

원자력 발전소 증기 발생기의 인공지능 모델링에 관한 연구 System Modeling and Intelligent Controller Design of the Steam Generator of Nuclear Power Plant

* 정길도, * 박종호, ** 한후석

* 전북대학교 전기 전자 제어 공학부, ** 기초전력연구소

Kil To Chong, Jong Ho Park, Hoo Sek Han

School of Electrical Engineering, Chonbuk National University. EESRI

요약

증기 발생기 수위 제어기의 성능 향상은 발전소의 정지 횟수를 줄여 발전소 신뢰도 및 가동률을 향상시키고 또한 기타 여러 부품의 수명에도 영향을 주어 경제적으로 보다 효율적인 발전소 운영에 기여한다. 이러한 수위 제어의 발전을 위해서 본 연구에서는 E. Irving의 모델을 사용하였다. E. Irving의 모델이 단순화한 관계로 단점을 가지고는 있으나 프로그램화가 편리하고, 또한 증기 발생기의 특성을 잘 표현하기 때문에 이용하였다. 먼저 시스템의 출력, 즉 증기 발생기의 수위를 안정화시키기 위하여 퍼지 제어기를 Case by Case로 선정하여 제어를 하였으며, 그 다음으로 시스템의 두 입력, 증기량과 퍼지 제어기에서 선택되어진 급수 유량, 그리고 전 단계의 출력인 증기 발생기의 수위를 입력으로 하는 신경 회로망을 이용하여 시스템을 규명하였다.

1. 서론

원자력 발전소에서 기계 조작(Operation)의 신뢰도(Reliability)와 안전도(Safety)는 무엇보다도 중요한 사항이며, 이를 높이기 위하여 현재는 지능 기법을 이용하여 인간과 기계를 조화시키는 방향으로 많은 노력을 기울이고 있다. 현재, 원자력 발전소에서 이용되고 있는 발전소 구성 요소(Component)의 진단법(Diagnostics)이나 제어(Control)방법들은 아직도 급성장하는 컴퓨터 산업이나 최신의 계측 제어 이론 등에 뒤떨어져 있으며 만족한 상태에 이르지 못하고 있다. 인간과 기계의 조화를 강화시키는 주 요점은 현존하는 진단법과 제어 장치 위에 지능(Intelligence) 또는 지식(Knowledge), 공정(Processing)을 접목시키는 것이다.

원자력 발전소에서 발생하는 작업 중지(Trip)의 60%정도가 발전을 시작할 때와 낮은 전기 생산량 가동시 물 공급(Feedwater)과 그 부속 장치로부터 일어난다는 사실이 조사에 의해 밝혀졌다[1][2]. 그리고 그 중 반 이상의 경우가 증기 발생기의 수위 제어와 직접 관계됨을 알 수 있다. 따라서 증기 발생기의 수위를 적절히 조절하는 것은 매우 중요한 문제인 것이다. 특히 증기 발생기의 수위 제어가 어려운 것은 저 출력영역에서 소위 수축/팽창(Shrink/Swell) 현상이라는 증기 발생기의 고유의 열수력학적 특성때문이다. 이런 현상은 증기 발생기를 제어 회로상에서 한 개의 플랜트로 취급할 때 플랜트에 입력되는 증기량, 급수량, 급수온도, 1차측 냉각재 온도 및 기타 열수력학적 인자 등이 복

합적으로 작용하여 나타나는 현상이다. 즉, Downcomer 영역 과 Tube 및 Riser영역을 비교할 때 두 영역 사이에서는 밀도 차에 의한 Driving Force가 있게 되며 고출력으로 갈수록 이 Force는 커지게 되어 안정된 운전상태에 들어간다. 그러나 저 출력에서는 Tube측의 Quality가 줄기 때문에 밀도가 커지게 되며 이에 따라 두 영역 사이의 수두 차가 적게되어 Recirculation이 줄어들게 된다. 극단적인 경우에는 Downcomer측과 Tube Region측의 수두가 같아지게 되는 소위 Manometer상태가 되며, 이러한 경우 증기 발생기의 수위 제어는 통상적인 수위 반응을 보이지 않게 된다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 본 과제에서는 퍼지(Fuzzy)와 신경 회로망을 이용했다.

