압기의 기계적 고장에 큰 요인이 되고 있다⁽¹⁾.

이와 같은 변압기 진동에 대한 연구는 변압기 권선에 변형이 발생하면 변압기의 진동모델이 변화하는 성질에 대한 연구⁽²⁾, 변압기의 기계적 결함을 방지하기 위한 기준값 설정⁽³⁾, 고무패드를 변압기 하부에 적절히 배치하여 변압기 진동을 저감시키는 연구⁽⁴⁾, 변압기의 자왜특성을 수학적 모델로 도출하고, 이를 실험적으로 검증한 연구⁽⁵⁾ 및 코어의 자왜

† 교신저자; 정희원, (주)효성 중공업연구소 기반기술팀
E-mail : parkchuljun@hyosung.com

Tel : (055)279-7485, Fax : (055)279-7499

* (주)효성 중공업연구소

** 정희원, 한국전력공사 전력연구원

진동에 의해 외부로 방사되는 변압기 소음 저감을 위한 연구⁽⁶⁾ 등이 활발히 이루어져 왔으나 변압기 외부 부착장치에 대한 진동원인 분석 및 이에 대한 저감대책 수립 등에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 Fig. 1과 같은 구조로 원전용 주변압기 외함 표면에 부착되어 변압기 이상으로 인하여 내부 압력이 설정치 이상으로 상승 시 동작하여 변압기를 정지하거나 위험을 알리는 장치⁽⁷⁾인 SPR(sudden pressure relay, 충격압력계전기)의 고진동에 의한 오작동 원인을 규명하기 위하여 국내에서 운전 중인 38개의 원전용 주변압기에 대해 진동특성을 시험적으로 평가하고 원전 진동관리기준을 초과하는 SPR에 대한 진동저감 방안을 제시하였다.

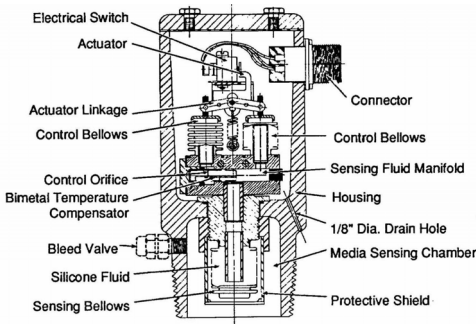
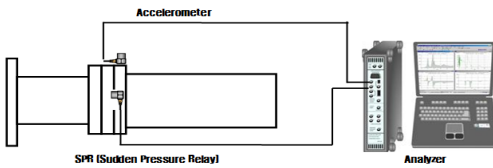
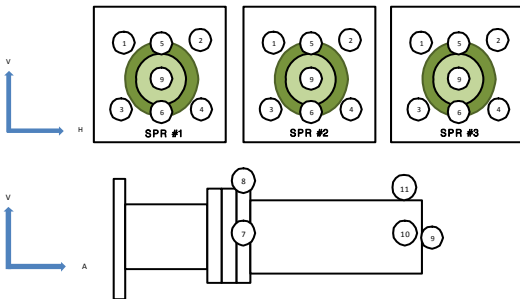


Fig. 1 SPR(sudden pressure relay)



(a) Equipment setup



(b) Measurement of the point in the SPR

Fig. 2 Experimental setup for signal analysis

2. 주변압기 SPR의 진동 신호 분석

원전용 주변압기 외함에 부착된 SPR에서 발생하는 고진동의 원인을 규명하기 위하여 이 연구에서는 100% 부하로 운전 중인 영광, 울진 및 고리 원자력 발전소에 설치된 총 38기의 단상(345kV) 및 3상 주변압기 SPR의 진동 신호를 채집/분석하였다.

Fig. 2(a)와 같이 진동 신호를 채집하기 위한 시험 설비는 구성하여, 가속도계(B&K, 4189A)를 Fig. 2(b)와 같이 SPR부근의 변압기 본체 12개 포인트, 축 방향 9개 포인트 및 반경 방향 12개의 포인트에 부착하고 진동 신호분석기(B&K, 3560C)를 이용하여 신호를 측정/분석하여 그 결과는 Fig. 3과 같이 가로방향 좌표축은 주파수(Hz)로, 세로방향은 진동속도(mm/s) 한 파워 스펙트럼(power spectrum)으로 나타내었다.

