

발전기 변류기 건전성 확보를 위한 연구 Activities to attain integrity of generator current transformer

조철환 · 조성태 · 양경현 · 안경재 · 이형우
C. W. Cho, S. T. Cho, K. H. Yang, K. J. Ann, H. Y. Lee

(접수일 : 2011년 08월 23일, 수정일 : 2011년 10월 06일, 채택확정 : 2011년 10월 12일)

Key Words : Current Transformer(변류기), Generator(발전기), Vibration(진동), Bakelite(백크라이트), Laminates(라미네이트), Modal Test(모달 시험)

Abstract : This thesis is the result of conducting an analysis to find the solution to the phenomenon of power stoppage due to the disconnection of a CT (Current Transformer) because of vibration. The CT which measures the most essential current is used in power industries as part of a generator protection relay. When it comes to the bottom plate of a CT, nonconductor; such as bakelite and laminates; these material elements should be used because it is impossible to utilize the conductor when measuring the current of a generator which carries a high current if you use other materials. These nonconductor's material properties are irregular and interpretation errors often occur because the weight is light. In addition, since the change of dynamic characteristics which are related to the temperature often occur, it is important to match the real situation by considering an error of interpretation rather than selecting the quality of the material. Lastly, the conclusion that the study drew is that it is possible to avoid the resonance by utilizing three changes to the components to solve the problem concerning the high vibration which is caused by non-conductive objects. These changes are the most crucial points in this thesis: First, material changes to the Plate. Second, weight changes to the Coil. Third, thickness changes to the Plate.

1. 서 론

전기를 생산하는 발전 산업에서 주 설비는 보일러, 터빈, 발전기이다. 이 중에서 발전기는 최종의 목적인 전기를 생산하는 중요한 설비이다. 이러한 발전기에는 여러 가지 보호 장치가 설치되어 전기적인 보호를 할 수 있도록 되어 있다. 그중에 가장 중요한 설비가 발전기의 전류를 측정하는 변류기(CT: Current Transformer)인데 500MW 발전설비의 경우 발전기 출력 측에 변류기가 설치되어 상평형불량, 출력이상시 순간적인 변화를 감지하여 정지하도록 되어 있는 보호설비가 A,B,C 상에 각 3개씩 9개가 설치되어 있으며, 또한 발전기 중성점 인출선의 A,B,C

상에 3개씩 9개가 설치되어 총 18개의 변류기를 사용하고 있다. 이 변류기는 실제 발전기 이상이 발생되어도 정지를 초래하지만 변류기 자체에 이상이 있어도 정지를 초래하므로 고도의 신뢰성이 있는 장치에 사용되고 있다. 그러나 변류기 설치 위치는 발전기 하부의 출력단자에 바로 연결이 되며, 발전기와는 기계적으로 불완전한 결합이 되어 있는 구조로서 발전기에서 발생하는 진동의 전달에 의한 고진동 발생 가능성이 높으며, 또 변류기하부 지지판은 절연체인 백크라이트(Bakelite)를 사용하는 관계로 공진에 의한 고진동에 의한 단선으로 정지되는 사례가 있어, 이러한 변류기의 고진동 원인 및 대책에 대한 연구를 수행하였다.

2. 변류기의 구성 및 설치도

2.1 변류기의 구성

발전기의 출력단자 A, B, C 상에 Fig. 2 와 같은 CT 3개를 한 조로 하여 설치되며, 각 CT는 하부 고

조철환(교신저자) : 한국전력 전력연구원
E-mail : chcho@kepco.co.kr
조성태, : 한국전력 전력연구원
양경현, : 한국전력 전력연구원
안경재 : 한국중부발전(주) 보령화력 본부
이형우 : 한국중부발전(주) 보령화력 본부

정판(재질 : 백크라이트)에 고정되어 있으며, 각 CT의 출력 단자는 정면의 단자함에 연결되어 있다

3개의 CT는 상부 발전기에 4개의 지지축을 사용하여 고정되며, 중성점 Box(Enclosure)가 하부에 연결되어 있는 구조이며, 각 CT의 세부적인 구조는 Fig. 1의 그림과 같다.

