

발전기 모델별 고정자 권선의 진동 특성 비교

(Comparison of Vibration Characteristics of Stator Windings by Generator Model)

배용채, 김희수*, 김연환*, 이 현*, 김성휘*

Abstract

발전기 회전자와 고정자 사이에 유기되는 전자력은 발전기 운전중 진동 피로 현상을 유발시켜 발전기 수명 저감의 요인이 된다. 특히 고정자 코어부에 비해 기계적 구속력이 비교적 약한 권선 단말부에서의 진동은 냉각수 누수, 권선 마멸등에 의한 2차 사고를 유발시킬수 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 발전소에서 운전중인 발전기를 중심으로 수행한 제작사별 고정자 권선의 진동 특성을 비교 분석하였다.

1. 서론

국내 대부분의 발전소에서는 전기부에서 발전기 유지 보수 및 관리를 담당하고 있으며 발전기의 운전 신뢰성 및 수명 제고를 위하여 정기 예방 정비 기간중 각종 전기적 진단을 수행하고 있다. 그러나 최근 자주 발생되고 있는 국내외 발전기 고정자 냉각수 누수 및 수소 누설 사고의 주요 원인으로 단말 권선의 진동에 의한 피로 균열을 배제할 수 없다.

발전기 고정자 권선의 진동을 유발시키는 힘은 터빈-발전기 로터의 불평형 또는 기계적 결합에 의하여 발생하는 힘과 전자력, 유니트 기동 정지 및 부하 변동에 따른 열 팽창력, 그리고 돌발적인 사고로 인한 단락 또는 계통 분리 등과 같은 비정상 운전 조건에서 발생하는 과도적인 힘 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 비정상 상태에 의한 과도한 힘에 비해 상대적인 크기는 작지만 정상 운전중 항상 작용하는 힘으로 진동 및 피로 현상을 유도하는 전자력에 관점을 맞추었다. 발전기 회전자와 고정자 사이에 유기되는 전자력에 의하여 발전기 운전중 항상 진동이 유발

되고 비교적 구속력이 약한 권선 단말부는 진동에 취약하여 구속 장치의 느슨함 또는 권선의 마멸등을 야기 시킨다. 따라서 발전소에서 운전되는 발전기 고정자 권선의 진동 특성을 파악하고 이를 관리하는 것은 발전소의 운전 신뢰성 제고 측면에서 매우 유의하다. 본 논문에서는 국내에서 운전되는 대용량 수냉식 발전기를 중심으로 수행한 고정자 권선 단말부의 진동 특성을 비교 분석하였다.

2. 발전기 고정자 단말부 구조

제작사에 따라 발전기 고정자의 구조는 다르나 기계적 관점에서 볼 때 전자력 또는 로타 회전에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 삼상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한다. 일반적인 수냉식 발전기 고정자는 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선 지지장치, 그리고 냉각수 공급을 위한 호스와 헤더로 구성된다. 고정자 단말 권선을 지지하기 위한 장치는 주로 스페이서와 끈, 그리고 이를 지지하기 위한 링으로 이루어져 있으며 일부 제작사에서는 콘형의 지지 장치를 사용하기도 한다. 이와 같이 발전기 고정자의 지지 구조가 제작사 별로 다르기 때문에 고정자 단말 권선의 진동 특성도 차이

* 한전 전력연구원 발전연구실

를 나타낸다. 국내에 주로 운전중인 발전기의 제작사는 알스툼(Alstom), GE(General Electric), WH(Westinghouse), GEC(General Electric Company) 등을 들 수 있다. 사진 1~5는 이들 제작사 및 용량별 발전기 고정자 권선 단말부를 보여주고 있다. 사진 1에서 보듯이 GE에서 설계 제작한 발전기 고정자는 비교적 단말 권선의 길이가 길고 스페이서와 끈을 이용하여 권선들을 구속하고 있다. 또 권선 내부에는 1개의 링(ring)만을 사용하여 권선 끝단을 단말 권선 외부에 존재하는 지지 장치에 구속하고 있다.

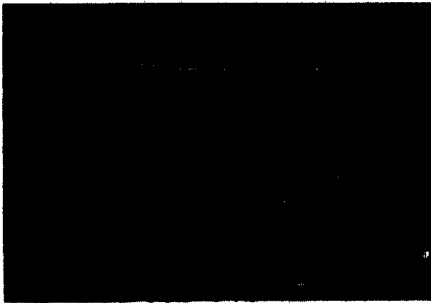


사진 1 GE 발전기 고정자 권선(I)

또, 사진 2에서와 같이 일부 GE 고정자는 여자용 전원 공급을 위하여 p-bar를 단말 권선 상부에 설치한 것도 있다.