단상(345 kV) 주변압기 SPR에서 120 Hz 성분이 주요 가진 주파수로 나타났으며, 원자력발전소에서 SPR 진동관리기준인 12 mm/s_{rms}를 적용하여 측정 포인트 중 최대 진동량이 기준치를 초과하는 모델을

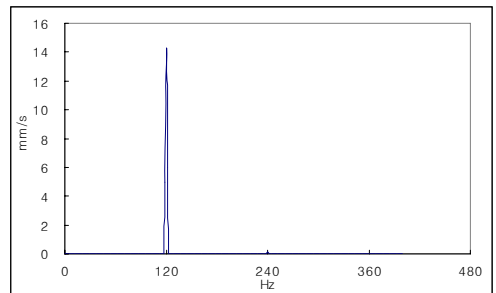


Fig. 3 FFT plot for the SPR

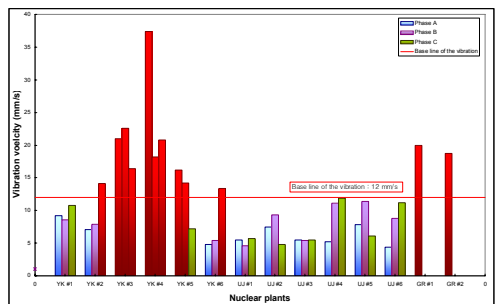


Fig. 4 Max. vibration velocity of the SPR

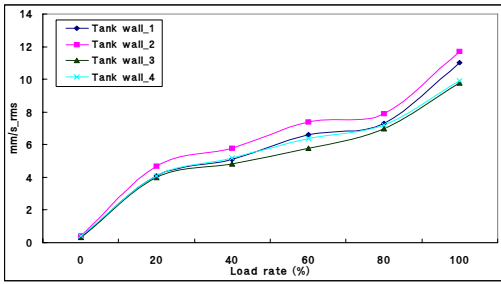


Fig. 5 Vibration of the SPR for the load rate

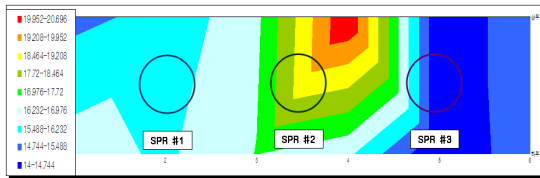


Fig. 6 Axial direction vibration of the tank wall

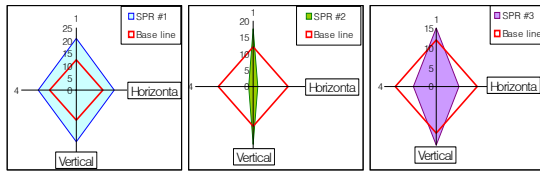
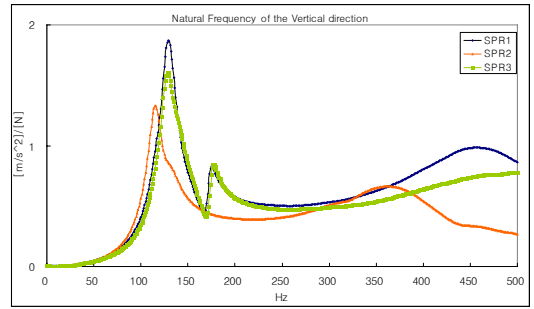


Fig. 7 Radial direction vibration of the SPR

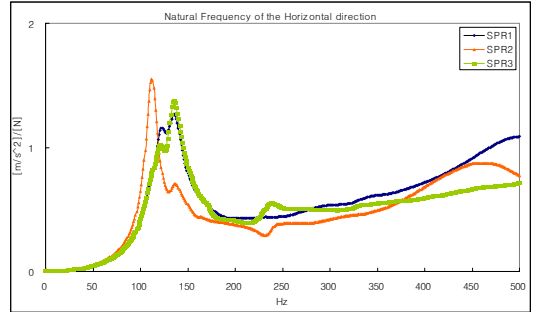
선별한 결과, Fig. 4와 같이 총 12개의 주변압기 SPR이 원전 진동관리기준치를 초과하는 것으로 나타났다.