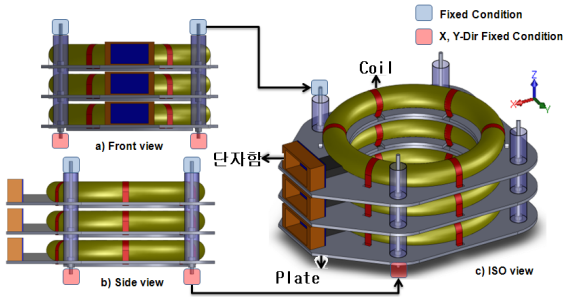


Fig. 1 Configuration of Current Transformer

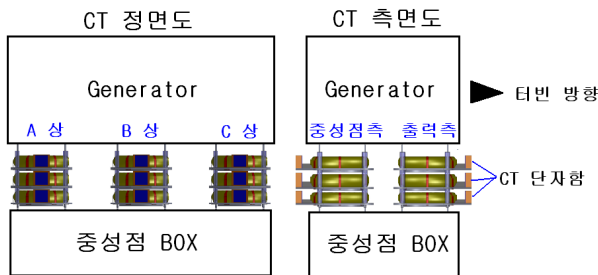


Fig. 2 Installation of current transformer

Fig 2에서 A, B, C 각 상에 3개씩 설치되어 9개의 CT중 터빈 방향에 있는 것이 발전기 출력을 측정하는 CT이고, 그 반대쪽 9개는 중점점축의 전류 불평형을 측정하는 CT이다.

2.2 변류기의 Specification

변류기를 구성하고 있는 부분은 Fig. 1과 같이 전류를 측정하는 원형의 Coil 과 Coil에서 신호를 인출하여 연결되는 단자함, CT를 지지하는 백크라이트재질의 Plate, 그리고, 하부에 연결되는 중성점 Box로 크게 구성되어 있으며, 그 세부적인 설계규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of CT(original)

	Coil	지지판	단자함	중성점 Box
무게	34Kg	5.245Kg	0.725Kg	450Kg
재질	동선	백라이트	알루미늄	비철금속

3. 변류기의 고진동 현상

3.1 변류기 진동 측정 결과

변류기 전체의 진동이 높은 상태이나 그 중에서 가장 높은 부분이 중성점축의 변류기로서 진동 측정 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Vibration of CT(Neutral CT)

상	Vibration(μm_{pp})	측정 방향
A	74.1	최하단부 CT의 상하수직방향
B	416	
C	72.4	

변류기의 최고진동이 발생되는 지점에 대한 진동 측정 결과 Table 2와 같이 B 상 최하단부 CT의 상하방향의 진동이 $416\mu\text{m}$ 로 규정치 $100\mu\text{m}^{(1)}$ 이하보다 4배 이상이 높은 상태로서 발전시스템의 긴급정지는 CT의 인출선 절단에 원인으로 판단되었다.

따라서 이러한 CT의 고진동 원인을 분석하여 진동을 저감시킬 수 있는 방안을 도출하여 시스템의 안정적인 운영을 위한 연구를 수행하였다.

3.2 변류기 진동 Mode 분석

Fig 3은 CT 형태를 모델링하여 모달 시험한 결과로서 62Hz 부근에서 단자함 방향으로 상하 진동하는 Mode를 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 터빈발전기가 3600rpm으로 회전하고 있으므로 운전중에 발생하는 진동 가진주파수 60Hz와는 필연적인 공진이 발생하는 것을 알 수 있었다.

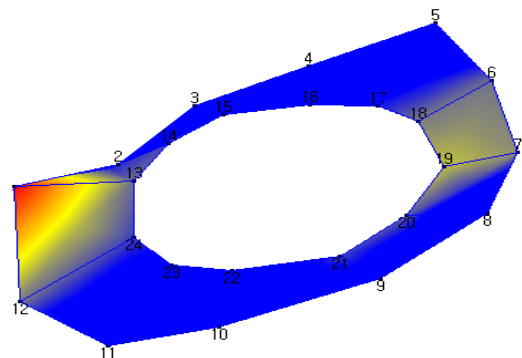


Fig. 3 Vibration mode of CT(62Hz)

3.3 변류기 고유진동수 분석

CT의 상하방향 고유진동수 측정 결과(Fig 4) 62Hz로서 운전주파수 60Hz에 근접되어 공진에 의한 고진동이 발생하는 상태임을 판단하였음.

