

'97 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

칼만 필터와 퍼지로직을 이용한
원자력 발전소 제한제어 알고리즘에 관한 연구

김성현 · 이은철

서울대학교

최중인

경원대학교

요 약

제한 제어 계통은 원자력 발전소의 주요계통의 운전상태를 감지하여 운전변수들의 이상 기동이 예상되면 적절한 제한조치를 자동으로 수행하여 원자로 트립이 일어나는 것을 미연에 방지한다. 한 계통의 고장으로 인한 이상상태가 발생하면 국부제어기는 그 국소성 때문에 그 상황을 제대로 다루지 못할 경우가 생긴다. 따라서 고장의 원인을 정확히 파악하고 그에 대한 적절한 대처를 할 수 있는 높은 수준의 지능적 제한 제어 알고리즘이 필요하게 되며 이를 위하여 본 연구에서는 칼만 필터를 이용하여 원전의 상태변수를 추정하고 퍼지로직을 이용하여 고장을 파악하고 적절한 조치를 수행할 수 있는 제한 제어 알고리즘을 개발하였다. 이를 영광 3/4호기 원전의 이상상태에 대하여 모의 적용함으로써 그 유용성을 보여주었다.

1. 서 론

원자력발전소는 각기 역할이 주어져 있는 수많은 계통들로 구성되어 있고 그러한 개별 계통의 제어를 위해 각 계통들의 목적에 맞는 제어기가 따로 설계되어 있다. 그러나 각 계통들에 설계되어 있는 제어기들은 개별적인 동작들만을 고려해 설계되었기 때문에 발전소 전체의 거시적인 상태와는 무관하게 동작하게 된다. 이 경우 개별 제어기들이 충돌할 가능성은 언제나 존재하므로 전체적인 관점에서 개별 제어기들의 동작을 제한하는 계통이 필요하게 된다. 또 현재 원자력 발전소의 보호계통은 발전소의 운전변수들이 미리 결정된 작동영역 근처에서만 동작하도록 되어있어 그 수치가 어떤 일정한 값을 넘었을 때에는 보호계통에 의해서 원자로가 강제적으로 정지하도록 하거나 운전원에게 경보를 주고, 운전원이 현재 발생하고 있는 증상에 대해서 이전에 훈련받은 대로 의 정해진 제한 조치를 취하도록 하고 있다. 그러나 운전원이 감시해야할 발전소의 운전 변수와 그에 따른 비정상상태는 너무나 많기 때문에 그와 같은 긴장된 순간에서는 운전원이 계측기를 잘못 읽거나 상황판단을 잘못하는 등의 상황은 언제나 일어날 수 있다. 또한 운전원의 제한조치가 너무 보수적일 경우 제어계통의 기능 저하에 의해 운전 효율성이 떨어질 수도 있고 반면 운전원이 취하게 되는 제한조치가 덜 보수적일 경우는 불필요한 보호계통의 작동을 가져올 수도 있다. 따라서 운전원의 부담을 줄이면서도 운전효율성을 떨어뜨리지 않는 새로운 개념의 제어기가 필요하다. 제한 제어의 개념에서는 운전원의 행동을 제한 제어기가 대체하여 원자로의 주요변수들을

감시하므로 발전소 전체의 상태에 대한 상을 갖게 되기 때문에 사고 발생 시 그 사고의 종류를 정확히 판별해내는 것은 물론 개별 제어기들을 제어함으로써 그 고장에 대한 대처까지 적절하게 수행하여 운전효율성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 실시간으로 원자로의 운전변수들을 추정해 원자로의 비정상 상태를 진단하고 그에 대한 조정과 복구를 수행하는 제한 제어기를 설계하였다. 원자로의 운전 변수는 칼만 필터를 통해 추정되고 퍼지로지크에 의해 사고의 종류를 판별하고 그에 따른 조정작업을 수행한다.

