

# 진동신호를 고려한 발전기 고정자의 상태진단 시스템 연구

## Condition diagnosis system research considering the state of the generator stator vibration signal

김연환†, 주영호, 구재량, 김은석

Yeon-Whan Kim., Young-Ho Ju, Jae-Ryang Gu, Eun-Seok Kim

Key Words : Gennerator stator(발전기 고정자), Vibration signal(진동신호), Condition(상태), Diagnosis(진단) Error Back-propagation Learning Algorithm(오류역전파 알고리즘)

### ABSTRACT

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 발전기 고정자의 가진 주파수의 거동패턴을 모델링하고 거동패턴의 위상변화를 학습패턴으로 만들어 오류 역전파 알고리즘으로 학습시킴으로써 고정자 권선 단말부에 대한 상태 감지한다. 고정자 모사장치를 구성하고 장치로부터 가진 데이터를 획득하여 실험한 결과 가진 주파수에서 일정한 형태의 거동패턴을 보였으며, 거동을 학습패턴으로 만들어 오류 역전파 알고리즘에 적용한 결과 뛰어난 성능을 보였다.

### 1. 서 론

발전기 고정자의 권선에 작용되는 힘은 터빈 발전기 로터의 불평형 또는 기계적 결합에 의해서 발생하는 힘과 전자기력, 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. 그리고 로터 회전에 의한 가진력은 로터 회전주파수인 30Hz(원자력 발전소) / 60Hz(화력발전소) 또는 이 주파수의 조화 주파수로 작용된다. 이 힘은 발전기 프레임을 통하여 고정자 권선에 전달되며, 힘의 작용력에 의해서 고정자에 진동이 발생하게 된다. 발전기 고정자의 진동은 기계적인 요인과 전기적인 요인으로 구분되어 진다.

기계적인 요인은 로터의 기계적인 불평형으로 발생한다. 로터의 기계적 불평형은 밸런싱 웨이트(balancing weight)의 탈락, 오일 휠(oil whirl), 베어링 부하(bearing loading), 커플링 정렬(coupling alignment), 오정렬된 리테이닝-링(misaligned containing-ring), 유압 씬(hydrogen seal) 또는 오일 와이퍼 러빙(oil wiper rubs), 기초와의 공진(foundation resonance), 로터의 구조적 구성품 문제, 단

조품의 균열 그리고 열적 영향과 같은 조건에 의해 야기된다. 기계적 진동 문제에 있어서 진동 수준은 현장 변화와 상관없이 일정하게 유지되지만 축의 회전속도와 부하에 따라 변하게 된다. 일반적으로 로터에서 발생할 수 있는 진동의 형태는 기계적 또는 열적 원인에 의한 불평형, 고정부와 회전부의 접촉에 의한 러빙, 유체의 동적 불안정에 의한 진동, 축계의 균열에 의한 진동, 커플링 또는 축 정렬불량에 의한 진동으로 분류할 수 있다.

전기적인 요인은 전기적인 외란으로 발생하는 진동이다. 발전기가 과부하 또는 급작스러운 전기적인 외란에 노출될 때 정상조건에 비하여 매우 큰 전압이 발생되어 고정자 단말부에 위치한 권선의 경우는 허용치를 초과하는 열적, 전기적, 그리고 기계적인 응력이 유발되므로 건전성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 즉 고전압의 펄스파가 갑자기 유길 될 경우 발전기에서 비교적 취약한 구조를 갖는 고정자 권선 단말부가 심각하게 손상되기 쉽다. 고정자 내를 흐르는 자화 전류(magnetizing current)가 어느 순간에 양 또는 음의 최대 값을 가질 때 최대가 되는 고정자와 회전자 사이의 전자기력을 발생한다. 전자기력은, 정상 운전 상태에서는 회전자에 의하여 고정자 철심을 끌어당김으로써 발생하는 힘과 고정자 권선 사이 및 회전자와 고정자 철심의 상호작용에 의하여 연속적으로 발생하는 힘이다. 발전기 고정자 권선에 작용하는 전자기력은 전류와 자속 밀도의 벡터 외적으로 표현된다. 발전기 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 전자기장에 기인한 전자기력으로 말리암아 발전기는 정적인 변형을 일으키며, 실제 운전중에 회전자에 의하여 전자기장이 회전하므로

† 교신저자; 한국전력공사 전력연구원

E-mail : ywkim@kepri.re.kr

Tel : (042) 865-7556,

Fax : (042) 865-7501

발전기는 동적인 힘을 받는다. 즉 2극 발전기의 경우 발전기 로터 회전주파수의 2배, 4극 발전기의 경우 4배인 120Hz의 가진 주파수를 가지며 고정자 권선 및 권선 단말부에 진동을 유발시키고 피로로 인한 균열 및 수명 감소를 야기시킨다.