그러므로 이 연구에서는 SPR 고진동의 원인을 규명하기 위하여 주변압기에서 발생하는 가진원에 대한 분석을 실시하였으며, SPR의 신호 분석 및 시스템 분석을 통하여 고진동의 특성을 파악하였다.

우선 주변압기의 가진원을 파악하기 위하여 변압기의 부하를 20%씩 증가시키면서 주변압기 본체의 진동량 및 주파수 대역을 분석한 결과, Fig. 5와 같이 부하가 증가함에 따라 주변압기 본체의 진동량도 증가하는 경향을 발견할 수 있었다. 이는 가진 주파수 성분이 120 Hz이고, 권선을 통과하는 전류 및 누설자속의 상호작용에 의해 발생하는 부하진동으로 판단할 수 있었다⁽²⁾. 또한, SPR 부근의 변압기 본체 진동량은 Fig. 6과 같이 12 mm/s_{rms}를 초과하는 값을 나타내었으며, SPR의 경우 고진동이 발생하는 부분은 끝단에서 큰 진동량을 나타냈으며,



(a) Vertical direction's result



(b) Horizontal direction's result

Fig. 8 Frequency response function of the SPR

Table 1 Result of the impact test

| | Direction | Natural frequencies (Hz) |
|--------|------------|--------------------------|
| | SPR #1 | Vertical |
| | Horizontal | 123 |
| SPR #2 | Vertical | 115 |
| | Horizontal | 112 |
| SPR #3 | Vertical | 128 |
| | Horizontal | 121 |

주요 진동 방향은 Fig. 7과 같이 수직 방향으로 나타났다.

시스템 분석은 임팩트 시험법을 이용하여 시행하였으며, 주요 고유진동수는 Fig. 8(a),(b) 및 Table 1과 같이 변압기의 가진 주파수인 120 Hz 부근에서 공진영역 10% 이내에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. SPR의 고유모드는 Fig. 9와 같이 1차 고유모드를 나타냈다.

이와 같이 실험적 방법을 통하여 원전 주변압기 SPR 고진동은 첫째, 단상(345 kV) 주변압기 본체에서 발생하는 가진원인 부하 진동량이 12 mm/s_{rms} 이상으로 발생하여 SPR의 진동에 영향을 미치게 되었으며, 둘째, 변압기 본체의 가진 주파수인 120 Hz와

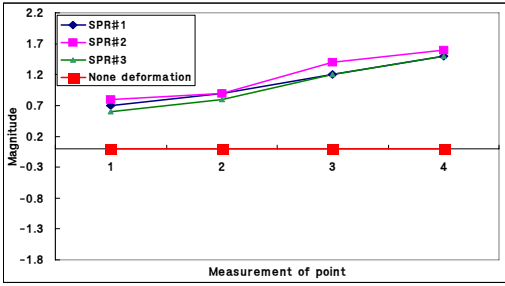


Fig. 9 Mode shape of the SPR

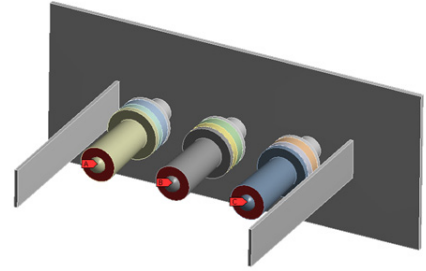


Fig. 10 Finite element model of the SPR

Table 2 Comparison of frequency between the experimental and simulation

| Experimental (Hz) | Simulation (Hz) | Difference (%) |
|-------------------|-----------------|----------------|
| 115 | 120 | 4.34 |

SPR 고유진동수와의 공진에 의해 기인된 것으로 판단할 수 있다.

3. 기존 모델의 유한요소해석

앞 절에서 살펴본 바와 같이 SPR 고진동의 원인 중 하나인 공진에 의한 영향을 분석하기 위하여 유한요소 해석기법을 이용하였다⁽⁸⁾.

