

제어봉구동장치제어기기 전력변환부에 대한 새로운 고장검출 방법

천종민, 김춘경, 김석주, 이종무, 신종렬, 권순만
한국전기연구원

A New Fault Detection Method for Power Converter Module in Control Rod Control System

J. M. Cheon, C. K. Kim, S. J. Kim, J. M. Lee, J. R. Shin and S. Kwon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 원자력 발전소 제어봉구동장치의 전력변환부에서 발생하는 고장들을 검출하기 위한 새로운 방법을 소개한다. 전력변환부 고장은 제어봉구동장치 동작에 악영향을 미치게 되고 이는 제어봉 오동작으로 이어져 원자로 출력 제어에 차질을 준다. 이러한 이유로 해당 고장의 신속 정확한 검출이 요구된다. 이를 위하여 디지털 시스템 설계용으로 새로운 고장 검출 방법을 도출하고, 기존 웨스팅하우스 모델의 아날로그 맥동 검출기의 약점을 개선하고자 한다.

1. 서 론

원자력 발전소의 제어봉구동장치제어기기(Control Rod Control System; CRCS)의 주된 기능은 제어봉 집합체를 움직이는 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism; CRDM)를 제어 명령에 맞게 구동시키기 위하여 전력을 변환하여 공급하는 것이다. 원자로의 출력 제어는 중성자 흡수제로 만들어진 제어봉들의 상하 운동을 통해 이루어지므로 제어봉구동장치의 제어가 원자로 출력을 결정한다고 볼 수 있다. 비상시에는 CRCS가 CRDM에 공급되는 전력을 차단하여 제어봉들을 원자로 내부로 추락시킴으로 인해 원자로를 안전하게 정지시킨다[1,2,3]. 오래 전에 건설된 원전의 계측제어시스템은 노후화된 설비와 복잡한 아날로그 회로들로 구성되어 많은 제약이 존재하였으나, 새로운 계측제어시스템을 개발하는데 있어 디지털 시스템을 도입함으로써 효율성이거나 간편성에서 개선을 취하고자 한다. 새롭게 제작된 CRCS에는 제어봉 속도 및 방향 명령을 수수하여 구체적인 제어봉 동작이 구현되도록 명령을 만들어 주는 주 제어부와 주 제어부로부터 오는 명령에 따라 CRDM에 공급되는 전력을 알맞게 제어하는 전력제어부가 디지털화되었다. 주 제어부는 PLC 기반으로, 전력제어부는 DSP 기반으로 설계되었다[4]. 기존 시스템의 여러 아날로그 회로들의 기능들을 하나의 소프트웨어로 작성하여 디지털 시스템을 설계함으로써 시스템의 간편성을 가능하게 한다.

웨스팅하우스사에서 제작한 원전 모델의 아날로그 맥동 검출기는 전력함 내의 전력변환부 삼상반파컨버터의 상고장(Phase Failure)을 검출하는 기능을 가지고 있다. 본 논문에서는 이 기능을 효과적으로 실현하며 기존의 맥동 검출기의 단점을 개선하는 새로운 고장 검출 알고리즘을 웨이브렛을 사용하여 고안한다. 그 성능은 모의 실험을 통해 기존 맥동 검출기의 성능과 비교하여 보여 준다.

2. 본 론

2.1 고장 검출 대상

2.1.1 삼상반파컨버터

CRCS 전력변환부의 삼상반파컨버터의 세 개의 사이리스터에는 삼상 교류 전원의 각 상이 연결되어 있다.

이를 통해 공급되는 전류의 다양한 레벨을 얻기 위해 사이리스터는 여러 시점들에서 점호가 되어야 한다. 이 점호시점을 점호각이라고 하며, 점호각은 주 제어부에서 오는 명령에 따라 설정되는 전류 시퀀스에 맞게 자동으로 변하게 된다. 시퀀스에서 상위 레벨의 전류를 요구할 때는 최대 비율로 전류가 증가하도록 점호각이 최대한 당겨지고 이를 최대 양(+) 강제라고 한다. 전류가 설정 레벨로 상승하여 접근하면 다시 점호각을 조금씩 늦추고 하위 레벨의 전류를 요구할 때는 점호각을 최대한 늦추어 전류가 최대 비율로 감소하도록 한다. 이를 최대 음(-) 강제라고 한다.