본 논문에서는 발전기 고정자 권선 단말부에 대한 상태 감시를 위해 오류 역전파 알고리즘을[1][2][6][7] 이용하여 진동 특성을 학습시킴으로써 권선 단말부의 건전성을 진단한다. 고정자 권선 단말부의 거동을 표현하기 위해서 단말부에 반경방향(Radial axis)과 접선방향(Tangential axis)에 각각 가속도계를 고정하고 주파수 응답함수를 측정한다. 그리고 학습패턴을 만들어 주기 위해서 로터 회전력에 의한 60Hz와 전자력에 의한 120Hz의 주파수에 대해서 각각 위상 변화를 추출한다. 이들 학습패턴을 오류역전파 알고리즘에 학습시킴으로써 운전 중 발전기의 공진 가능성과 국부 진동 현상을 진단할 수 있다.

## 2. 모사실험장치의 구성

발전소의 발전기는 고장 진단이나 부품 교환 이외에 가동을 정지시키는 일이 거의 없다. 그리고 한번 정지시켰다가 가동시키는데 엄청난 손실이 발생한다. 이러한 문제점들 때문에 고정자 단말부에 센서를 부착하고 상태감시를 시험하기에는 비현실적이다. 그래서 본 연구에서는, 발전기 고정자에서 발생하는 가진 주파수인 로터 회전력에 의한 60Hz와 전자력에 의한 120Hz를 가진시켜 주는 가진기와 고정자의 외형과 유사한 모사 모형을 만들어 그 주위에 가속도 센서를 부착하였다. Fig1은 고정자 모사 실험장치이다.

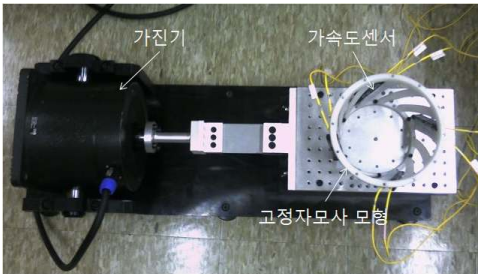


Fig 1. Stator configuration of the device simulation experiments

고정자모사 모형에서 센서의 부착은 기준점으로부터 0°, 90°, 180°, 270° 위치에 반경방향과 접선방향으로 각각 설치한다. 그리고 0°에 위치한 반경방향 센서를 기준센서로 정한다. 그림 2는 고정자에 부착된 센서위치를 극좌표에 나타내고 있다. 모사 실험장치의 가진기를 작동시키면 고정자에 부착된 센서들이 60Hz와 120Hz에서 가진되어 나타난다. 그림 3은 기준센서에 대한 파워스펙트럼 차트로 위상이

60Hz와 120Hz에서 가진되었음을 알 수 있다.

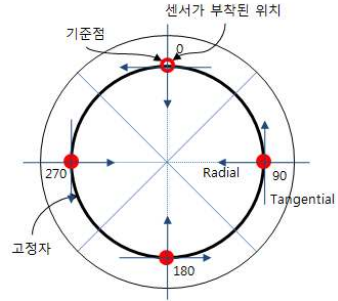


Fig 2. Mounting position of the sensor and reference sensor

### 2.1 센서신호의 동기화

가동 패턴을[3] 만들어 주기 위해선 기준센서를 기준으로 다른 센서들의 위상을 동기화 시켜줘야 한다. 위상 동기화에 대한 순서도는 Fig3과 같다. 먼저, 고정자에 설치된 가속도 센서들로부터 가진신호를 수집한다.