2. 증기발생기 모델

가압 경수로의 증기 발생기의 모델들은 여러 가지 종류가 있으나 본 연구에서는 E. Irving의 단순화된 전달 함수 모델을 사용하였다[3]. E. Irving 모델은 주 급수 유량과 증기량 두 가지를 사용하며 모델 계수는 출력 Power의 함수로 표현된다. 이 모델은 가압수형의 증기 발생기에 대해 원자로의 출력에서 증기 유량과 주 급수 유량의 계단 변화에 따른 증기 발생기 수위의 응답 특성을 이용하여 주 급수 유량과 증기량 그리고 수위에 대한 전달 함수로 증기 발생기를 모델링하였다. 그러나 E. Irving 모델은 증기 발생기의 입력 변수로서 1차측 냉각재 온도와 주 급수 온도 등이 포함되어 있지 않기 때문에 이러한 온도 요인에 의한 수위 변화를 고려하지 못하는 단점이 있다[4]. E. Irving 모델의 수학적 모델은 다음과 같은 4차의 전달 함수로 표현된다.

$$y(s) = \frac{G_1}{s}(q_u(s) - q_v(s)) - \frac{G_2(q_u(s) - q_v(s))}{1 + \tau_2 s} + \frac{G_3 s}{\tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau_1^{-1}s + s^2} q_u(s) \quad (2.1)$$

식(2.1)에 나타난 각 항의 의미는 다음과 같다.

$\frac{G_1}{s}$: 증기 발생기 내외로 급수유량 및 증기량의 출입에 의한 증기 발생기 내의 질량 변화(Mass Capacitor)의 효과를 나타내며 1차측의 열제거능을 나타내는 항이다. (단, G_1 은 부하의 변동에 무관한 일정한 값이다.)

$\frac{G_2}{1 + \tau_2 s}$: 열수축 및 팽창의 열적반대현상을 나타내는 항이다. G_2 와 τ_2 는 저 출력으로 갈수록 큰 값으로 두어 수축과 팽창(Shrink & Swell) 현상이 저 출력에서 크게 나타나게 하였다.

$\frac{G_3 s}{2\tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau_1^{-1}s + s^2}$: 증기 발생기 내부의 한쪽 Water Column의 수위 증가로 인한 연결된 다른 Column에 주는 기계적 진동 효과를 나타내는 항이다.

식 (2.1)에서 $G_2 - G_1 \tau_2 > 0$ 인 경우가 되면 양수인 ZERO가 존재하게 되어 NonMinimum Phase 효과가 나타나게 된다. 각각 출력에서의 계수 값들을 대입하면 부하에 따라 그 값들이 차이는 있으나 $G_2 - G_1 \tau_2 > 0$ 을 만족함을 알 수 있다. 이런 양수인 ZERO의 존재로 인하여 제어 이득을 크게 하면 전체 계통에 불안정성이 존재하게 되므로 가능한 제어이득을 작게 해야하며 제어의 효율성을 감소하는 것을 의미하는 것이다.

3. 시스템 규명을 위한 신경 회로망 프로그램

시스템의 규명을 위하여 퍼지 제어기를 플랜트에 적용시킨 폐회로 시스템의 규명을 신경회로망을 이용하였다[5]. 신경 회로망의 입력층은 모두 3개의 입력 값들을 가진다. 즉, 시스템의 입력인 증기량과 퍼지 제어기의 출력에 영향을 받는 급수 유량 그리고 전 단계의 출력 등이다. 신경회로망의 전체 구조는 입력 부분과 은닉층 2개 그리고 출력층으로 구성되었다. 은닉층 1에서는 15개의 노드로 구성되어 있고, 은닉층 2에

서는 12개의 노드로 되어 있다. 그리고 출력층은 1개의 노드로 구성되어 있다.

