

웨이블릿 변환을 이용한 원자로 제어봉의 이동 검출 방법

천종민, 김춘경, 이종우, 박민국, 권순만
한국전기연구원

A Method for detecting movement of control rods using Wavelet Transform

Jong-Min Cheon, Choon-Kyoung Kim, Jong-Moo Lee, Min-Kuk Park and Soonman Kwon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문은 원자로 제어봉구동장치 각 기구의 동작을 감시하여 이 장치에 의한 제어봉의 이동 여부를 검출하는 방법에 관한 것이다. 제어봉구동장치의 일부에서 전기적, 기계적 결합이 생기면 제어봉의 스텝 이동이 제대로 수행되지 못하고, 결국 해당 제어봉은 원자로의 목표 열적 출력을 위한 바른 위치에 도달하지 못하게 된다. 이렇게 되면 제어봉들 사이에 위치 편차가 발생하여 원하는 원자로 열적 출력을 얻을 수 없게 되므로 제어봉구동장치 각 기구의 동작을 신속하고 정확하게 파악하여 해당 제어봉의 이동 여부를 검출할 수 있어야 한다. 제어봉구동장치의 기구들은 각자의 여자 코일의 전류 파형 변화를 통해 동작 여부를 확인할 수 있는데 본 논문에서는 코일 전류 파형을 분석하기 위하여 국소적인 왜곡 검출 능력이 우수한 웨이블릿 변환 기법을 사용하였다.

1. 서 론

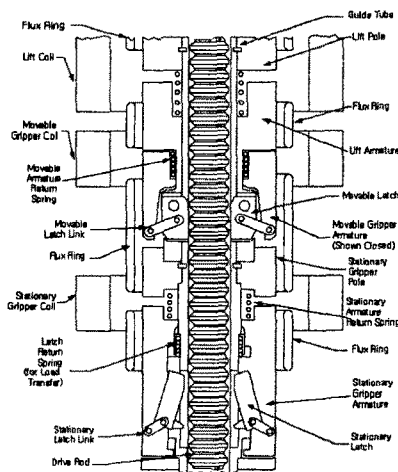
원자력 발전소의 원자로 출력은 중성자 흡수재로 만들어진 제어봉들이 원자로 내부에서 오르내리는 수직 방향 이동을 통해 제어된다. 이들 제어봉들을 구동시키는 것이 제어봉구동장치(Control Rod Drive Mechanism, CRDM)이다. 제어봉은 정해진 길이의 스텝 단위로 이동하는데, 제어봉구동장치가 제어봉들을 구동시킬 때에는 이동 방향 별로 상이한 일련의 과정들을 통해 스텝 이동을 수행한다. 제어봉구동장치 내의 기구들이 방향 별로 정해진 순서에 의해 동작하여 제어봉을 잡고 있는 구동축이 스텝 이동하는 것이다[1].

만약 제어봉구동장치를 구성하고 있는 어느 기구에서 전기적, 기계적 결합이 생기면, 제어봉의 스텝 이동을 위하여 요구되는 순차적 기구 동작이 제대로 수행되지 못하게 되고, 결국 해당 제어봉은 원자로의 목표 열적 출력을 위한 바른 위치에 도달하지 못하게 된다. 이러한 제어봉구동장치의 결합을 인식하지 못하고 계속해서 제어봉 이동 관련 명령을 내리면 결합이 있는 제어봉구동장치에 의해 구동되는 제어봉과 정상적으로 구동되는 제어봉들 사이에 위치 편차가 발생하여 원하는 원자로 열적 출력을 얻을 수 없게 된다. 이러한 이유로 제어봉구동장치 각 기구의 동작을 신속하고 정확하게 파악하여 해당 제어봉의 이동 여부를 검출할 수 있어야 한다.

제어봉구동장치의 기구들은 코일 여자에 의한 전자기적 힘에 의해 동작하게 되는데 기구의 동작 발생이 코일 전류 파형 변화에 영향을 미친다. 따라서 제어봉구동장치의 동작을 판단하기 위하여 각 코일의 전류 파형 변화를 관찰할 필요가 있으며 본 논문에서는 코일 전류 파형을 분석하기 위하여 국소적인 왜곡 검출 능력이 우수한 웨이블릿 변환 기법을 사용한다[2].

