

자속측정에 의한 동기발전기의 운전중 진동 감시기법

김지현 · 황돈하 · 장기찬 · 김용주 · 권영안* · 송상옥**
 한국전기연구원 산업전기연구단 · *부산대학교 · **(주)선진전자기술

On-Line Vibration Monitoring Techniques for Synchronous Generators by Flux Measurement

Ji-Hyun Kim, Don-Ha Hwang, Ki-Chan Chang, Yong-Joo Kim, *Young-An Kwon, **Sang-Ock Song
 Industry Applications Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI),
 *Busan National University · **Advanced Electronic Technology Co. Ltd.

Abstract - The effort for measuring the rotor vibration caused by the short of rotor winding or air-gap eccentricity has been carried on. This paper introduces on-line vibration monitoring technologies using search coils to measure flux for synchronous generators. A 3,300/6,600 [V], 150 [kW] synchronous generator is built, and search coils are designed and inserted in the wedges. Furthermore, air-gap eccentricity is analyzed by finite element method and compared with experiment tests. Induced voltages caused by different air-gap eccentricity on the search coils are compared as well.

1. 서론

산업사회가 고도화됨에 따라 전력 공급원으로서 연속적이고 안정적인 발전기 시스템의 운전이 크게 요구되고 있다. 회전기계의 주 고장 원인으로 회전체 진동으로 인한 베어링 마모, 단자간의 고전압으로 인한 절연파괴, 권선의 열화 또는 단락으로 인한 소손 등이 있지만, 베어링 마모에 의해 발생하는 Air-gap의 편심이 진동을 유발시킴으로서 생기는 고장이 가장 많은 것으로 보고되고 있다. 따라서 회전기의 진동 현상 발생시 초기에 판별하고 대처할 수 있는 신속하고 신뢰성이 높은 운전중 진동감시 시스템의 개발이 요구되고 있다[1-4].

본 연구에서는 동기발전기의 운전중 진동감시 기법을 연구하기 위해 제작한 3,300/6,600 [V], 150 [kW] 유도 전동기-동기 발전기 시스템(M-G Set)을 소개하고, 발전기의 고정자 웨지 아래에 취부한 Search coil에서 유기되는 회전자 자속에 의한 전압파형의 왜곡을 분석하여 진동정도를 판별할 수 있는 기법을 제안한다. 회전자의 강제 진동을 위해 발전기 회전자에 Disk형의 추를 부착하여 편심을 유도하도록 설계하였고, 자속측정을 위해 설계한 Search coil을 발전기 고정자의 웨지 부분에 삽입하도록 하였다. 커플링된 유도 전동기로 발전기를 회전시켜 회전 중 Search coil에 유기되는 유기 기전력을 측정하여 진동 발생 전후를 비교하였다.

또한, 실험에 앞서서 유한요소 해석기법을 이용하여 동기 발전기와 Search coil을 모델링하고 자속을 분석함으로써 진동 유무를 판별할 수 있는 가능성을 확인하였다. Air-gap 편심에 따른 전자기적 특성을 해석하기 위하여 Search coil이 삽입된 동기발전기의 편심 정도를 여러 가지로 모의하여 분석한 결과를 제시한다. 마지막으로 모의 진동 실험에 의해 Search coil에 유기되는 전압파형과 정자계 및 과도자계 유한요소 해석을 통하여 구해진 파형을 비교 분석하여 제안한 방법의 타당성을 증명한다.

2. 회전기 진동의 개요

2.1 회전기의 진동

회전기의 Rotor를 회전하였을 때 발생하는 원심력이 회전축에 대하여 대칭으로 분포하지 않아 회전자에 진동을 야기하는 상태를 "Unbalance" 또는 "Rotor의 불균형"이라고 한다. 회전기의 진동원인에는 여러 가지가 존재하지만, 기계적인 관점에서의 진동원인으로는 불균형이 가장 큰 이유이다. 진동의 기계적인 원인별 비중은 표 1과 같이 알려져 있다. 전기기기인 발전기와 전동기는 표 1의 기계적인 요인에 의해 나타나는 진동 외에도 상의 불균형, 회전자 권선의 단락 등의 요인에 의한 진동이 발생하게 된다. 일반적으로 전동기 및 발전기를 제작할 때에는 회전자의 기계적 불균형을 수정하기 위하여 회전자만을 Balancing machine에 올려놓고 불균형을 수정하여 제작을 하게 된다[2-5].