2. 고장 진단

고장이란 실제 동력학 시스템에서 그 계를 원하지 않는 이상 상태로 몰고 가는 여러 종류의 오동작을 말한다. 이 오동작은 시스템의 계통에서 발생할 뿐만 아니라 계측계기에서도 발생해 실제 상황과는 무관하게 운전자에게 잘못된 상황판단을 일으키게 할 수 있으므로 고장의 검출과 추정에 있어 계통의 고장 뿐 아니라 기기의 고장까지 판별해 낼 수 있어야 한다. 고장이 발생했을 때 고장은 그 처리과정상 고장검출, 추정, 조정, 복구, 제한운전의 5단계로 나누어 생각할 수 있다. 원자로의 어떤 계통에서 고장이 발생했을 경우 우선 이상상태를 감지하는 것을 고장 검출이라 한다. 하지만 고장이 있다는 것만 알고 정확히 어느 부분에서 일어난 어떤 종류의 고장인지를 모르기 때문에 추정을 거쳐 구체적인 고장의 종류를 판별해 낸다. 고장의 종류를 알기 때문에 그에 따른 대처 즉 조정도 가능해지며 여기서 가능하다면 원자로를 원래의 상태로 되돌리는, 즉 복구단계, 그렇지 않을 경우 원자로의 정지를 막기 위해 원래의 작동점이 아닌 트립 셋포인트와 어느 정도의 여유를 갖는 제한점 아래에서 동작하도록 하게된다.

1) 고장 검출 (fault detection)

시스템 고장의 검출은 크게 해석적 리던던시에 의한 방법과 물리적 리던던시에 의한 두 가지의 방법으로 나뉜다. 전자는 실제 시스템과 같은 입력을 갖는 수학적 모델의 출력과 실제 시스템의 출력을 비교하여 리던던시를 구해 고장을 검출하는 방법을 말한다. 이것은 별도의 계측 장비가 필요하지 않아 비용 면에서 유리하지만 수학적 모델을 사용하기 때문에 여기서 생기는 모델링 에러가 문제가 될 수 있다. 모델링 에러는 고장발생시 고장 신호와 섞여 고장 검출을 어렵게 할 수 있어서 해석적 리던던시 사용을 할 때 충분히 고려를 해주어야 한다. 또한 온라인으로 계산 되어야 하기 때문에 그 계산에 걸리는 시간도 실제플랜트의 신호를 따라올 수 있을 정도로 빨라야 하므로 해석적 리던던시에 의한 방법은 신호의 처리에 있어서 다른 방법들보다 좀 더 진보된 기술이 요구된다. 후자의 물리적 리던던시에 의한 방법은 여분의 계측기를 더 달아 리던던시를 구하는 방법으로 2/3 보팅 로직과 같은 방법이 있다. 본 연구에서는 고장의 검출을 위해서 해석적 리던던시를 구하는 방법을 사용하였는데 실제 플랜트의 상태 변수를 실시간으로 추정하는 칼만 필터와 수학적 모델을 푼 공칭 플랜트의 상태 변수의 차이에서 오차(residual)를 구했다. 실제 플랜트로부터 계측이 용이하고 계측기의 값이 참값에서 크게 벗어나지 않는 계측치와 칼만 필터가 추정해낸 추정치와의 오차를 줄여가면서 측정하지 않은 그와 관련된 실제 플랜트의 다른 상태변수들을 추정해 내게 된다. 이러한 방법으로 비록 실제 플랜트의 값을 실제로 계측하지는 않았지만 실제 계측치와 큰 편차가 없는 값을 얻을 수 있다. 이 추정치와 수학적 모델을 푼 공칭 플랜트의 차이에서 오차를 구하게 된다. 계통상에서 아무런 이상이 없다면 오차는 0이거나 그 부근의 값이 되겠지만 고장 발생 시 오차가 발생하게 된다. 칼만 필터는 실제 계측치를 사용하므로 플랜트와 차수가 동일한 하나의 선형 동적 시스템이 되기 때문에 필터링에 사용한 선형 모델에서의 오차는 따로 고려하지 않아도 된다.