삼상반파컨버터에서 생기는 고장을 상고장이라고 한다. 이 상고장에는 도통하지 않는 사이리스터가 존재하여 생기는 상 빠뜨림 고장과 게이트 제어가 상실된 사이리스터로 인한 다이오드 동작 고장이 있다. 그림 1에서는 이들 고장 시의 삼상반파컨버터에서 공급되는 전압 파형을 보여 준다.

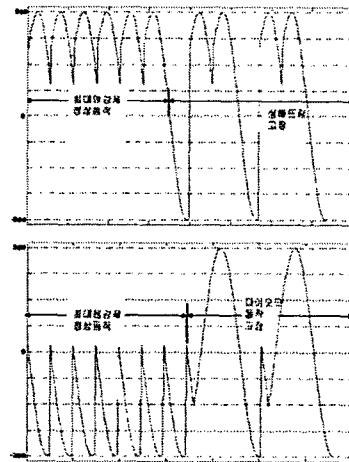


그림 1. 상고장 발생시의 전압 파형

2.1.2 맥동 검출기

기존의 웨스팅하우스 모델에서는 아날로그 맥동 검출기를 이용하여 상고장을 검출하였다.

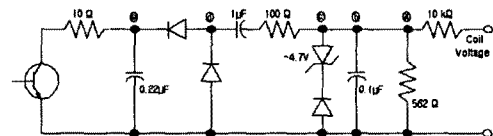


그림 2. 맥동 검출기

그림 1에서 최대 양 강제 시의 정상 상태와 상 빠뜨림

고장 상태의 맥동 비율을 보면, 약 1대 4 정도이고, 최대 음 강제 시의 정상 상태와 다이오드 동작 고장 상태의 맥동 비율은 약 1대 2 정도인 것을 알 수 있다. 맥동 검출기에서는 음(-) 클리퍼를 사용하여 이들 맥동 비율을 모두 정상 시와 고장 시에 1대 3으로 개선하였다. 이를 통해 그림 2의 ㉔단 출력이 +8.2 V를 기준으로 이를 초과하면 무조건 상고장이 발생하였다고 판단하게 된다. 그러나 이 검출기의 단점은 아날로그 회로의 복잡성 외에 기능적으로 전류 레벨이 변경되는 최대 양 강제나 최대 음 강제 시에만 상고장을 검출하는 제약이라는 것이다. 실제로 제어봉 동작 정지 시에 정지 그래픽 코일에 전류를 공급하는 삼상반파컨버터에 상고장이 생기면 제어봉 추락의 위험성이 있다. 따라서 일정 전류 레벨이 유지되는 동안에도 고장 검출의 필요성이 대두된다.

2.2 새로운 고장 검출 방법

2.2.1 푸리에 변환 이용

푸리에 변환은 관심 신호에 속한 주파수 성분을 분석하는데 가장 많이 사용되는 방법이다[5]. 고장 전과 후 각각의 맥동 주파수가 변한 것이라는 생각 하에 푸리에 변환을 이용하여 맥동 주파수를 조사한다.

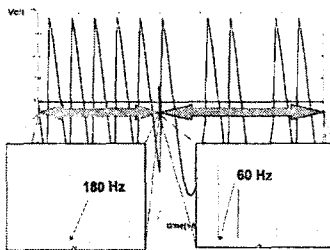


그림 3. 푸리에 변환을 통한 맥동 주파수 결과

공급 전원의 주파수가 60 Hz라면 삼상반파컨버터의 맥동 전압 주파수는 정상 동작 시에 180 Hz가 된다. 이는 그림 3에서 정상 동작 시의 유효 주파수가 180 Hz인 것으로 알 수 있다. 그리고 고장이 발생하였을 때는 60 Hz가 유효 주파수가 되어 고장 사실 여부를 알 수 있다. 그러나 고장 발생 사실만 인지할 뿐, 그 고장이 언제 발생하였는지 정확한 고장 시점을 알 수 없는 단점이 있다. 이 단점을 보완할 방편으로 국지 분석력이 뛰어난 웨이블릿 변환을 이용하면 고장 발생 사실뿐 아니라 그 정확한 시점을 알 수 있을 것으로 판단하였다[6].

2.2.2 웨이블릿 변환 이용

웨이블릿 변환 이용 상고장 검출 방법을 도출하기 위하여 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform; DWT)을 도입하였고, Daubechies DB4의 세부 컴포넌트 cD1의 결과를 참고하였다.