표 1. 진동의 기계적인 요인

진동 원인	비율 [%]
1. 회전자의 불균형	41
2. 기초 또는 설치 불량	13
3. 왕복기관의 관성력 불균일	10
4. 축수부의 유격 또는 마모	9
5. 마찰에 의한 자동진동	9
6. 치차의 결함불량 및 마모	8
7. 공기, 물 등의 맥동과 Surging	4
8. 작업상의 충격, 외부진동 등 기타	6

2.2 회전자 편심

회전자 불균형의 가장 큰 요인이 되는 회전자의 편심(eccentricity)은 정적 편심(Static eccentricity)과 동적 편심(Dynamic eccentricity)으로 나눌 수 있다. 정적 편심은 회전자가 회전자 축을 중심으로 회전하지만, 그 축이 고정자 축에서 이탈해 있는 경우를 말한다. 한편, 동적 편심은 회전자가 고정자 축과 동일한 축을 중심으로 회전하지만, 그 회전축이 회전자의 축과 동일하지 않은 경우이다. 이러한 편심의 원인으로서는 조립중 부정확한 베어링 설치, 베어링의 마모, 회전자 샤프트의 휨 등 아주 다양하다. 2가지 편심 모두 회전기에 과도한 스트레스를 가하게 되며, 특히 베어링을 쉽게 마모시키는 결과를 초래한다[3-6].

2.3 축소모델 발전기 진동시험 시스템

회전기에 진동이 발생하고 있을 때의 자속변화를 측정할 수 있는 Search coil을 이용하여 진동 발생 유무를 실험할 수 있도록 하기 위한 축소모델 발전기 진동시험 시스템으로서, 3,300/6,600 (V), 150 (kW) 유도 전 동기-동기 발전기 시스템(M-G Set)을 제작하였다. 돌극형(4극) 동기 발전기에 Search coil을 취부하여 자속 변화에 따른 유기기전력을 측정할 수 있도록 하였다[3].

그림 1은 제작된 축소모델 발전기 진동시험 시스템(M-G set)을 나타내고 있다. 전압은 병렬 연결시 3.3 (kV), 직렬 결선하면 6.6 (kV)가 되도록 설계하였다.

그리고 그림 2와 같은 Search coil을 발전기 슬롯내의 웨지 아래 부분에 삽입하여 자속을 측정하도록 하였다. Search coil의 턴 수는 75, 면적은 841 (mm²)가 되도록 폭 11.5 (mm), 두께 2.4 (mm), 길이 100 (mm)의 6층 기판 PCB를 이용하여 제작하였다. 또한, 강제적으로 진동을 발생시키기 위하여 그림 3과 같이 회전자에 Disk를 설치하고, 이 Disk 상에 Weight를 인가할 수 있는 추를 달아서 불평형을 모의할 수 있도록 하였다.



그림 1. 발전기 진동시험 시스템(M-G set) 사진

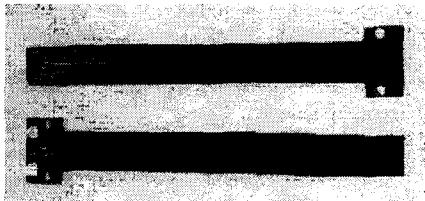


그림 2. 자속측정용 Search coil 사진

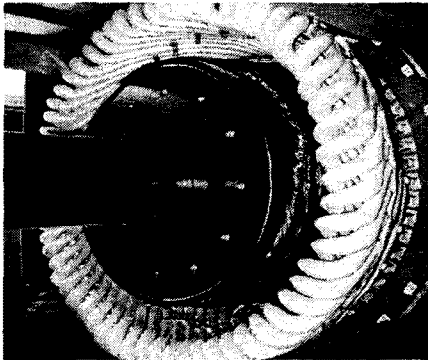


그림 3. 편심모의를 위한 회전자 Disk 사진

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 유한요소법에 의한 시뮬레이션

Air-gap 편심에 의한 전자기적 특성을 해석하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 Search coil이 삽입된 동기 발전기의 편심 정도를 여러 가지로 모의하여 분석하였다.

Air-gap 편심의 불균형 정도를 단계별로 나타내기 위하여, 그림 1에 나타난 동기발전기의 공극 길이를 1/4씩 나누어 공극이 각각 2.5 (mm)(최초), 1.875 (mm), 1.25 (mm), 0.625 (mm)인 Case0, Case1, Case2, Case3인 경우로 모의하였고, 각각의 경우에 대한 공극 자속밀도 분포와 Search coil의 유기전압을 유한요소 해석에 의한 시뮬레이션을 통하여 구한 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

4극 동기발전기이므로 그림 4에서와 같이 공극에서 극이 4번 교번함을 알 수 있고, 자속밀도의 크기가 극에 따라 일정하지만, 공극이 한쪽 방향으로 치우침(Air-gap eccentricity)에 따라 극의 불균형이 발생하여 Case3에서는 공극 자속밀도의 심한 불균형 현상이 나타남을 볼 수 있다.