2. 본 론

2.1 제어봉구동장치



〈그림 1〉 3-코일 형식 제어봉구동장치

제어봉구동장치는 전자기-잭(Electromagnetic-Jack) 타입을 취하며 구동 코일에 전류를 흘려서 이를 통해 발생하는 자기력을 이용하여 집게들이 구동축을 잡거나 제어봉 집합체가 달린 구동축을 들어 올리거나 내리게 된다. 그림 1에서는 본 논문에서 다루는 3-코일 형식의 제어봉구동장치의 구조를 보여주고 있다. 이 구동장치에는 총 3개의 코일들이 설치되어 있으며 이들은 정지 집게 구동용 코일(Stationary Gripper Coil), 이동 집게 구동용 코일(Movable Gripper Coil) 그리고 올림 코일(Lift Coil)이다. 제어봉들은 제어봉구동장치 중심에 있는 구동축의 하단에 다발 형식으로 묶여서 부착되어 있으며 제어봉구동장치의 기구들이 제어봉 방향 별로 정해진 일련의 과정으로 한 스텝 길이만큼 홀이 파여진 구동축을 잡거나 놓고, 올리거나 내리서 제어봉이 상·하로 이동하게 된다.

우선 제어봉 인출 과정을 설명하면, 처음에는 정지 집게가 구동축을 잡고 있다가 이동 집게가 잡으면 정지 집게가 구동축을 놓는다. 이동 집게가 연결되어 있는 올림 전기자(Lift Armature)가 올림 자극(Lift Pole)에 부착되면서 이동 집게가 구동축을 잡고 함께 올라간다. 한 스텝 올라가면 정지 집게가 다시 구동축을 잡고 이동 집게가 구동축을 놓는다. 고정자(Lift Pole)에 부착되었던 이동 집게가 다시 내려가서 제자리로 되돌아오면 제어봉 인출 스텝 과정이 마무리되는 것이다.

그림 2는 세 개의 코일들 중에서 올림 코일의 전류 파형을 보여 준다. 올림 코일의 전류 흐름에 따라 이동 집게와 연결된 올림 전기자가 이동자가 되어 고정자인 올림 자극에 부착되거나 분리된다. 코일의 인덕턴스는 이동자와 고정자 사이의 거리에 반비례하는데[3], 이동자가 고정자에 접근할수록 인덕턴스가 증가하여 전류는 감소(그림 2의 a)하고 이동자가 고정자에서 분리되면서 감소되는 인덕턴스로 인해 전류는 증가(그림 2의 b)한다[4].

제어봉구동장치의 각 기구는 이를 구동하는 코일 전류 파형을 통해 그 동작 여부를 판단할 수 있으므로 본 논문에서도 코일 전류 파형을 분석하여 기구의 정상 동작 여부를 확인하여 해당 제어봉의 이동 여부를 검출하는 방법을 제시한다.

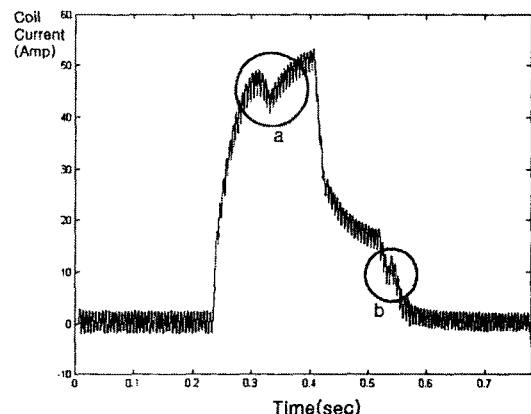
2.2 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환의 여러 장점들 중에서 본 논문에서는 국부 분석(local analysis) 능력에 관심을 두었다[2]. 웨이블릿의 국부 분석 능력을 이용하여 그림 3에서 제어봉구동장치의 기구 동작으로 인해 생기는 전류 파형의 왜곡 부분을 검출한다.

웨이블릿이란 적분하여 0의 값을 가지는 곡선 신호를 뜻하는데, 여러 가지 모(母) 웨이블릿들 중에서 본 논문에서는 Morlet 웨이블릿을 웨이블릿 변환에 사용한다. Morlet 웨이블릿 식은 다음과 같다.

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

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



〈그림 2〉 올림 코일 전류 파형

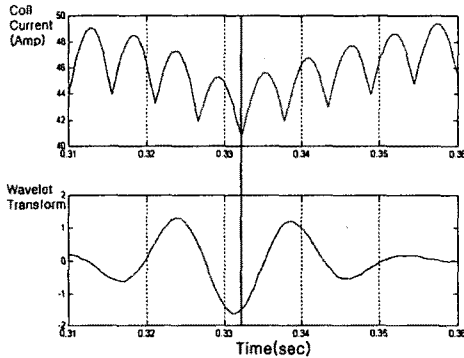
$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-0.5} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \forall a, b \in R \quad (2)$$

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

$$C_{a,b}(b) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i(n) \psi_{a,0}(n-b) \quad (3)$$

실제 시스템에서는 코일 전류가 0.56msec로 샘플링되므로 이산 식을 사용하며 연속 웨이블릿 변환은 코일 전류 신호와 웨이블릿 그룹 식을 교차상관(cross correlation)한 결과와 같다[5]. 식 (3)은 식 (2)에서 위치 인자 b 가 0인 웨이블릿 그룹 식을 교차상관식에 사용한 것을 알 수 있다.