3차원 CAD 프로그램인 Solid Edge를 이용하여 Fig. 10과 같이 코어를 눌러주기 위한 내부 압력판, 수직방향으로 보강한 I형 형강 및 용접부를 경계조건으로 하는 변압기 외함 일부분과, SPR 및 플랜지(flange), 나비밸브(butterfly valve) 및 압력 계전기(SPR)로 구성되어 있는 부분을 실제 형상과 동일하게 모델링 하였으며, SPR 끝단에 전기 신호를 전송해주는 케이블은 집중 질량으로 처리하였다.

구성된 SPR부의 3차원 형상을 이용하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 요소분할 및 모달 해석을 수행하였다. SPR부 모달해석을 위한 경계조건은 변압기 외함부 각각의 끝단에 탄성 지지로 하였다. 사용된 요소는 각 절점당 3개의 자유도(ux, uy, uz)를 갖는 육면체 요소를 사용하였으며, 추출모드는 전체적인 경향 파악 및 향후 개선모델과의 비교를 위하여 시험에서 얻은 120 Hz에 해당하는 고유모드에 대한 비교 분석을 실시하였다.

해석결과 Table 2와 같이 앞 절의 시스템 분석에서 얻은 고유진동수와 모드해석 결과값은 오차범위

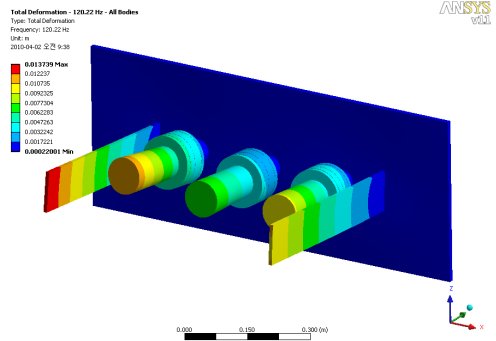


Fig. 11 Result of the SPR mode shape

5% 이내에서 Fig. 11과 같이 고유모드가 일치하였다. 이를 통하여 단상(345 kV) 주변압기 SPR의 고진동의 원인은 12 mm/s_{rms} 이상의 전자기력에 의한 부하 진동 및 공진에 의한 것으로 판단할 수 있다.

4. SPR의 고진동 저감 방안

시험 및 해석적인 방법을 통해 원자력발전소용 단상(345 kV) 및 3상 주변압기 SPR의 고진동 원인은 변압기 진동원인 부하진동, 즉 철심 및 권선의 진동으로 인해 외함에 국부적인 고진동이 유발되고 SPR 주변위치와 일치하여 과도 진동이 발생하게 되며, SPR의 고유진동수가 주변압기의 지배 주파수인 120 Hz 부근에 존재함으로써 공진에 의하여 진동량이 증폭하게 되는 것으로 판단할 수 있었다.

원자력발전소는 전력을 생산하는 곳으로써 주변압기 SPR부의 고진동에 의한 오작동은 원전측에 막대한 재정적 손실을 초래하기 때문에 SPR부의 진동 저감을 통한 오동작 요인 제거는 필수적이라 할 수 있다.

이와 같이 주변압기 SPR의 고진동을 저감하기

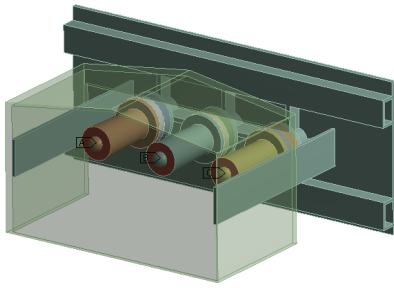


Fig. 12 Structure modification

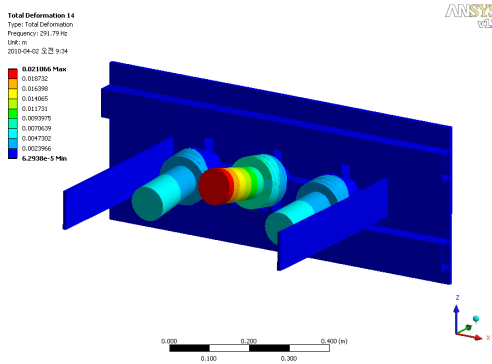


Fig. 13 Result of the modified SPR

위해서는 주변압기의 내부 진동원인 부하 진동을 저감시키는 직접적인 방법과 변압기본체에서 SPR 끝단까지 이어지는 진동전달 경로를 차단하는 방법 두 가지를 적용할 수 있다.

