

원자로 제어봉제어시스템 전력변환부에 대한 새로운 고장 검출 방법

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

천종민[†], 김춘경^{*}, 김석주^{**}, 권순만^{**}, 신종렬^{***}

(Jong-Min Cheon, Choon-Kyoung Kim, Seog-Ju Kim, Soonman Kwon and Jong-Ryeol Shin)

Abstract - In this paper, we introduce a new method of detecting faults for a power converter unit in Control Rod Control System. The faults of a power converter unit can exert harmful influence upon the operation of Control Rod Drive Mechanisms and the control of the reactor output. This situation makes the quick and correct detection of failures in a power converter unit very important. We devise a new method of fault detection for the digital power controller and improve the drawbacks of the existing fault detector.

Key Words : Control Rod Control System, Power Converter Unit, Fault Detection, Wavelet Transform

1. 서론

원자력 발전소의 제어봉제어시스템(Control Rod Control System; CRCS)의 주된 기능은 제어봉 집합체를 움직이는 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism; CRDM)를 상부의 제어 명령에 맞게 구동시키기 위하여 제어봉구동장치의 동작을 결정하고 해당 구동장치에 전력을 제어하고 변환하여 공급하는 것이다. 원자로의 출력제어는 중성자 흡수재로 만들어진 제어봉들의 상하 운동을 통해 이루어지므로 CRDM에 대한 제어가 원자로 출력을 결정한다고 볼 수 있다. CRCS는 제어봉 속도 및 방향 명령을 수수하여 구체적인 제어봉 동작이 구현되도록 명령을 만들어 주는 주제어부가 있는 제어함과 제어함으로부터 오는 명령에 따라 CRDM에 공급되는 전력을 알맞게 제어하는 전력제어부와 공급 전력을 변환하는 전력변환부를 포함하는 전력함 등으로 구성되어 있다[1,2]. 오래 전에 건설된 원전의 계측제어시스템은 노후화된 설비와 복잡한 아날로그 회로 기반의 하드웨어적으로 구성되어 많은 제약이 존재하였으나, 디지털 시스템으로 계측제어시스템을 개발하면 기존 기능들을 하드웨어가 아닌 소프트웨어로 설계하여 효율성이나 간편성에서 개선을 취할 수 있다. 디지털형 CRCS는 제어함의 주제어부와 전력함의 전력제어부가 디지털화 되었으며 주제어부는 PLC 기반으로, 전력제어부는 DSP를 기반으로 설계한다[3]. 웨스팅하우스사에서 제작한 원전 모델의 아날로그 맥동 검출기는 전력함 내의 전력변환부 삼상반파컨버터의 상고장(Phase Failure)을 검출하는 기능을 가지고 있다. 본 논문에서는 상고장 검출 기능을 효과적

으로 구현하며 기존의 맥동 검출기의 단점을 개선하는 디지털형 제어봉제어시스템에서의 전력변환부 고장 검출 기법을 고안하는 것이다.

2. 본론

2.1 고장 검출 대상

2.1.1 전력변환부

CRCS 전력변환부는 세 개의 사이리스터들이 삼상 교류 전원의 각 상에 연결되어 있는 삼상반파컨버터로 구성되어 있다. 이를 통해 공급되는 전류의 다양한 레벨을 얻기 위해

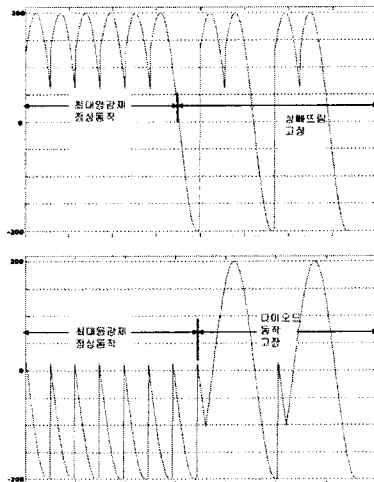


그림 1. 상고장 발생시의 전압 파형

[†] 교신저자 : 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 研究員

E-mail : jmcheon@keri.re.kr

^{*} 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 先任研究員

^{**} 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹, 責任研究員

^{***} 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹

사이리스터는 여러 시점들에서 점호가 되어야 한다[1]. 이 점호시점을 점호각이라고 하며, 점호각은 주제어부에서 오는 명령에 따라 설정되는 전류 시퀀스에 맞게 자동으로 변화게 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 낮추고 하위 레벨의 전류를 요구할 때는 점호각을 최대한 늦추어 전류가 최대 비율로 감소하도록 한다. 이를 최대 음(-) 강제라고 한다. 삼상반파컨버터에서 생기는 고장을 상고장이라고 하는데 이 상고장에는 도통하지 않는 사이리스터가 존재하여 생기는 상 빠뜨림 고장과 게이트 제어기 상실된 사이리스터로 인한 다이오드 동작 고장이 있다. 그림 1에서는 이들 고장 시의 삼상반파컨버터에서 공급되는 전압 파형을 보여 준다.

