

진동신호 특성 예측 및 분류를 통한 회전체 고장진단 방법

Rotating machinery fault diagnosis method on prediction and classification of vibration signal

김동환[‡], 손석만[†], 김연환^{*}, 배용채^{*}

Donghwan Kim, Seokman Sohn, Yeonwhan Kim, Yongchae Bae

Key Words : 진동 진단방법(Vibration diagnostic methods), 터빈 회전체 고장(Rotor faults in a turbine), 패턴 인식(Pattern recognition)

ABSTRACT

In this paper, we have developed a new fault detection method based on vibration signal for rotor machinery. Generally, many methods related to detection of rotor fault exist and more advanced methods are continuously developing past several years. However, there are some problems with existing methods. Oftentimes, the accuracy of fault detection is affected by vibration signal change due to change of operating environment since the diagnostic model for rotor machinery is built by the data obtained from the system. To settle a this problems, we build a rotor diagnostic model by using feature residual based on vibration signal. To prove the algorithm's performance, a comparison between proposed method and the most used method on the rotor machinery was conducted. The experimental results demonstrate that the new approach can enhance and keeps the accuracy of fault detection exactly although the algorithm was applied to various systems.

1. 서 론

전력 산업에 시장의 원리가 도입되면서부터 전기 발전분야 사업자 입장에서는 점차적으로 발전소 주요설비의 가동률을 향상시키고 최대한으로 정비 비용을 절감시켜 경쟁적인 경영 환경에서 살아남기 위한 다양한 전략이 추진되고 있다. 이러한 경영환경으로 인해 주요설비의 운전조건이 가혹해 짐과 동시에 정비 비용을 최소한으로 절감하려 하기 때문에 그 어느 때보다 최적화된 설비의 진단 및 유지보수 기법 개발이 요구되고 있는 실정이다 [1]. 특히 주

요 설비 가운데 터빈 시스템의 경우 발전소 가동시간과 효율에 큰 영향을 차지하는 부분으로 이와 관련된 설비 진단 기술이 지속적으로 발달되고 있다. 회전체의 경우 현 상태를 정량적으로 판단하기 위해 모델기반의 진단과 데이터(발전소 운전신호) 기반의 진단기법 형태로 연구개발이 이루어지고 있으나 회전체 시스템은 복잡한 구조로 이론적인 모델을 구축하기 힘들기 때문에 데이터를 기반으로 한 다양한 기법이 개발되고 있다 [2].

최근에는 과거의 고장이력 데이터를 바탕으로 통계적 기법을 적용하여 진단모델을 설계할 통해 회전체 시스템의 상태를 진단하는 다양한 연구와 적용이 진행되고 있다. 그러나 데이터를 기반으로 진단으로 설계할 경우 통계적 보정 혹은 정규화를 통해 이러한 단점을 극복하려 하고 있지만 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다변수 예측기법을 응용하여 진단모델을 형성하고 [3] 그 결과를 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는

† 손석만, 한국전력 전력연구원 발전연구소
E-mail : ssman@kepco.co.kr
Tel : 042-865-5667, Fax : 042-865-5627
‡ 김동환, 한국전력 전력연구원 발전연구소
* 한국전력 전력연구원 발전연구소

기법들과 비교하여 그 결과를 분석하였다.

2. 실험방법 및 고장진단 결과

(1) 실험방법

회전체 모사장치를 Fig. 1과 같이 구성한 후 회전축에 90도 간격으로 GAP 센서를 부착하여 계측기를 통해 원 진동 데이터를 획득한다. 이 때 정상구간(Steady-state)에서 시스템 정상상태를 기본으로 질량 불평형(Unbalance), 오정렬(Misalignment), 접촉마모(Rubbing) 등의 고장을 인위적으로 인가한 후 각각 상태에 대한 진동 데이터를 취득한다. 특히 본 연구에서는 시스템 구조의 변경으로 발생하는 진단 오차율을 저감하는 방법을 고안했기 때문에 이를 입증하기 위해서 회전체 모사장치를 1-축 1-디스크 및 2-축 1-디스크로 구조 변화를 주어 가며 두 가지 시스템에 대한 정상상태(Normal state)와 고장상태의 진동신호를 취득하였다.