사진 2 GE 발전기 고정자 권선 (II)

반면에 300MW급 알스툼 제작 발전기는 권선 내부의 구속이 3개의 링으로 구속되어 있어 기계적 구속력이 GE 발전기 고정자에 비해 양호하며 사진 3과 같이 알스툼에서 제작하여 운전중인

1000MW급 발전소의 발전기 고정자 권선 단말부는 2개의 내부링과 외부 단말 권선지지 장치에 의하여 각각 구속되어 있다. 타 제작사의 고정자 권선 단말부와 단말 권선의 길이가 작고 특히 내부링에서부터 단말 권선 끝단까지의 길이가 작다는 것이 특징이다.

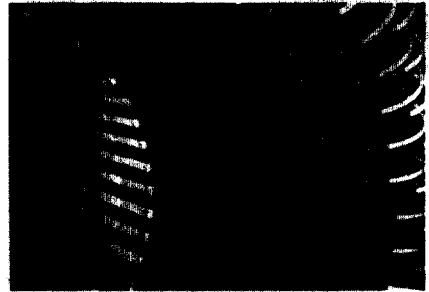


사진 3 알스툼 발전기 고정자 권선

사진 4의 WH 제작 발전기 고정자는 고정자 단말 권선의 길이가 비교적 짧고 권선 끝단을 3~4개씩 서로 브레이싱(bracing)한 구조로 이루어져 있다. 또 냉각수의 공급을 위한 테프론 호스가 냉각수 헤더에 비교적 일직선으로 배열되어 있음을 알 수 있다.

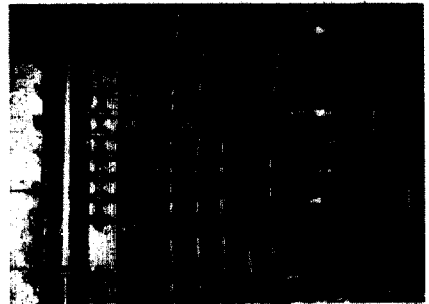


사진 4 WH 발전기 고정자 권선

사진 4는 GEC에서 제작한 발전기 고정자 단말 권선으로써 단말 블록킹으로 구속되어 있어 기계적인 구속 상태가 양호함을 알 수 있다.



사진 5 GEC 발전기 고정자 권선

3. 기계적 건전성 평가⁹⁾

발전소에서 운전되고 있는 발전기 고정자 권선의 기계적 건전성을 확보하기 위하여 비교적 기계적 구속력이 약한 고정자 단말 권선의 진동 특성 평가를 수행하고 있다. 국내 발전소에서는 발전기의 유지 보수 관리를 전기부에서 수행하고 있으며 주로 전기적 관점에서 발전기 진단을 수행하여 왔다. 하지만 최근 대용량 수냉식 발전기 고정자 권선의 누수 및 마멸 사고의 원인중 하나로 진동에 의한 피로 균열 및 권선 마멸이 제기됨에 따라 권선 진동에 관심을 가지게 되었다. 특히, 발전기 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 전자장에 기인한 전자력으로 말미암아 발전기는 정적인 변형을 일으키며, 실제 운전중에 회전자에 의하여 전자장이 회전하므로 발전기는 동적인 힘을 받는다. 이는 고정자 권선 및 권선 단말부에 진동을 유발시키며 피로로 인한 균열 및 수명 감소를 야기시킨다. 전자력은 정상 운전중 고정자 권선에 지속적으로 작용되고 고정자 권선 지지 구조의 건전성에 큰 영향을 준다. 따라서 모든 권선은 충분한 구속력을 가진 적절한 지지장치를 필요로 하며 고정자 권선을 포함한 구조물들의 고유 진동수는 반드시 120Hz와 일정 범위만큼 떨어져야 한다.

고정자 권선과 스페이서(spacer) 사이의 상대운동은 마멸의 원인이 되고 부가적으로 느슨하게 하여 더욱더 큰 진동과 마멸을 유발시킨다. 이러한 현상은 계속 축적되어 심각한 상태에 이르게

한다.

본 논문에서는 국내에서 운전되고 있는 각 발전소의 발전기에 대하여 전자력에 의한 권선의 공진을 피하기 위하여 권선 각각에 대하여 수행한 진동 특성 시험을 근거로 제작사 별, 용량별 발전기 고정자 권선의 주파수 응답시험 및 모드 시험 결과를 비교 분석하였다.