신경 회로망 학습을 위해 필요한 입력은 시스템이 안정화된 이후의 결과들을 이용하였으며 학습 알고리즘에 맞게 입력 데이터 파일들은 정규화시켰다. 신경 회로망의 학습을 위해 학습 데이터를 총 27가지의 경우로 데이터 파일을 만들었으며, 테스트데이터 파일은 총 9가지의 경우를 살펴보았다. 테스트 값들은 학습에 이용되지 않은 데이터 값들을 사용하였고, 시스템 입력은 시스템이 안정화된 후 일정 크기의 펄스를 가한 것을 고려하였다.

신경 회로망의 학습 알고리즘으로 역전파 알고리즘을 이용하였다. 활성화 함수로서 출력의 범위가 -1.0에서 1.0까지인 bipolar sigmoid 함수를 사용하였고, 입력층에 제시된 데이터는 은닉층의 각 노드의 활성화 함수, 즉 시그모이드 함수에 의해 계산되었다. 역전파 알고리즘은 신경 회로망을 통해 얻어진 출력 값과 목표 출력 값을 비교하여 그 차이를 감소하는 방향으로 연결 강도(weight)를 조절하게 되는데 이러한 학습을 계속하여 원하는 결과를 얻을 때까지 반복한다. 또는 지정된 학습 횟수만큼 학습시켰다. 본 연구에서는 학습을 1,500번 반복하여 결과를 얻었다. 다음 그림 1은 신경 회로망 프로그램의 결과로서 Total Error의 추이를 살펴본 것이다.

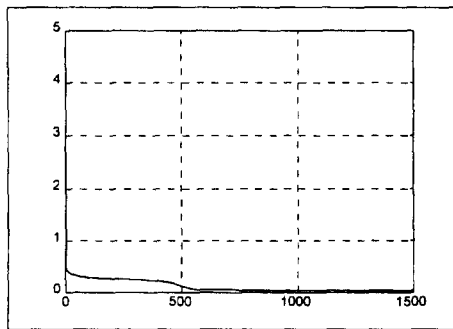


그림 1. Total Error의 변화 추이 곡선
(최종 error : 0.04424)

4. 퍼지 제어기

증기량과 급수 유량의 차(E)와 기준 출력과

증기 발생기의 출력의 차(CE)를 퍼지 제어기의 입력으로 이용하고 급수 유량을 변화시켜 출력인 증기 발생기의 수위를 제어한다[6][7][8]. 두 입력의 경우 입력 구간을 7로 나누었으며 출력의 경우 출력 구간을 11로 선정하였다. 그리고 퍼지 규칙은 7×7 즉, 49개를 사용하였다. 그러나 입력의 경우 구간을 일반적으로 사용하는 등간격이 아닌 임의의 구간으로 나누었다. 샘플링 주기를 1.75초로 하였으며, 입력과 출력 앞에는 Scaling factor인 K1, K2, K3을 적용하였다. Scaling factor K1, K2, K3은 각각의 경우에 알맞게 설계하였다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

신경 회로망을 이용하여 구한 모델이 학습되지 않은 데이터 입력의 경우에도 좋은 결과를 보이는지 검증하기 위해 테스트 데이터를 9가지의 가동률에서 살펴보았다. 이 때 테스트의 펄스 크기를 각 가동률에서 5.74(100% 출력의 0.4% 증가분)로 설정하였다. 그림 2와 그림 3은 그중에서도 출력이 5%일때의 입력과 증기 발생기의 수위의 반응을 살펴보았다. 대부분의 경우 출력을 거의 완벽하게 제어되는 좋은 결과를 나타내고 있다. 그림에서 증기량과 급수 유량의 단위는 kg/sec이며 x축은 샘플링 숫자를 의미하며, 증기 발생기 수위의 경우 단위는 cm이다.