첫 번째 주변압기의 내부 진동을 저감하는 방법은 다시 두 가지로 나눌 수 있는데, 그 중 하나인 변압기 자왜현상에 의해 발생하는 코어진동을 저감하는 방법은 변압기의 고배향성 방향성 규소강판을 이용하여 높은 자속밀도에도 진동을 저감하는 방법이며, 다른 하나는 철심의 가공, 적층, 결합기술을 변경하는 방법이다. 원자력발전소용 주변압기의 부하 진동은 부하전류의 자속에 비례하므로, 권선에서 발생하는 축방향의 힘을 산정해서, 이에 적합한 고정장치(clamping device)를 사용하면 진동을 저감할 수 있다. 그러나 주변압기의 내부진동에 대한 진동저감방법은 전기 설계에서 내부 구조를 변경해야 하며, 비용이나 시간적인 측면에서 원자력발전소에 설치되어 있는 변압기를 대상으로 부적합하다.

따라서 이 연구에서는 비용적인 측면이나 시간적인 측면에서 쉽게 접근할 수 있는 고진동부에 대한

Table 3 Result of the simulation

| High frequency (Hz) | Result (Hz) | Difference (%) |
|---------------------|-------------|----------------|
| 240 | 291.79 | 21.6 |
| 360 | 323.41 | 10.2 |

강성보강을 통한 진동전달 경로를 차단하는 방법을 선택하였다. Fig. 12와 같이 SPR 부근의 벽면에 대한 보강을 실시하여 내부 진동이 SPR로 전달되는 진동 전달률을 저감할 수 있도록 벽면 상·하단에 C형 형강(100 mm×50 mm)으로 보강을 실시하였으며, SPR의 수직방향으로 발생하는 굽힘 모드에 대한 고유진동수를 공진영역에서 10% 이상 회피하기 위해 SPR 플랜지 보스부분에 십자형으로 보강($t=12$, $h=50$ mm)을 실시하였다.

SPR의 개선모델 도출을 위하여 ANSYS를 이용한 모달해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 12와 같이 SPR 부근의 벽면에 대한 경계조건은 앞 절과 동일한 방법으로 나누었고, 실제 모델과 동일한 빗물막이 커버를 적용하였으며, 신호전송 케이블은 메쉬의 정확도 및 해석 시간의 단축을 위하여 집중 질량으로 모델링 하였다.

SPR 개선모델의 보강효과는 기존모델과 동일한 진동모드를 갖는 고유진동수 비교를 통하여 검토하였다. 해석결과, 개선모델의 SPR 굽힘 모드는 Fig. 13과 같이 120 Hz에서 291.79 Hz로 고유진동수가 변경되었음을 확인할 수 있었으며, 변압기 가진 주파수인 120 Hz를 비롯하여 고차성분인 240 Hz, 360 Hz에 대한 SPR의 진동모드가 Table 3과 같이 공진영역을 10% 이상 회피하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 개선모델의 성능 검증

이 연구에서 원전 진동관리기준치를 초과하는 12개의 모든 주변압기 SPR부에 대한 개선모델을 모달 해석을 통하여 제시하였으나 진동량 측정을 통한 성능검증이 필요하였다. 전체 개선안에 따른 주변압기 SPR 보강은 한수원측과 협의 중에 있으나, 연구 진행 중 원자력발전소 한 곳에 설치되어 있는 주변압기 SPR에 대하여 개선모델에 따라 보강을 실시하고 진동측정을 통한 성능 검증을 실시할 수 있었다.