3.1 선형성 시험

발전기 고정자계의 선형성을 검토하여 모드 시험을 통하여 계가 해석될 수 있는지를 판정하는 것으로서, 고정자 권선 단말부의 상반 위치에서의 가진력대 응답을 측정하여 이들 주파수 및 크기를 상호 비교함으로써 분석된다.

3.2 주파수 응답 시험

그림1에서 보는바와 같이 발전기 운전중 발생하는 전자력에 의하여 고정자 단말부에 위치한 각각의 권선에 대한 공진 가능 여부를 파악하기 위하여 각각의 권선에 대한 고유진동수 및 크기를 측정하여 발전기 운전중 전자력에 의한 공진 여부를 평가한다.

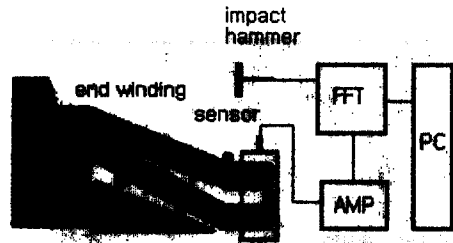


그림 1 주파수 응답 시험

3.3 모드 시험

발전기 운전중 고정자 단말부의 고유 주파수에 대한 거동 특성을 분석하기 위한 시험으로써 권선 단말부의 공진 모드가 발전기의 극수와 일치되는지의 여부를 파악함으로써 진단된다. 즉, 고정자 권선 단말부의 고유 주파수가 전자력에

의한 가진 주파수인 120Hz 근방에 존재할 때 이 고유 주파수가 화력 발전소의 경우 2차 모드, 원자력 발전소의 경우 4차 모드와 일치하는지를 평가하는 시험이다.

4. 진동 특성 분석

발전기 고정자의 제작사가 같다고 할지라도 고정자 단말 권선의 구속력 및 조건의 차이가 있을 수 있으므로 진동 특성의 차이가 존재한다. 그러나 발전기 고정자 권선 단말부에 대한 진동 특성을 파악하고 이를 유지 관리하는 것은 의미가 있으며 국내에서 운전중인 발전기를 대상으로 제작사별, 용량별 고정자 권선의 진동 특성을 분석하면 다음과 같다.

4.1 500MW급 GE 발전기

국내에 운전되는 500MW급 화력 발전소중 많은 발전기가 GE에서 설계한 발전기이다. 따라서 GE 발전기 고정자 권선의 진동 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 여자기측과 터빈측 발전기 고정자 권선 단말부에 대한 선형성 시험 결과, 대부분의 GE 발전기의 경우 양호하게 나타났으며 각 권선에 대한 주파수 응답 시험 결과를 토대로 분석한 특성은 다음과 같다.

- 각각의 권선에 대한 주파수 응답이 서로 상이하게 나타나므로 타 제작사의 권선에 비해 권선 결속의 조건이 일정하지 않은 것으로 사료된다
- 그림 2의 예와 같이 여자기측 권선의 고유주파수가 115~135Hz에 많이 존재하고 접선 방향에 대한 전달함수(inertance)의 크기가 GE 허용치에 비해 크게 나타나 터빈측 권선의 진동 특성에 비하여 불량하다. 특히, 여자기측 좌하반부와 우상반부의 진동 특성이 비교적 불량하게 나타났으며 이는 부싱이 여자기측에 존재함에 영향을 받은 것으로 사료된다. 반면에 터빈측 고정자 권선의 경우 일부 권선의 고유 주파수가 120Hz 부근에 존재하나 주파수 응답의 크기가 작고 대부분 GE에서 제공한 115~

135Hz를 벗어난다.

- 상 권선(phase lead)의 고유 주파수는 대부분 120Hz와 충분히 이격되어 있으며 크기도 작아 GE 허용치를 만족하고 있다.
- 축 방향의 고유 주파수는 매우 크게 나타나 120Hz와 충분히 분리되어 있고 응답의 크기도 매우 작게 나타났다.
- 모드 해석 결과 120Hz 근방에서 2차 모드와 일치하는 경우는 없었으며 주로 3차 모드 또는 국소 모드가 나타났다.
- 블록킹을 통한 권선 보완으로 고유주파수의 이동 및 크기의 저하가 현저하게 나타났다