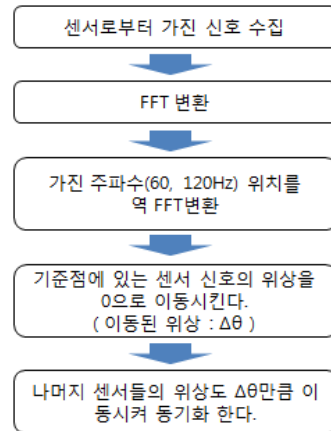


Fig 3. Synchronization flowchart of the sensor signal

두 번째로, 가진 주파수(60Hz, 120Hz)의 위상과 진폭을 찾아내기 위해서 각 신호에 대해서 FFT변환을 한다. 세 번째는, FFT변환된 데이터에서 60Hz와 120Hz의 위치를 찾아서 역 FFT변환을 하여 각각에 대한 위상신호를 구한다. Fig 5는 60Hz에서 기준센서에 대한 위상신호를 보여주고 있다. 네 번째는, 센서들의 위상을 동기화시켜주기 위해서 세 번째에서 구해진 기준센서의 60Hz와 120Hz의 위상신호의 시작위치를 진폭이 0인 위치로 이동시킨다. 이때 이동된 위상각은  $\Delta\theta$ 이다. 마지막으로 나머지 센서들의 위상도  $\Delta\theta$ 만큼 이동시킨다.



Fig 4. Phase signal for reference sensor at 60Hz

### 3. 학습패턴 모델링

발전기 고정자는 정상상태일 경우 가진 주파수(60Hz, 120Hz)에서 일정한 형태의 거동패턴을 나타낸다. 그러나 진동이 발생하면 가진 주파수의 크기와 위상의 변화로 거동패턴이 다른 형태로 변화하게 된다. 본 연구에서는 정상상태일 때의 가진 주파수의 거동패턴 변화를 역전과 알고리즘에 학습시킴으로써 고정자의 어떤 변화에 대한 상태를 감시한다. 학습패턴은[4][5] 위상변화(0°→90°→180°→270°→0°)에 따른 거동패턴의 좌표이동 변화량을 가지고 모델링한다.

### 4. 실험 결과

발전기 고정자와 유사한 조건으로 실험을 하기 위해서 가진기의 가진 주파수를 60Hz와 120Hz를 가진시키고 4개의 방향에 설치된 반경방향과 접선방향 가속도 센서로부터 신호를 수집하였다. 실험을 위해서 Inter Core2 Duo CPU 2.4GHz, 2GB RAM, 윈도우 7 운영체제를 사용하였으며 알고리즘은 C#을 이용하여 코딩하였다. 그리고 데이터를 수집하고 거동패턴을 만들어 주기 위해서 사용된 파라미터는 샘플링율이 40KHz, FFT분해능은 6400, 샘플링 시간은 0.4096초, 그리고 새로운 극좌표를 구하기 위해서  $r=5000$ 을 사용하였다.

가진된 주파수를 학습시키기 위해서 가진 주파수에 대한 거동패턴과 학습패턴을 만들어 주어야 한다. 거동패턴은 기준센서의 위상신호를 기준으로 다른센서의 위상신호를 동기화 시켜서 얻을 수 있다. 그림 10과 12는 60Hz와 120Hz 가진점에 대해서 센서들의 위상변화를 나타낸 것으로 첫 번째 센서를 기준으로 위상 동기화를 시킨 것이다. 그리고 그림 12과 13은 위상변화 데이터로 특정 위상(0°, 90°, 180°, 270°)에 대하여 거동패턴을 극좌표로 표현한 것이다. 이들 특정 위상의 거동패턴의 이동 변화로부터 식2를 이용하여 학습패턴을 만들 수 있다.