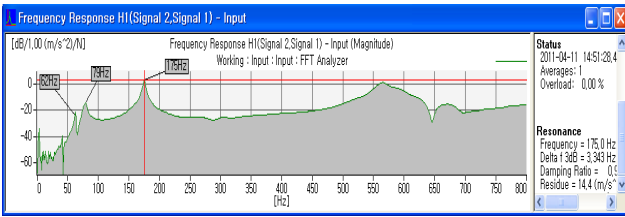


Fig. 4 Natural frequency of CT

4. 변류기 특성 분석을 위한 해석

4.1 변류기 하부 Plate의 FEM 해석 경계조건 본 논문에서 해석을 위한 경계조건은 다음과 같다

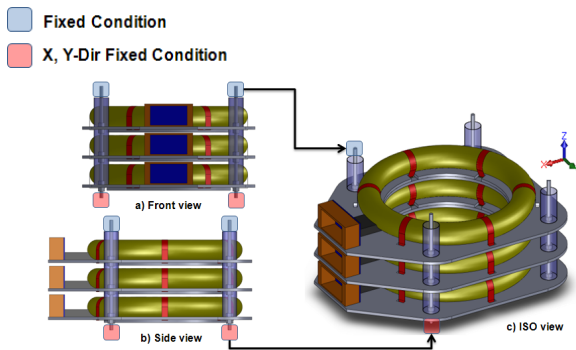


Fig. 5 Boundary condition of analysis

해석을 위하여 현장의 조건과 동일한 경계조건을 만들기 위하여 CT의 상부는 강체인 발전기에 붙어 있으므로 고정 조건을 사용하였고, 하부는 중성점 Box에 붙어 있는 상하방향이 Free상태이므로 X,Y 방향을 고정하였다.

4.2 변류기 하부 Plate의 FEM 해석 결과

변류기 하부 Plate의 고유진동수 해석결과 Table 3 과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 Fig. 4 실험 결과인 62Hz와 일치하는 진동 Mode를 확인 할 수 있었다.

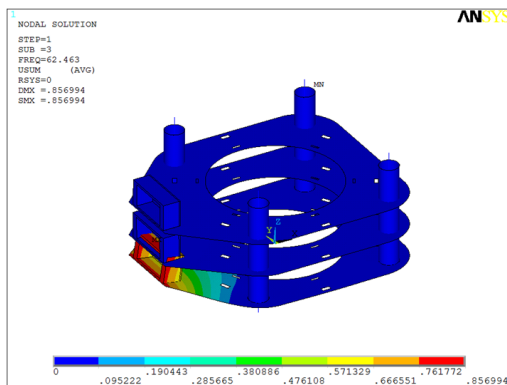


Fig. 6 Vibration mode of CT assembly(62Hz)

Table 3 Result of analysis(Neutral CT)

mode	고유진동수(Hz)	Mode shape
1st	62.463	1st bending mode
2nd	77.435	Shell mode
3rd	89.804	Shell mode
4th	91.785	Shell mode
5th	104.93	2nd bending mode
6th	174.80	Shell mode

CT를 지지 고정하는 Plate인 백크라이트에 대한 진동 해석결과 Fig 6에서와 같이 최하층부 단자함 부위의 진동 Mode가 크게 나타나고 있으며, 이 진동 Mode에 의해 CT의 인출선이 피로에 의해 단선이 된 것을 알 수 있었다.

4.3 변류기 하부 Plate의 고유진동수 변경을 위한 FEM 해석 결과

CT의 고진동 원인 분석을 위한 해석 결과는 하부 Plate의 동특성이 운전하고 있는 시스템의 가진주파수와 동특성이 일치하여 발생하는 동적 고진동 현상으로서 이를 해결하기 위해서는 CT를 지지하고 있는 Plate의 진동 동특성 변화가 요구되었다.

4.4 변류기 하부 Plate의 특성에 대한 고찰

CT의 하부 Plate는 대전류가 흐르는 발전기의 전류를 측정하는 특성상 도전체의 사용은 불가능하며, 비도전성 재료인 백크라이트, 라미네이트등의 재질을 사용해야 한다. 이러한 비도전성 재료는 재료의 물성이 불균일하며, 무게가 가벼워 해석시 오차가 많이 발생되며, 특히 온도에 대한 동특성 변화가 많이 발생하는 관계로 재료의 선정도 중요하지만 해석시 이러한 오차를 고려하여 실제에 맞도록 하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 CT의 고진동 해결을 위한 가장 중요한 핵심문제인 CT의 진동 동특성 개선을 위하여 기존의 백크라이트(Bakelite) 재질을 대체 할 수 있는 라미네이트(Laminates) 재질에 대하여 연구를 하였으며, 각 재료의 물성치는 Table 4 와 같다.