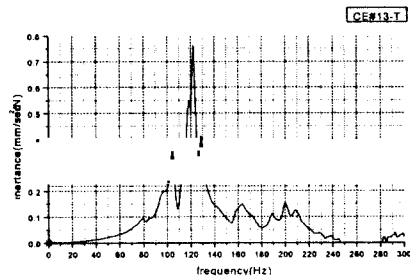


그림 2 500MW급 GE 발전기 고정자 권선의 주파수응답 예(여자기측)

4.2 1000MW급 GE 발전기

- 권선의 고유 주파수가 120Hz 근방에 존재하고 일반적인 진동 특성이 500MW급 GE 발전기와 권선의 진동 특성이 유사하나 500MW급 발전기에 비해 비교적 응답의 크기가 작게 나타났다.
- 모드 해석 결과 120Hz 근방에서 4차 모드와 일치하는 경우는 없었으며 주로 국소 모드로 나타났다.

4.3 700MW급 GE 발전기

- 'W' 원자력 발전소의 경우 전 권선의 단말 권선이 이미 블록킹으로 보완되어 있는 형태로써 여자기측 권선의 고유 주파수가 115~120Hz, 터빈측 권선의 고유 주파수가 120~130Hz에 존재하나 응답의 크기가 매우 작게 나타났다. 한편 일부 p-bar의 고유 주파수가 128Hz에 존

재하고 응답의 크기가 크나 p-bar에 흐르는 전류는 고정자 권선에 비해 매우 작으므로 p-bar에 작용하는 전자력이 상대적으로 작으리라 사료된다.

4.4 1000MW급 Alsthom 발전기

고정자 권선 각각의 진동 특성이 서로 유사하게 나타나며, 'U' 발전소의 경우 여자기측과 터빈측 고정자 권선의 진동 특성이 다르게 나타났다. 여자기측의 경우, 고유 주파수가 110, 127, 135Hz 등으로 가진 주파수인 120Hz 근방에 고유주파수가 존재하나 크기가 작게 나타난 반면, 그림 3의 예에서와 같이 대부분의 터빈측 단말 권선의 고유 주파수가 100Hz, 142Hz로써 120Hz와 분리되었다. 또 그림 4는 권선 단말부에 대한 모드 시험 결과로써 모드가 명확하며 8절점 모드가 가진 주파수인 120Hz와 분리되어 있음을 알 수 있다.

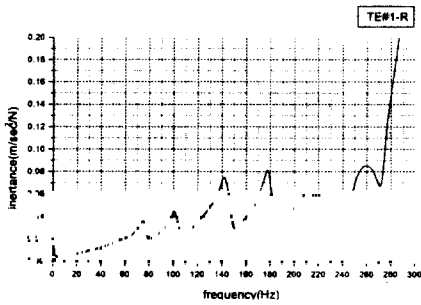
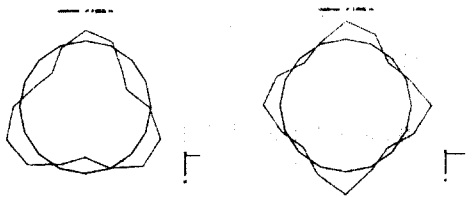


그림 3 Alsthom 발전기 고정자 권선의 터빈측 주파수 응답 예(101Hz, 141Hz)



(a) n=3 : 102Hz (b) n=4 : 144Hz

그림 4 터빈측 모드해석 결과

4.5 1000MW급 WH 발전기

WH의 경우 진동 분석시 주파수만을 고려하며 응답의 크기는 고려하지 않는다. 즉, 권선의 고유 주파수가 가진 주파수인 120Hz 부근에 있을 때는 모드 시험을 통하여 공진 가능 여부를 진단한다.

- 각 권선에 대한 진동 특성이 비교적 일정하게 나타난다. 특히 그림 5와 같은 특성으로 브레이싱으로 서로 구속된 권선들의 진동 특성은 거의 일치하게 나타난다.
- 2~3개의 불량 권선을 제외한 대부분의 고정자 권선에 대한 고유 주파수가 여자기측이 116, 127, 135Hz,... 터빈측이 90, 127, 142Hz,... 근방으로써 120Hz 부근에 고유 특성이 존재하나 크기는 GE 허용치와 비교해 볼 때 작게 나타났다.