(2) 회전체 고장진단 모델의 생성

다음으로 계측기에서 획득한 데이터를 바탕으로 신호처리 과정을 거쳐 회전체 진동 데이터에 대한 다양한 통계적 특성값을 계산한다. 본 실험에서 사용한 특성들은 시간영역과 주파수 영역에서 평균(mean), 표준 편차(Standard deviation), 실효값(Root mean square, 이하 RMS), 파고율(Crest factor), 주파수 중심(Frequency center) 등이다. 이렇게 계산된 특성값들은 각각 정상/이상 상태별로 분류가 되는 진단 모델을 형성하게 위한 데이터베이스(DB)로 사용된다.

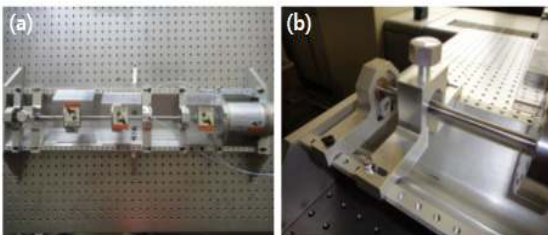


Figure 1. (a) The experimental setup of RK-4 Rotor Kit system with sensors and (b) The example of fault-induced case in the system.

기본적으로 진동 데이터를 기반으로 회전체 시스템 정상상태(normal state)의 각각 고장인가 상태 특성 행렬의 예측값을 다변수 예측함수를 응용하여 구한다. 이와 같은 방법으로 예측한 특성행렬은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫 번째, 정상상태(Normal state)의 특성값과 고장인가 상태의 특성값을 비교하여 유사성이 있는 부분은 높은 가중치를 두어 최종적인 결과에 그 값이 많이 반영되도록 계산을 하며, 동떨어진 부분의 경우에는 그 가중치를 최소로 주어 최종값에 영향을 작게 미치도록 한다. 이러한 방법으로 정상상태(Normal state) 진동신호의 특성값을 기반으로 계산되는 고장인가 상태 예측값은 실제값과 비교해 보았을 때 정상상태(Normal state)와 유사성을 보이는 특성열(특성 행렬 중 일부)은 그대로 유지가 되는 반면, 고장인가로 변화되는 특성열은 예측값과 실제값의 차이가 발생하여 추후 기계학습 시 고장을 분류하는 유용한 요소로 작용을 한다. 특히 본 연구에서는 위와 같은 예측값을 보다 효율적으로 산출하기 위해 회전체 시스템의 진동신호가 정상적으로 들어올 때는 (1)처럼 정규분포(Normal Distribution) 함수를 사용하여 가중치를 주어 예측값을 생성하였다. 참고로 (1)에서 x 는 진동신호의 특성값을 의미하며 m 은 x 의 평균, σ 는 x 의 표준편차를 의미한다. 이 정규분포 함수를 바탕으로

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad [1]$$

회전체 시스템에서 고장인가 신호가 발생하였을 경우 (2)와 같이 지수함수(Exponential Distribution)를 사용하여 유사성 여부에 대한 가중치를 보다 엄격하게 적용하여 특성의 변화를 극대화 시킨다.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad [2]$$

여기 (2)에서 λ 는 빈도를 나타내는 모수으로써 본 방법에 적용할 시에는 1.5 이상의 상수값을 대입하여 사용하였다. 참고로 Fig. 2의 흐름에서 보는 것과 같이 진동신호에 대한 예측과 실제값의 차이를 잉여행렬 형태로 만든 후 회전체 시스템의 고장상태와 정상상태를 분류하는 진단 모델을 생성하였다.