2.1.2 맥동검출기

기존의 웨스팅하우스 모델에서는 아날로그 맥동 검출기를 이용하여 상고장을 검출하였다. 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. 그림 2의 맥동 검출기에서는 제너 다이오드에 의한 음(-) 클리퍼를 사용하여 이들 맥동 비율을 모두 정상 시와 고장 시에 1대 3으로 개선하였다.

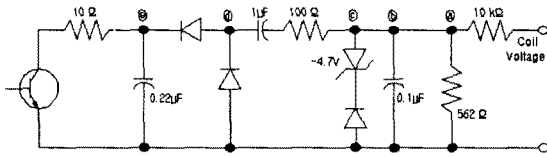


그림 2. 맥동 검출기

이를 통해 그림 2의 ⑥단 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 한시적으로 상고장을 검출하는 제약이라는 것이다. 실제로 제어부 동작 정지 시에 정지 집게 코일에 전류를 공급하는 삼상반파컨버터에 상고장이 생기면 제어부 추락의 위험성이 있다. 따라서 일정 전류 레벨이 유지되는 동안에도 고장 검출의 필요성이 대두된다.

2.2 새로운 고장 검출 방법

제어부 구동장치에 전력을 공급하는 전원의 주파수가 60 Hz라면 삼상반파컨버터에 의해 변환된 전압의 맥동 주파수는 정상 변환 시에 60 Hz의 3배인 180 Hz가 된다. 그러나 상고장이 생겼을 때는 180 Hz 보다 적은 맥동 주파수를 가지게 된다. 이런 사실에 착안하여 맥동 주파수를 읽어서 삼상반파컨버터의 이상 유무를 판단하며, 맥동 주파수를 알기 위한 맥동 파형 분석에는 웨이블릿 변환 기법을 사용하였다.

웨이블릿이란 적분하여 0의 값을 가지는 곡선 신호를 뜻하는데, 여러 가지 모(母) 웨이블릿 중에서 본 논문에서는

Morlet 웨이블릿을 웨이블릿 변환에 사용한다. Morlet 웨이블릿 식은 다음 식과 같다.

$$\psi(t) = e^{-t^2} \cos(2\pi t) \quad (1)$$

식 (1)의 웨이블릿에서 유도되는 웨이블릿 그룹 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-0.5} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} \quad (2)$$

여기서 a 는 웨이블릿 파형의 높이와 폭을 조절하는 스케일 인자이고 b 는 웨이블릿 파형을 수평으로 이동시키는 위치 인자이다. 코일 전압 v 에 대하여 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 연속 웨이블릿 변환하는 식은 다음 식 (3)과 같다.

$$C_{a,b}(b) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v(n) \psi_{a,b}(n-b) \quad (3)$$

실제 시스템에서는 코일 전압이 0.56msec로 샘플링되므로 이산 식을 사용하며 연속 웨이블릿 변환은 코일 전압 신호와 웨이블릿 그룹 식을 교차상관(cross correlation)한 결과와 같다[4]. 식 (3)은 식 (2)에서 위치 인자 b 가 0인 웨이블릿 그룹 식을 교차상관식에 사용한 것을 알 수 있다. 이제 임의의 신호에 대한 웨이블릿 변환 결과가 해당 신호의 주파수 정보를 반영하게 되는지 설명한다. 파형의 라디안 주파수는 스케일 인자 a 와 밀접한 관계가 있다. 식 (2)의 $\psi((t-b)/a)$ 의 라디안 주파수는 $2\pi/a$ 이고 따라서 스케일 인자 a 는 $\psi((t-b)/a)$ 의 주파수에 반비례한다. 식 (3)의 교차상관식의 결과는 두 신호 사이의 상관관계를 판별하는 것이므로 웨이블릿 그룹 식의 스케일 인자 a 를 분석 신호 주파수의 역수로 취하면 다른 스케일 인자를 가지는 웨이블릿 그룹 식을 통한 교차상관 결과보다 큰 값을 가지게 된다. 따라서 180 Hz의 정상 맥동 주파수를 가지는 전압 파형을 스케일 인자를 1/180으로 설정한 웨이블릿 그룹 식과 교차상관하면 어떠한 다른 스케일 인자의 결과보다 크게 나올 것이고, 상고장 발생으로 180 Hz보다 적은 맥동 주파수를 가지는 비정상 전압 파형을 만났을 때는 상대적으로 작은 교차상관값을 출력할 것이다.

웨이블릿 변환을 이용한 구체적인 상고장 검출 알고리즘을 소개한다. 먼저 0.56msec씩 샘플링된 코일 전압 파형 데이터 30개를 저장하여 1/60초(약 16.67msec) 동안의 전압 파형을 얻는다. 30 포인트 전압 파형을 스케일 인자 a 를 1/180으로 설정하여 웨이블릿 변환한 결과 계수값들을 2-norm 취한 값을 C_{180} 이라고 하고, 같은 전압 파형을 스케일 인자 a 를 1/60으로 설정하여 웨이블릿 변환한 결과 계수값들을 2-norm 취한 값을 C_{60} (64, 70, 76, 82)이라고 한다. 스케일 인자 1/60을 사용하는 이유는 삼상반파컨버터의 3상 중에서 한 상에 상고장이 발생하였을 때의 전압 파형 맥동 주파수가 60 Hz이기 때문이다. 이렇게 구한 C_{180} 과 C_{60} 의 크기를 서로 비교하면 전

력변환부가 정상일 때는 C_{180} 이 C_{60} 보다 크고, 전력변환부에 이상이 생겨 상고장이 발생하였을 때는 C_{60} 이 C_{180} 보다 크게 나온다. 이런 결과를 통해 C_{60} 이 C_{180} 보다 더 큰 조건에서 상고장이 발생한 것으로 판단한다.