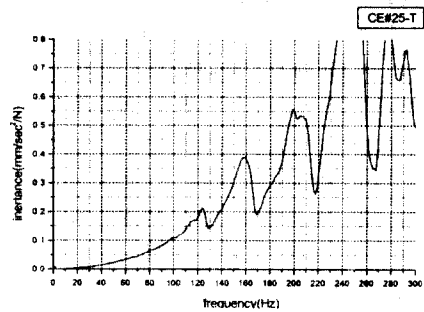


그림 5 WH 발전기 고정자 권선의 주파수 응답 예

4.6 600MW급 GEC 발전기

여자기측과 터빈측 대부분 권선의 원주 방향에 대한 주파수 응답 시험 결과, 120Hz 부근의 고유 주파수가 존재하지 않았다. 'K' 발전소의 경우, 원주 방향에 대한 응답의 크기는 매우 작았으며, 고유 진동수가 115~130Hz 내에 존재하는 일부 권선들이 존재하나 응답의 크기가 작았다. 그러나 터빈측 다수의 권선 접선 방향의 고유 진동수가 130~135Hz에 존재하였다.

5. 결론

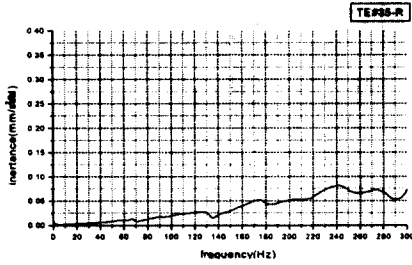


그림 6 GEC 발전기 고정자 권선의 주파수 응답 예(원주방향)

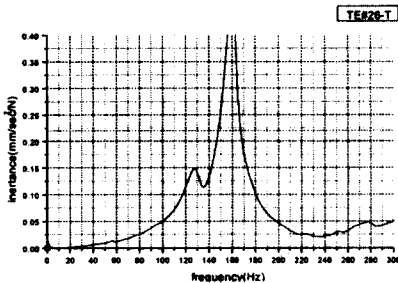


그림 7 GEC 발전기 고정자 권선의 주파수 응답 예(접선방향)

4.7 비교 분석

GE 발전기 고정자 권선의 경우 발전기 운전 중 발생하는 전자력에 의한 가진 주파수인 120Hz 부근에 고유 특성이 분포되어 권선 공진의 가능성이 비교적 높게 나타난다. WH 발전기 고정자 권선의 경우 단말부 권선이 3-4개씩 브레이싱으로 연결되어 있어 권선 상호간의 진동 특성이 유사하게 나타난다. WH, Alsthom 및 GEC 발전기 고정자 권선의 고유 특성이 모두 120Hz 부근에 존재하나 크기가 매우 작게 나타나며 특히 Alsthom 발전기 고정자의 일부 내부 링의 고유 특성이 120Hz에 존재하므로 진동에 의한 링과 권선 사이의 구속력이 떨어져 느슨해질 수 있으므로 링과의 체결 상태가 중요하다.

국내에서 운전되는 대용량 수냉식 발전기 고정자 단말 권선의 진동 특성을 측정 평가하여 제작사별, 용량별로 비교 분석하였다. 발전기 구조상 여자기측의 권선에 대한 진동 특성이 터빈측에 대한 권선의 진동 특성에 비하여 불량하게 나타났다으며, 권선의 접선 방향에 대한 주파수 응답 크기(inertance)가 비교적 높게 나타났다. GE 발전기의 고정자 단말 권선의 고유 특성이 전자력에 의한 가진 주파수인 120Hz 부근에 많이 존재하고 있으며 WH, Alsthom 및 GEC 발전기 고정자 권선의 경우 대부분의 권선에 대한 주파수 응답의 크기가 비교적 작게 나타났다. 한편 진동 허용치 및 시험 방법은 제작사별로 차이를 보이고 있으나 허용치에 대한 정확한 근거는 제시하지 못하고 있다. 따라서 향후, 실험 등을 통하여 신뢰성 있는 제작사별 진동 허용치의 선정 작업이 필요하리라 생각된다.

6. 참고 문헌

- 1) R. K. Singal, K. Williams, " Vibration Behaviors of Stator of Electrical Machines Part I : Theoretical Study " , Journal of Sound and Vibration, 1987, 115(1),
- 2) S. Watanabe, S. Kenjo, K. Ide, F. Sato, M. Yamamoto, " Natural Frequencies and Vibration Behaviour of Motor Stators" , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.4, April 1983, pp 949 ~ 956.
- 3) 배용채 외, "수냉식 발전기 고정자 권선의 진동 특성", 소음진동학회 춘계학술대회, 5. 1999
- 4) 배용채, 이현, 홍승모, "발전기 고정자 단말 권선 모델링 및 진동 특성 분석", 소음진동학회 춘계학술대회, 6. 2000