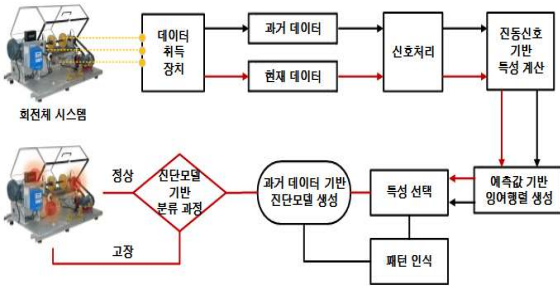


Figure 2. Block diagram of suggested rotor fault diagnosis method based on vibration signal

(3) 진단결과

기존의 방법과 본 연구에서 제시하는 방법의 차이를 강조하기 위해 일반적으로 진단 시 많이 응용되는 K-평균 알고리즘, 서보트 벡터 머신(Support Vector Machine, 이하 SVM) 기법 등을 사용하였고 그 결과는 아래 Table 1에서 확인할 수 있다. 일반적으로 정규화된 진동신호의 특성값을 사용하여 진단을 할 경우 특정 시스템, 즉 하나의 시스템에서 진단모델을 생성하고 진단결과를 얻을 경우에는 높은 정확도로 분류가 되어 고장의 분류가 가능하였다(SVM, FDA, k-mean 모두 90 % 이상의 정확도를 나타냄). 그러나 동일한 성격을 가지는 회전체 시스템에서 A 구조(1-축 1-디스크)에서 진단모델을 생성하여 B 구조(2-축 1-디스크)에 적용할 경우 진단의 정확도가 이전에 비해 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다(Table 1 중 빗금 쳐진 열 확인). 그러나 우리가 제시하는 방법은 위와 같이 진단모델을 생성하는 시스템과 진단하는 시스템이 동일하지 않더라도 Table 1의 진단 결과를 보면 알 수 있듯이 일반적인 방법에 비해 높은 정확도를 나타내며 분류가 되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 데이터를 기반으로 고장에 대한 진단모델을 생성하는 방법의 경우 목표 설비 대상의 외부환경 및 구조의 변화에 따라 진동신호가 미소하게 변화되며 이는 추후에 진단모델을 생성할 때 진단의 정확도를 떨어뜨리는 저해요소로 작용을 한다. 그러나 본 방법은 시스템의 특성 및 구조가 미소하게 달라지더라도 그 달라진 부분은 예측값의 계산을 통해 상쇄가 되며 고장의 발생에 따른 특성은 그대로 두드리지게 특성값이 살아 있기 때문에 진단 분류 시 유연하게 정확도가 유지가 되는 것이다.

Table 1. The generation and application of Rotor diagnostic models from each case for comparison of the classification accuracy.

진단방법	회전체 모사장치 1-Shaft 1-Disk	회전체 모사장치 2-Shaft 1-Disk	진단 결과
K-mean	진단모델 생성	진단모델 적용	76 %
K-mean with proposed method	진단모델 생성	진단모델 적용	87 %
SVM	진단모델 생성	진단모델 적용	59 %
SVM with proposed method	진단모델 생성	진단모델 적용	83 %
FDA	진단모델 생성	진단모델 적용	78 %
FDA with proposed method	진단모델 생성	진단모델 적용	99 %

3. 결론

본 연구에서는 발전소의 주요설비 중 하나인 회전체의 상태를 진동신호를 기반으로 진단하는 과정에서 설비 변경 혹은 구조 변경으로 발생하는 오차율을 저감시키기 위해 다변수 예측기법을 응용하여 새로운 특성값을 생성하여 진단모델을 생성하고 고장을 진단하였다. 그 결과 기존의 방법에 비해 하나의 시스템에서 진단모델을 생성한 후 유사한 특성을 가지는 다른 시스템에 적용할 경우 높은 진단 정확도를 나타내며 정상상태와 고장상태가 분류가 되는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이 논문에서 제시하는 방법은 아직 보완해야 할 부분은 많지만 향후 강건한 회전체 진단 시스템에 유용하게 사용 될 수 있는 방법 중 하나가 될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2014년도 지식경제부 재원으로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, D. H., 2014, The technology trends of diagnostic system for maintenance of power plant. KEPCO Power technology trends, p44-51.

(2) Jeon, H. S., Sohn G. S., Kim, H. J., Yoon, D. B., Park, J. H., 2013, A study on the rotor fault diagnosis using hidden markov models, Proceedings of the KSNVE Annual fall Conference.

(3) Kim, D. H., Sohn, S. K., Kim, J. H., Kim, Y. W., Bae, Y. C., 2014, A flexible rotor fault diagnosis system based on feature estimation classification method, Condition monitoring and diagnostic Conference.