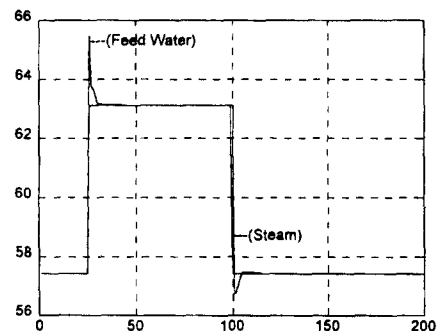


그림 2. Power 5%, 증가분 0.4%일 때의 증기량과 급수 유량

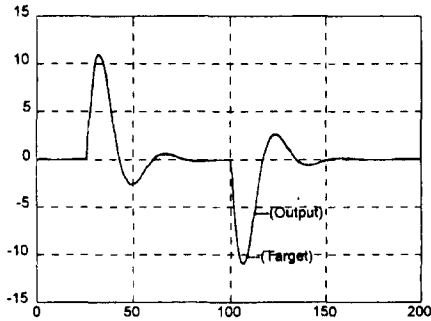


그림 3. Power 5%, 증가분 0.4%일 때의 증기 발생기의 수위

6. 결론

원자력 발전소에서 작업 중지(Trip)의 60%의 경우가 발전을 시작할 때와 낮은 전기 생산량 가동시 물 공급(Feedwater)과 그 부속 장치로부터 일어난다는 사실과 그중 반 이상의 경우가 증기 발생기의 수위 제어와 직접 관계가 된다는 사실은 이미 다른 조사자들에 의해서 밝혀졌다. 따라서 원자력 발전소의 증기 발생기 수위를 안전하게 유지시킬 수 있다면 기대되는 효과는 매우 크리라 예상된다. 증기 발생기 수위 제어기의 성능 향상은 발전소의 정지 횟수를 줄여 발전소 신뢰도 및 가동률을 향상시킬 것이고 또한 기타 여러 부품의 수명에도 영향을 주어 경제적으로도 보다 효율적인 발전소 운영에 기여할 수 있을 것이다.

이러한 수위 제어의 발전을 위해서 본 연구에서는 E. Irving의 모델을 사용하였다. 물론 E. Irving의 모델이 단순화한 관계로 단점을 가지고 있으나 프로그램화가 편리하고 또한 증기 발생기의 특성을 잘 표현하고 있다고 판단하여 이용하게 되었다. 먼저 시스템의 출력, 즉 증기 발생기의 수위를 안정화시키기 위하여 퍼지 제어를 Case by Case로 선정하여 제어를 하였으며, 그 다음으로 시스템의 두 입력, 증기량과 퍼지 제어기에서 선택되어진 급수유량, 그리고 전 단계의 출력, 증기발생기의 수위를 입력으로 하는 신경 회로망 프로그램을 이용하여 시스템

을 규명하였다.

본 보고서에서는 다른 제어기와 비교를 다루지 않고 있으나 다른 논문들을 통하여 얻은 여러 제어기와 비교하였을 때에도 본 연구를 통해 얻어진 제어기의 성능이 유사함을 알 수 있었고, 또 시스템 규명을 위한 프로그램 역시 상당히 좋은 성능을 가짐을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 이은철, "신경 회로망을 이용한 증기 발생기 수위제어에 관한 연구," 서울 대학교 연구 보고서, 1994.
- [2] 나만균, "유량 오차 예측을 통한 증기 발생기의 수위 제어기의 설계에 관한 연구," 조선 대학교 연구 보고서, 1995.
- [3] E. Irving, et al. "Toward efficient full automatic operation of the PWR steam generator with level adaptive control," Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station, 1980.
- [4] 이상정, "계층적 제어 구조를 이용한 원전 제어 계통 적용 기술 개발에 관한 연구," 충남 대학교 연구 보고서, 1994.
- [5] 김일영, 정길도, 노태수, 홍동표 "신경 회로망을 응용한 현가장치의 폐회로 시스템의 규명," 한국 정밀 공학회 Vol. 14, 1997
- [6] 장우석, "전기 유압 서어보 시스템의 퍼지 제어에 관한 연구," 영남 대학교 석사 논문, 1994
- [7] 채석, 오영석, "퍼지 이론과 제어," 청문각, 1995
- [8] 김영철, "Design And Implementation of Fuzzy Rule-Based Controller For DC Servo Systems," 전북 대학교 석사 논문, 1993