Table 4 Material properties(CT Plate)

	Bakelite	Laminates
탄성계수	26 GPa	14.3 GPa
포아송비	0.3	0.3
밀도	2036 Kg/m ³	1800Kg/m ³

4.4.1 Laminates Plate의 온도 특성

본 논문에서 가장 중요한 CT Plate의 온도 특성에 대한 내용으로서 Table 5와 같으며, 본 시험은 자체 적으로 시험한 결과이다

CT Plate의 온도 특성결과를 보면 27℃→65℃로 38℃ 변화시 1차 고유진동수가 430Hz→395Hz로 35Hz(12%)가 변화되는 것을 알 수 있었으며, 이는 해석과 실제의 오차가 얼마나 클 수 있는지를 알 수 있으며, 해석시의 중요한 요소이다.

Table 5 Temperature characteristics of laminates

Laminates 온도	1차 NF	2차 NF
27℃	430 Hz	761 Hz
39℃	418 Hz	740 Hz
50℃	409.5 Hz	725 Hz
58℃	403 Hz	716.5 Hz
65℃	395 Hz	707 Hz

4.5 변류기 하부 Plate의 특성 변화를 위한 해석

CT 하부 지지용 Plate의 진동 동특성 변화를 위하여 실험실 시험과 해석을 통하여 ① CT Plate 재질 변경(백크라이트→라미네이트) ② CT Coil의 무게 변경, ③ Plate의 두께변경의 3가지 변화요소를 사용하여 발전기가 회전하는 가진주파수인 60Hz와 2차 Harmonic 주파수 120Hz를 피하기 위한 최종의 해석 결과는 Table 6과 같다.

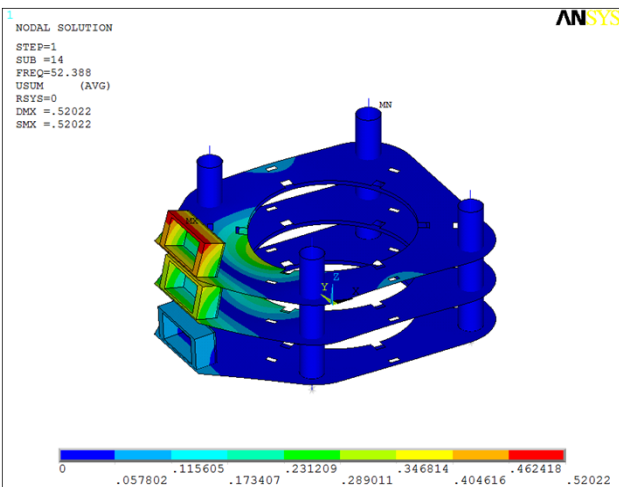


Fig. 7 Vibration Mode(52.388Hz)

Table 6 Temperature characteristics of laminates

mode	고유진동수 [Hz]	Mode shape
1st	33.518	1st bending mode
2nd	39.09	Shell mode
3rd	47.855	Shell mode
4th	48.351	Shell mode
5th	52.388	2nd bending mode
6th	92.127	Shell mode
7th	97.639	Shell mode
8th	105.468	Shell mode
9th	128.521	Shell mode
10th	141.398	Shell mode

4.6 변류기 특성 변경후 정지중 현장 시험 결과

변류기의 특성 변경을 위한 실험실 시험 및 해석을 통하여 결론을 도출하고 실제와 해석 결과의 일치유무 확인을 위하여 Sample 제품의 시험을 거쳐 신규로 제작 설치한 CT에 대한 고유진동수 측정 시험을 실시한 결과는 Table 7 과 같으며, 1차 고유진동수가 전부 60Hz 이하에 존재하는 것을 확인하였으며, 회전주파수 60Hz의 2차 Harmonic 주파수인 120Hz와의 공진범위에도 벗어난 상태임을 확인하였음.

Table 7 Natural frequency of CT Plate(A,B,C Phase)

중성점측 CT	1차 NF	2차 NF	부하측 CT	1차 NF	2차 NF
A상 1층	48.5	134	A상 1층	50.5	138
A상 2층	50.5	138	A상 2층	47.5	134
A상 3층	46.0	135	A상 3층	49.0	135
B상 1층	49.5	139	B상 1층	49.0	140
B상 2층	46.5	140	B상 2층	48.0	142
B상 3층	46.0	140	B상 3층	47.5	141
C상 1층	48.0	139	C상 1층	47.0	139
C상 2층	46.5	138	C상 2층	46.5	138
C상 3층	51.0	140	C상 3층	45.5	137

4.7 변류기 특성 변경후 운전중 시험 결과

CT Plate의 설계를 Table 8과 같이 CT의 무게를 변경하고, CT Plate의 두께를 줄여 고유진동수를 낮

추였으며, 단자함의 무게도 변경하여 실제 운전중 시험 결과 Table 9와 같이 전 부위에서 규정치 이내에 드는 양호한 진동값으로 개선되어 발전시스템 운영에 문제가 없는 상태로 개선되었음.