2.3 제어부의 이동 검출



〈그림 3〉 올림 전기자(이동자)가 올림 자극(고정자)에 부착된 결과

그림 3은 올림 전기자가 이동하여 올림 자극에 부착되는 순간의 전류 파형과 웨이블릿 변환 결과를 보여 주고 있다. 그림 2의 a 부분 부근의 전류 데이터를 이용하여 웨이블릿 변환한 결과 이동자가 고정자에 붙는 순간(약 0.03 초)에 상대적으로 큰 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 진동의 유무로 제어부구동장치의 각 기구의 동작 발생을 판단하여 최종적으로 해당 제어부의 이동 여부를 검출할 수 있다.

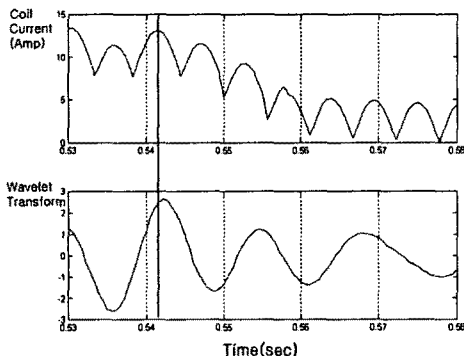
2.4 모의 실험

본 논문에서는 제어부구동장치의 총 세 개의 코일 중에서 올림 코일을 대상으로 하여 모의실험을 수행하였다. 이동자인 올림 전기자가 고정자인 올림 자극에 부착될 때의 결과는 그림 3에서 보여주고 있으므로 그림 4에서는 이동자가 고정자에서 분리될 때(그림 2의 b)의 결과를 보여준다. 분리되는 시점인 0.54초 부근에서 웨이블릿 변환 결과에 진동이 발생하는 것을 알 수 있다.

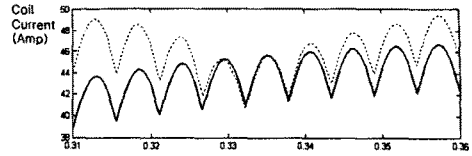
그림 5과 그림 6에서는 각각 이동자가 고정자에 부착되지 못하는 경우와 이동자가 고정자에서 분리되지 못하는 경우의 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 실선의 비정상 동작에서의 웨이블릿 변환 결과는 점선의 정상 동작에 비해서 진동이 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있다.

전 영역에 대해서 감시하는 부담을 줄이기 위하여 본 논문에서는 기구 동작 예상 발생 시점을 기준으로 0.05초 동안에 대해서만 웨이블릿 변환을 통한 동작 감시 영역으로 설정하였다.

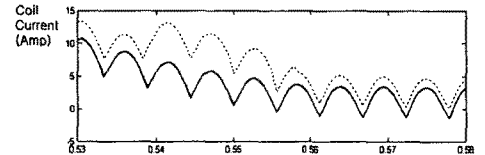
이렇게 이동 방향 별로 정해진 일련의 시퀀스로 제어부인 한 스텝 이동하게 될 때 각 기구 별로 정해진 동작(각 집게는 구동축을 물거나 놓는 동작들 그리고 올림 전기자가 올림 자극에 부착되거나 분리되는 동작들이 정상적으로 이루어졌는지 감시하여 해당 제어부의 주어진 방향으로의 이동 여부를 정확하게 검출할 수 있다.



〈그림 4〉 올림 전기자(이동자)가 올림 자극(고정자)과 분리된 결과



〈그림 5〉 올림 전기자가 올림 자극에 부착되지 않은 결과



〈그림 6〉 올림 전기자가 올림 자극에 분리되지 않은 결과

3. 결 론

본 논문에서는 원자로의 출력을 제어하는 제어부의 주어진 방향으로의 이동 여부를 검출하기 위하여 제어부를 구동하는 제어부구동장치에 대한 기구 동작 발생을 감시하는 방법을 제시하였다. 전자기 힘에 의한 기구 동작은 여자 코일 전류 파형에 영향을 주므로 코일 전류 분석을 통해 기구의 동작 발생 여부를 확인할 수 있다. 국부 탐색 능력과 잡음 제거 능력이 우수한 웨이블릿 변환을 이용하여 기구 동작의 발생을 정확하게 확인할 수 있으므로 최종적으로 본 논문에서 제시한 방법이 효과적인 제어부 이동 검출 방법이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 정구관, "제어부제어설비", 한국수력원자력(주), 1991.
- [2] *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*[®].
- [3] 한국전기연구원, "부상 및 추진 제어기술 개발", 과학기술부, 1998.
- [4] Combustion Engineering, Inc., "Automatic Controller For Magnetic Jack Type Control Rod Drive Mechanism," US-Patent 4,363,778, 1982.
- [5] R. M. Rad, A. S. Bopardikar, "Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications", ADDISON-WESLEY, 1998.