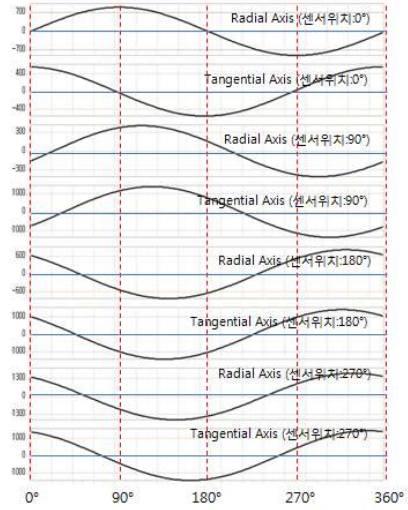


Fig 12. A phase shift of the sensors by 120Hz

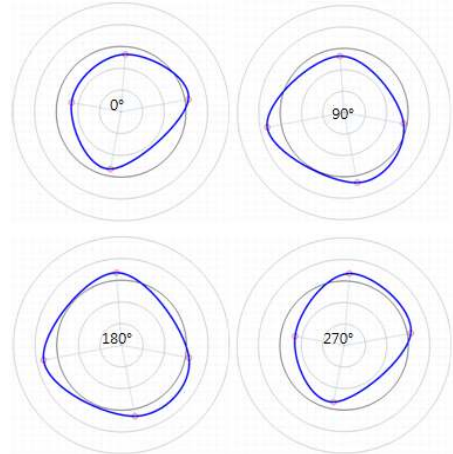


Fig 13. Change behavior patterns according to the phase shift at 120Hz

본 논문에서는 고정자 가진 주파수에 대한 상태 감시를 위해서 60Hz와 120Hz에 대한 학습패턴과 시험패턴을 각각 126개를 사용하여 실험하였다. 실험에 사용된 역전과 알고리즘의 조건은 다음과 같다. 입력 뉴런은 32개, 히든층 (Hidden layer)은 3개, 히든층의 뉴런은 각각 10개, 10개, 6개를 사용, 히든층 뉴런의 활성화함수는 각각 선형함수, 시그모이드(Sigmoid)함수, 시그모이드함수를 사용, 출력 뉴런은 1개, 출력 뉴런의 활성화함수는 시그모이드함수를 사용하였다. 그리고 학습시키기 위한 조건은 학습률이 0.1511, 오류 제한값이 0.0001, 모멘트를 0.45, 최대 반복 횟수를 5000번으로 하였다.

실험결과 60Hz의 가진점에 대한 학습은 201번의 반복과 2.61초에 오류율이 9.97E-05로 수렴하였고 120Hz의 가진점은 80번의 반복과 0.81초에 오류율이 9.971E-05로 수렴

하였다. 60Hz와 120Hz 가진점에서 학습반복 횟수에 대한 오류변화율을 보여주고 있다. 그리고 Table 1은 학습된 결과에 대해서 시험패턴 126개의 인식률을 실험한 결과이다. 오류 임계값이 0.02보다 적어지면 거짓부정(False negatives)이 발생하였다.

Table 1. Precision and recall of test patterns for the frequency (threshold: 0.02)

가진점	정확률	재현률	True positives	False positives	False negatives
60Hz	1	1	126	0	0
120Hz	1	1	126	0	0

## 5. 결 론

본 논문에서는 발전기 고장자 권선 단말부에 대한 상태 감시를 위해서 고장자 모의 실험장치를 구성하고 가진기로부터 획득한 가진 데이터를 가지고 가진점에 대한 거동패턴을 모델링하는 방법과 학습패턴을 만들어 오류 역전과 알고리즘에 학습시키는 방법에 대해서 연구하였다.

실험 결과 가진 주파수대에서 고유한 거동 패턴이 만들어지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 학습패턴을 만들어 오류 역전과 알고리즘에 학습시킨 결과 오류를 최소화하면서 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있었다.

## 참고문헌

[1] 이현관, “역전과 알고리즘의 성능개선을 위한 활성화 함수의 이득 가변화 이용”, 정보통신연구, Vol. 14, pp.105-129, 2004.

[2] 정효준, 황원태, 서경석, 김은한, 한문희, “온도 및 습도의 단기 예측에 있어서 역전과 알고리즘의 적용”, 환경영향평가, Vol. 12, No. 4, pp.271-279, 2003.

[3] 김희수, 배용채, 이두영, 김연환, 이현, “발전기 운전에 따른 고장자 권선의 진동 특성 변화”, 한국소음진동공학회 학술대회, Vol.2006, pp.1-5, 2006.

[4] 김상민, 오광식, 이동로, “문자인식을 위한 로버스트 역전과 알고리즘”, 한국데이터정보과학회지, Vol. 8, No. 2, pp.163-171, 1997.

[5] 박희주, 김상민, “오프라인 필기체 한글인식을 위한 로버스트 역전과 알고리즘”, 산업기술연구소논문집, Vol. 6, pp.417-423, 1999.

[6] Farag, W. A., Quintana, V. H., Lambert-Torres, G., "Genetic Algorithms and Back-propagation: A Comparative Study", CANADIAN CONFERENCE ON

ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, Vol. 1, pp.93-96, 1995.

[7] Khorasani, K., Yin, H., "An Adaptive Structure Neural Network Using an Improved Back-Propagation Learning Algorithm", WORLD CONGRESS ON NEURAL NETWORKS, Vol. 3, pp.III-402-III-407, 1995.