Fig.8은 Full Load 운전시 A 상 CT의 진동 주파수 Spectrum Chart로 회전주파수인 60Hz의 진동값이 100um 이내로 양호 상태임을 알 수 있다.

Table 8

항목	개선전	개선후
CT 무게	34Kg	41Kg
CT Plate 재질	Bakelite	Laminates
CT Plate 두께	10mm	9mm
단자함	0.725Kg	1.22Kg

Table 9 Result of CT Plate vibration

상	개선전(μm_{pp})	개선후(μm_{pp})
A	74.1	9.5
B	416	44.1
C	72.4	25.1

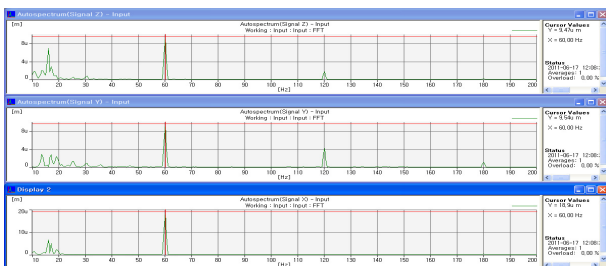


Fig. 8 Result of Vibration Chart(Phase A)

5. 결 론

본 논문에서는 발전산업에서 사용되는 발전기 보호 계전기중에 가장 중요한 전류를 측정하는 변류기(Current Transformer)가 진동에 의한 단선으로 발전정지 되는 현상에 대한 원인 분석을 위한 해석 및 해결방향에 대한 연구를 한 결과이다. CT를 지지하는 하부 Plate는 대전류가 흐르는 발전기의 전류를 측정하는 특성상 도전체의 사용은 불가능하며, 비도전체인 백크라이트, 라미네이트등의 재질을 사용해야 한다. 이러한 비도전체는 재료 물성이 불균일하며, 무게가 가벼워 해석시 오차가 많이 발생되며, 특히 온도에 대한 동특성 변화가 많이 발생하는 관계로

재질의 선정도 중요하지만 해석시 이러한 오차를 고려하여 현장 여건에 맞도록 하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 CT의 고진동 해결을 위한 가장 중요한 핵심문제인 비도전성 물질 해석에 대한 내용을 연구하였다. 그 내용을 요약하면 ① Plate 재질변경 ② Coil의 무게 변경, ③ Plate의 두께변경의 3가지 변화요소를 사용하여 공진을 회피 할 수 있다는 연구결과를 도출하였다.

참고 문헌

1. 조철환, 2011, “발전기 변류기 고진동 분석 보고서”, 한국전력공사 전력연구원 TR 발전소 보수 지침서에 의한 진동규격
2. 이병준, 1999, “현장 기술자를 위한 회전기계 진동 및 정비 핸드북 (I)”, 한국전력공사
3. 이병준, 1999, “현장 기술자를 위한 회전기계 진동 및 정비 핸드북 (III)”, 한국전력공사
4. Jon Wilson, 1999, “A Practical Approach to Vibration Detection and Measurement”, Sensors
5. R. Sill. “Minimizing Measurement Uncertainty in Calibration and Use of Accelerometers”, Endevco, TP 299.
6. 김종철, 1986, “PUMP와 BLOWER의 가변속 운전에 의한 ENERGY SAVING”, 세미나집, 한국기계산업진흥회, pp. 98-102.
7. 김병옥, 이안성, 2008, “산업용 원심분리기의 진동저감을 위한 로터다이나믹 해석”, 한국소음진동공학회 논문집 제18권 제8호, pp. 879-885.
8. 양경현. 조철환, 조성태, 2009, “FDF 및 IDF 가변속 운전에 대한 안정성 검토 결과 보고서”, 기술보고서, 한전 전력연구원, pp. 1-16
9. 조철환, 양경현, 조성태, 이우광, 2009. “발전소 통풍계통의 가변속 적용 후 진동특성에 관한연구” 한국동력기계학회 논문집 제13권, 제6호, pp. 88-94
10. J. H. Smith and C. V. Dodd. 1-5 Oct 1973, “Optimization of eddy-current Measurements of coil-to-conductor spacing”, Proc Annual Fall Conference of the American Society for Nondestructive Testing, Chicago, IL:1-15