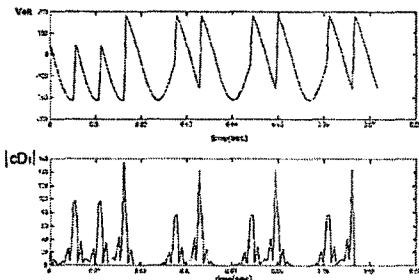


그림 4. 최대 음 강제 시의 삼상트림 고장에 대한 DWT 결과

그림 4에서 보면, 정상 동작 시에는 두 개의 피크 사

이 간격이 5.6msec 정도이지만, 고장이 발생하면 피크 간격이 이보다 늘어난 부분이 발생하였다. 피크 간격이 정상치를 초과하는 순간을 고장 시점으로 판단한다.

2.3 모의실험

모의실험을 시행하는 조건으로 샘플링 시간을 0.56msec로 하였고, 웨이블릿 변환을 위한 파형 데이터를 30 포인트씩 가져와서 16.8msec 기간의 시간-창을 설정한다.

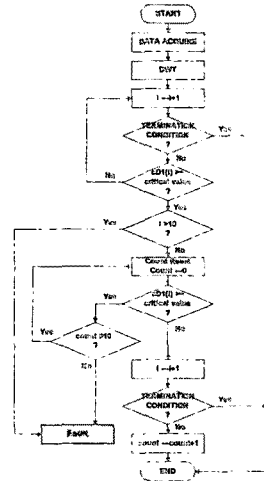


그림 5. 제안된 고장 검출 방법의 플로차트

그림 5에서는 맥동 전압에 대한 DWT 결과로 생기는 피크들 사이의 간격을 조사하여 정상 동작시의 간격을 초과하는 시점에 고장 사실을 알리는 알고리즘을 설명한 플로차트를 보여주고 있다.

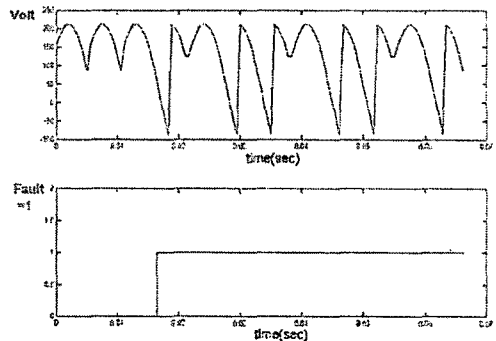


그림 6. 최대 양 강제 시 다이오드 동작 고장

그림 6에서는 이미 다이오드 동작 고장이 발생한 상태에서 최대 양 강제가 시행되고 그 다음 제어 단계로 넘어간 상태에서 고장이 발생된 경우를 보여준다. 최대 양 강제 기간에는 일반적으로 다이오드 동작 고장이 발생하여도 정상 동작과 같은 파형을 보이기 때문에 고장 검출이 되지 않는다. 기존의 맥동 검출기가 최대 강제 시에만 고장을 검출한다면 강제 기간이 끝나서야 발견되는 고장에 대한 검출이 불가능하다. 그림 6에서는 제안된 방법이 이런 상황에서도 효과적으로 고장을 검출하고 있음을 알 수 있다.

그림 7에서는 이미 삼상트림 고장이 발생한 상태에서 최대 음 강제가 시행되고 그 다음 제어 단계로 넘어간 상태에서 고장이 발생된 경우를 보여준다. 최대 음 강제 기간에 발견되지 않는 삼상트림 고장을 간파할 수밖에 없는 맥동 검출기에 비해 제안된 검출 방법은 강제 기간

이 끝나고 나서도 검출을 시행하여 해당 고장을 효과적으로 검출하고 있음을 확인할 수 있다.