2.3 모의실험

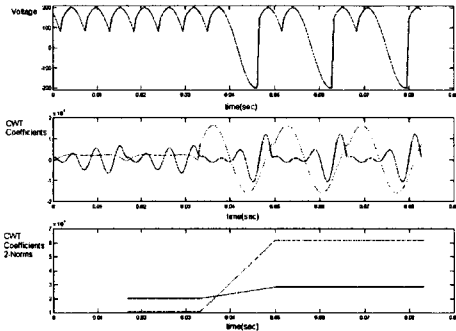


그림 3. 최대 양 강제 시에 상 빠뜨림 고장 발생 결과

그림 3에서 제어봉 동작 중, 최대 양 강제 시에 상 빠뜨림 고장이 발생하면 맥동 주파수가 180 Hz에서 60 Hz로 변하면서 C_{60} (점선)이 C_{180} (실선)보다 커진 결과로부터 고장 발생을 검출할 수 있다.

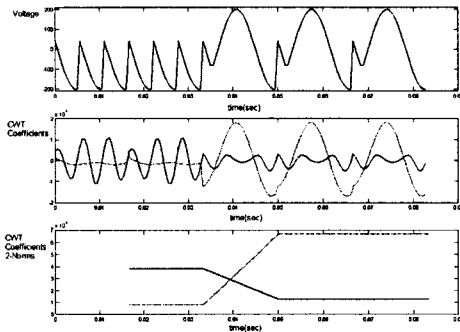


그림 4. 최대 음 강제 시에 다이오드 동작 고장 발생 결과

그림 4에서 제어봉 동작 중, 최대 음 강제 시에 다이오드 동작 고장이 발생하여도 C_{60} (점선)이 C_{180} (실선)보다 커진 결과로부터 고장 발생을 검출할 수 있다.

앞의 그림 3과 4에서는 제어봉 동작 중의 상고장 검출 결과를 보여주었고 다음은 제어봉 정지 상태의 상고장에 대하여 새로운 검출 방법에 의한 검출 결과를 보여준다.

그림 5는 제어봉 정지 상태에서 정지 집게 코일 용 삼상반파컨버터에 상 빠뜨림 고장이 발생하였을 경우의 결과들을 보여주는데 고장이 발생하면서 맥동 주파수가 180 Hz에서 60 Hz로 변하고 C_{60} (점선)이 C_{180} (실선)보다 커진 결과로부터 고장 발생을 검출할 수 있다. 그림 6은 제어봉 정지 상태에서 정지 집게 코일 용 삼상반파컨버터에 다이오드 동작 고장이 발생하였을 경우 C_{60} (점선)이 C_{180} (실선)보다 커진 결과로

부터 고장 발생을 검출할 수 있다.

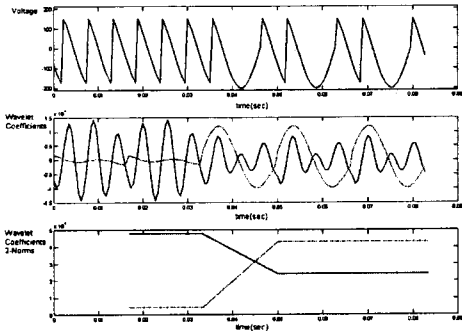


그림 5. 제어봉 정지 상태에서 상 빠뜨림 고장 발생 결과

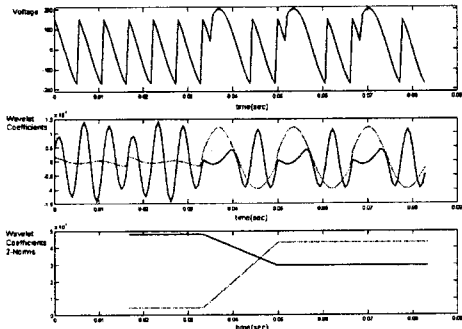


그림 6. 제어봉 정지 상태에서 다이오드 동작 고장 발생 결과

3. 결론

복잡한 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 웨이블릿 변환이 사용되었고, 코일 전류 제어 전 기간에 걸쳐 검출을 시행하는 부분에서 기존의 맥동 검출기의 검출 기간의 제약성을 극복한 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 정구관, "제어봉제어설비", 한국수력원자력(주), 1991
- [2] "Rod Control System, System Training Guide", Univ. of California, Berkeley
- [3] 천종민 외 4명, "공통 제어봉 구동장치 제어기기 설계", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2331-2333, 2002
- [4] R. M. Rad, A. S. Bopardikar, "Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications", ADDISON-WESLEY, 1998.