그림 5는 Search coil의 유기전압을 나타낸 것으로서, Slotting의 효과에 의해서 한 극당 12개의 펄스형태 전압이 나타남을 볼 수 있고, 공극이 작아짐에 따라 유기전압의 크기가 현저히 증가함을 확인할 수 있다. 이때 Case3에서 가장 높은 유기전압이 생성되는 5번째 펄스 파형을 기준으로 하여 Case0~Case3를 비교해보면, 각각의 유기전압(첨두치)이 19.3 (V), 25.03 (V), 27.3 (V), 32.17 (V)이므로 자속에 의한 유기전압의 크기를 이용하여 공극의 불균형 정도를 판명할 수 있음을 알 수 있다.

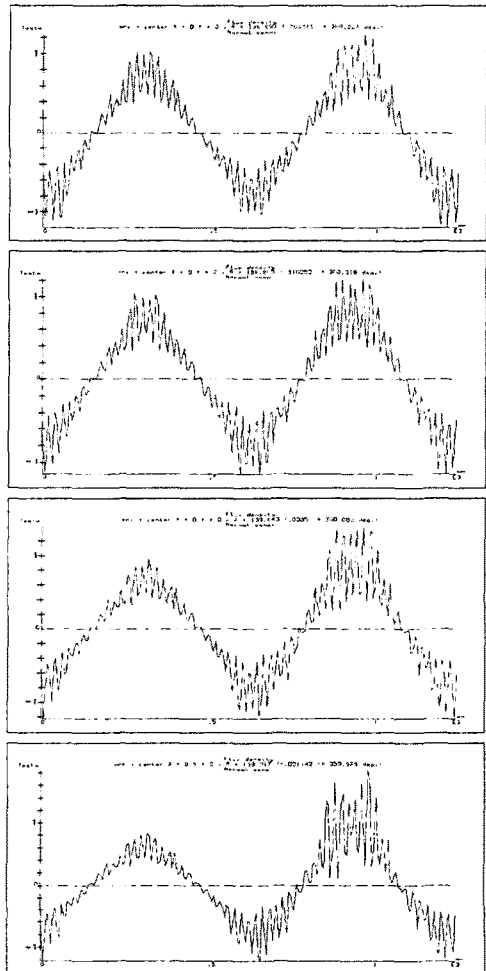


그림 4. 편심 정도에 따른 공극 자속밀도 분포 (위부터 각각 Case0, Case1, Case2, Case3)

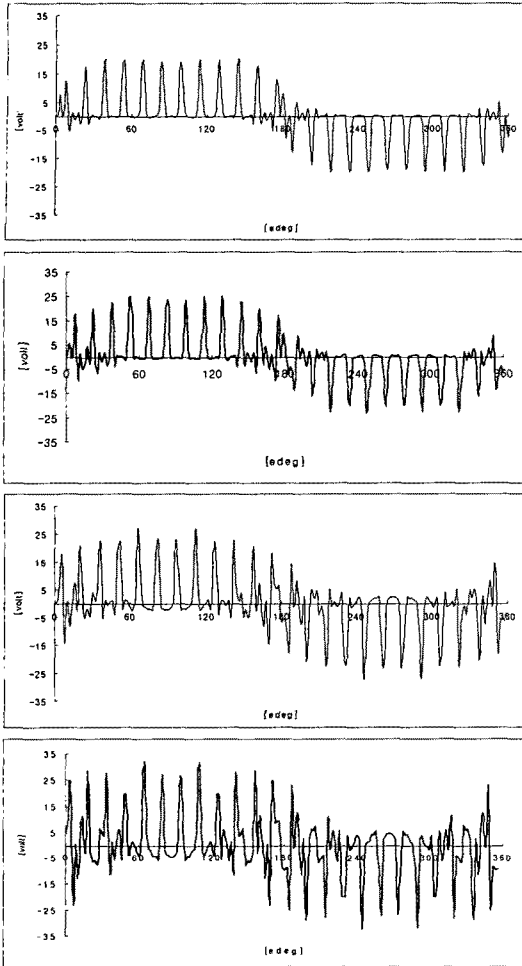


그림 5. 편심 정도에 따른 Search coil에서의 유기전압 (위부터 각각 Case0, Case1, Case2, Case3)

3.2 실험결과 및 고찰

동기 발전기의 회전자 불평형 및 편심을 모의하기 위하여 그림 3에 나타낸 Disk에 추를 부착하여 제작된 M-G set을 기동시켜서 Search coil에 유기되는 전압 파형을 측정하였다. 인버터의 주파수 제어를 통하여 속도를 가변시켜 운전한 결과, 47.36 [Hz] 영역에서 공진에 의한 진동현상이 발생하였고, 이때 계자전류는 10 [A] (정격대비 74%)를 인가하였다.