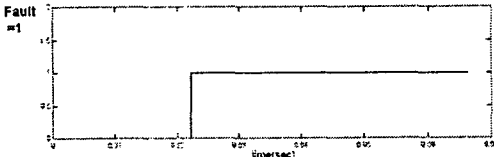
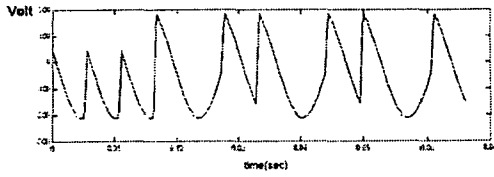


그림 7. 최대 음 강제 시 상파트럼 고장

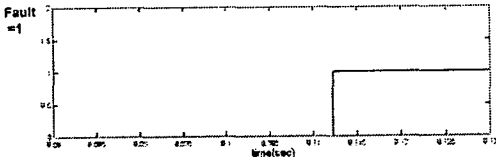
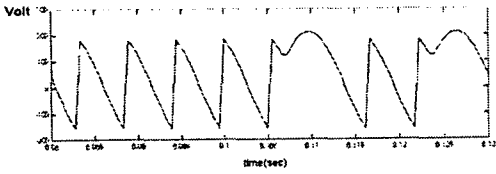


그림 8. 제어봉이 정지 상태로 유지될 때 다이오드 동작 고장

그림 8에서는 제어봉이 정지 상태로 유지될 때 다이오드 동작 고장이 발생한 경우의 결과를 보여 준다. 앞서도 언급하였듯이 맥동 검출기는 제어봉 정지 시에는 고장 검출을 시행하지 않는다. 그림 8의 결과를 보면 제안된 고장 검출 방법이 다이오드 동작 고장 발생 사실과 그 시점을 효과적으로 알려주고 있음을 알 수 있다.

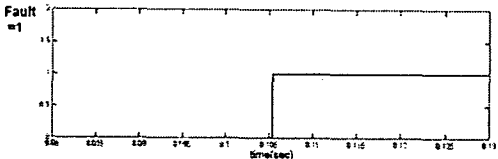
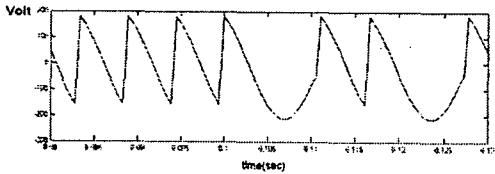


그림 9. 제어봉이 정지 상태로 유지될 때 상파트럼 고장

그림 9에서는 제어봉이 정지 상태로 유지될 때 상파트럼 고장이 발생한 경우의 결과를 보여 준다. 맥동 검출기가 제어봉 정지 기간에 검출하지 못하는 고장을, 제안된 고장 검출 방법은 그 고장 발생 사실과 시점을 효과적으로 검출하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

디지털 기술을 기반으로 하는 새로운 제어봉구동장치 제어기기를 설계하여 기존의 아날로그 시스템의 단점을

개선하고자 한다. 여러 아날로그 회로들의 기능들을 디지털 시스템의 소프트웨어로 구현하는데 있어 본 논문에서는 CRCS 전력변환부 삼상반파컨버터의 상고장에 대한 맥동 검출기를 대체하는 새로운 고장 검출 방법을 도출하였다. 이 검출 방법에는 푸리에 변환과 웨이블릿 변환을 적용하여 보았고, 고장 검출 사실과 그 시점을 동시에 알릴 수 있는 능력을 가진 웨이블릿 변환을 최종적으로 적용하게 되었다. 모의실험을 통하여 그 성능을 확인하여 본 결과, 전 제어 기간에 걸쳐 검출을 시행하는 부분에서 기존의 맥동 검출기의 검출 기간의 제약성을 극복한 것을 알 수 있었고, 푸리에 변환에서 충족시키지 못한 고장 발생 시점을 효과적으로 알려주는 장점도 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정구관, "제어봉제어설비", 한국수력원자력(주), 1991
- [2] 박광석 외 5명, "경수로 제어봉 구동장치용 새로운 전력 제어 시스템", *Proc. of the I&C, Automation and Robotics Research Meeting joint announcement*, pp. 221-224, 1997
- [3] "Rod Control System, System Training Guide", Univ. of California, Berkeley
- [4] 천종민 외 4명, "공통 제어봉 구동장치 제어기기 설계", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2331-2333, 2002
- [5] G.Y. Park, B.S. Park, J.S. Yoon, D. H. Hong and J. H. Jin, "Development of Fault Monitoring Technique for Agitator DrivingSystem", *Proc. of ICCAS*, pp. 1-6, Oct., 2002.
- [6] C. Sidney Burrus, Ramesh A., Gopinath and HaitaoGuo, *Introduction to Wavelets and Wavelet Transform*, Prentice-Hall Inc., 1998.