성능 검증 대상체는 SPR의 고유진동수를 공진영역에서 회피하기 위해 Fig. 14와 같이 보스부분에

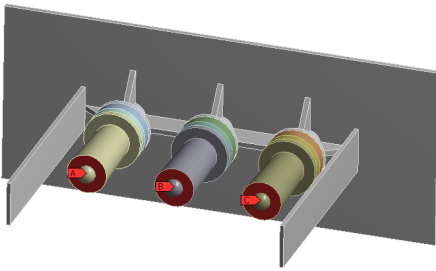


Fig. 14 Structure modification of the SPR

Table 4 Comparison of vibration velocity between initial SPR and modified SPR

| | No. | Initial model (mm/s_rms) | Modified model (mm/s_rms) | Effect(%) |
|--------|-----|--------------------------|---------------------------|-----------|
| SPR #1 | 5 | 14.3 | 11.9 | 16.8 % |
| | 6 | 9.3 | 10.7 | 15.1 % |
| | 7 | 15.2 | 1.9 | 87.5 % |
| | 8 | 12.8 | 2.1 | 83.6 % |
| SPR #2 | 5 | 25.3 | 11.9 | 53.0 % |
| | 6 | 22.7 | 10.5 | 53.7 % |
| | 7 | 11.8 | 0.7 | 94.1 % |
| | 8 | 54.2 | 3 | 94.5 % |
| SPR #3 | 5 | 15.2 | 11.6 | 23.7 % |
| | 6 | 12.6 | 10.2 | 19.0 % |
| | 7 | 12.8 | 1.2 | 90.6 % |
| | 8 | 10.7 | 1.9 | 82.2 % |

십자형 보강($t=12\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$)을 실시한 모델이다. 개선모델에 대하여 시스템 분석 및 진동 신호분석(signal analysis)을 2결과 동일한 방법으로 실시하였다. SPR의 고유진동수는 최초 보강 전 120 Hz 대역에서 190 Hz 대역으로 공진회피 하였다. 또한 SPR의 진동저감에 대한 효과는 Table 4와 같이 최초 SPR#2의 플랜지부에서 수직방향으로 최대 진동량이 54.2 mm/s 발생되었으나 보강 후 3 mm/s로 95 % 이상 저감되었으며, 끝단에서는 SPR의 최대 진동량이 5.3 mm/s의 값을 나타냄으로서 원전 진동 기준치를 만족함을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

이 연구에서는 원전용 주변압기 SPR의 고진동에 대한 원인을 규명하기 위하여 원자력발전소별로 진단을 실시함으로써 SPR의 고진동 원인이 변압기 내부에서 발생하는 부하진동 및 SPR의 공진에 의

한 것임을 확인하였다. 그리고 시험적 및 해석적 방법을 복합적으로 적용하여 진동전달 경로 차단을 위한 SPR부 보강방안을 제시하였으며, 성능 검증을 통해 제안된 개선모델의 적합성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- (1) KEPRI, 2005, "Development of Vibration Monitoring Technique for Nuclear Power Plant Main Transformer," Industry and Energy, KEPRI-NP-2005, p. 28.
- (2) Kang, C. G., Jung, C. S. and Jo, K. H., 1993, "Transformer Vibration Analysis for a Variation of Load," Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference, pp. 103~106.
- (3) Lee, W. R., Bae, Y. C., Kim, H. S., Lee, J. S. and Lee, S. K., 2009, "Improvement on the Determination of Vibration Velocity Rating of Large Power Transformer," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 252~253.
- (4) Lee, J. S., Lee, W. R. and Lee, S. G., 2005, "Development on a Vibration Reducing Element for the Large Transformers," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 259~262.
- (5) Yoo, S. Y., Lee, J. S., Lee, U. R. and Noh, M. G., 2008, "Magnetostriction Modeling for the Analysis of Electromagnetically Induced Vibration of Transformers," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 1, pp.108~114.
- (6) Choi, W. H., Kim, J. and Suk, H. I., 2005, "A Study of Low Noise Transformer by Avoiding the Structural Resonance," Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 54, No. 12, pp. 520~526.
- (7) EPRI Transformer Guidebook Development, The Cooper Book Dec.2009. pp. 3~56.
- (8) Park, C. J., Im, H. B., Chung, J. T., 2007, "A Study on the Vibration Reduction of a Forklift with an Electric Motor," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1145~1151.