추를 부착하기 전, 후의 Search coil에 걸리는 유기전압을 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 진동 전에는 그림 6과 같이 Search coil에 걸리는 유기전압이 한 극에 대해서 좌우가 대칭적이고, 크기 또한 일정한 유기전압의 형태를 볼 수 있지만, 그림 7의 유기전압은 진동에 의한 Air-gap 편심에 의해 원으로 표시한 영역과 같이 그 크기가 왜곡되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 자속측정에 의한 전압 파형으로부터 운전중 진동감사가 가능함을 알 수 있다. 그리고 Disk에 부착된 추의 편심에 의한 유기전압의 변화가 시뮬레이션과 비교하여 큰 차이가 나타나지 않는다. 그 이유는 추에 의해 진동이 발생하더라도 진동 전체가 Air-gap 편심을 야기시키는 것은 아니며, 회전자의 회전과 진동에 의해서 Air-gap이 변동하는 것으로 사료된다. 또한, 유기전압에서 일정 수준의 잡음(Noise) 성분이 나타남을 볼 수 있고, 이를 위한 적절한 필터링 대책이 필요함을 알 수 있다.

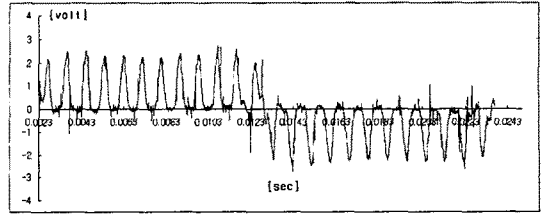


그림 6. 진동전 Search coil에 걸리는 유기전압 파형

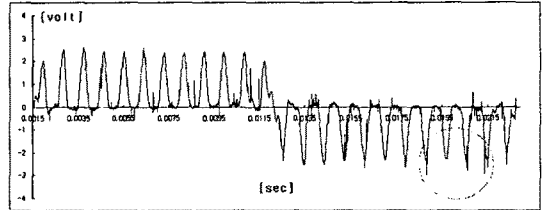


그림 7. 진동후 Search coil에 걸리는 유기전압 파형

4. 결 론

본 연구에서는 회전기기의 고장발생 원인 중에서 가장 비중이 큰 진동 현상을 기기의 운전중에 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 자속측정을 위한 Search coil 형태의 센서를 개발하였고, 동기 발전기의 회전자에 강제적으로 편심을 가하여 모의 진동시험을 수행할 수 있도록 제작한 축소모델 발전기 진동시험 시스템(M-G set)을 소개하였다. 또한, 회전자의 편심 정도를 여러 가지로 모의하여 유한요소법을 이용한 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 동기 발전기의 운전중 진동감사가 가능함을 확인하였다. 향후, 온도측정을 위한 RTD 센서와 고정자 권선의 절연진단을 위한 부분방전 측정기능을 추가한 자속(진동), 온도 및 부분방전 동시 측정 센서의 개발과 함께 운전중 온도, 부분방전, 진동의 종합 감시 및 진단이 가능한 모니터링 시스템을 개발할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.T. Thomson, et al., "On-line Current Monitoring to Diagnose Air-gap Eccentricity in Large Three-Phase Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1372-1377, 1999
- [2] D.G. Dorrell, et al., "Analysis of Air-gap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Air-gap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 24-34, 1997
- [3] 박도영, 황돈하, 강동식, 김용주, 송상욱, "전류와 자속측정에 의한 회전기 진동측정", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 2001년도 추계학술대회 회전기관련 국가지정연구실 Session 논문집, pp. 38~41, 2001. 10. 26.
- [4] J. Penman, et al., "Detection and Location of Interturn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, pp. 652-658, 1994
- [5] D.R. Rankin, "The Industrial Application of Phase Current Analysis to Detect Rotor Winding Faults in Squirrel Cage Induction Motors", Power Engineering Journal, pp. 77-84, April 1995
- [6] A.H. Bonnett, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 4, pp.921-936, 1992