2) 고장 추정 (fault estimation)

플랜트의 어느 부분에서 이상이 생겼다면 이것은 바로 그 상태변수의 오차로 나타난다. 고장이 없다면 오차는 0이거나 최소한 아주 작을 것이지만 고장이 발생하게 되면 오차는 증가하게 된다. 이와 같이 오차는 고장과 밀접한 관련을 맺지만 어떤 시간에서의 오차라는 것은 단지 그 시간에서의 상태만을 나타내기 때문에 실제 고장의 발생과는 무관할 수도 있다. 예를 들어 어느 시점에서 오차가 갑자기 커졌다가 급방 줄어들어 그 상태를 계속 유지해간다면 이것은 순간적인 잡음에 의한 것이고 계통의 고장과는 무관한 것일 수 있기 때문이다. 그러나 오차의 적분 값을 구하게 되면 이 것은 고장에 대해서 좀더 확실한 정보를 주게 된다. 고장이 일어났을 때 오차의 적분 값은 양의 방향으로 커지거나 음의 방향으로 커지거나 아무튼 한쪽 방향으로 계속 증가 할 것이기 때문이다. 다만 오차의 적분 값을 구할 때 생길 수 있는 미소한 잡음들에 의해 생긴 오차가 시간이 감에 따라 축적되어 발생시킬 수 있는 이상신호를 막기 위해 불감대를 적용하였다. 한편 고장의 추정에 있어서는 퍼지로그직을 사용하였다. 퍼지로그직은 실제 인간이 생각하는 방식으로 제어를 행하기 때문에 구현하기가 쉽다. 또한 인간보다 많은 정보를 체계적이고 합리적인 방법으로 종합해서 처리하기 때문에 인간이 저지를 수 있는 실수를 줄일 수 있다. 다음은 퍼지로그직과 적분된 상태변수의 오차 값으로 고장을 추정하는 한 예이다.

3) 고장조정 (fault accommodation)

발생한 고장의 종류를 알게 된다면 그에 대한 대처도 가능하게 된다. 그러나 실제적으로 고장은 운전시 언제, 어떤 계통에서든 발생할 수가 있기 때문에 수많은 고장의 종류에 대해 일일이 제어를 따로 설계하는 것은 매우 힘든 일이 될 수밖에 없다. 본 연구에서는 고장의 조정을 위하여 각각의 고장 사건마다 대처 시나리오를 마련하고 그 시나리오 안에서 퍼지로그직으로 구체적인 조정작업을 행하도록 하였다. 퍼지로그직은 간단한 구조로 복잡한 시스템에 대해서도 매우 효과적인 제어를 할 수가 있으며 각각 사건에 대한 제어방법의 복잡성을 최소로 줄일 수 있다.

4) 회복 (fault recovery)과 제한운전(limited operation)

고장을 조정하기 위해 제한 제어기는 국부적인 계통의 제어기의 동작점을 조절함으로써 다른 작동점을 택할 수 있다. 고장이 완전히 조정된 후에 플랜트는 원래의 작동점으로 돌아갈 여유를 가질 수도 있다. 이때 제한 제어기는 가능한 한 원래의 작동점으로 돌아가도록 조정하게 되는데 이 단계를 고장 회복단계라고 한다. 그러나 모든 고장이 회복 가능한 것은 아니며 회복 가능한 고장은 실제로 그 수가 매우 적으며 물리적인 손상에 의한 고장은 당연히 완전한 복구가 불가능하다. 이럴 경우 플랜트의 작동점을 제한해 플랜트가 정지하거나 더 큰 비정상 상태로 천이하지 않도록 막는다. 이 경우 작동점이 제한되므로 제한 운전이라 한다.

3. 모의 계산

본 연구에서는 영광3/4호기를 기본 발전소 모델로 정하고 그 계통모의용 설계코드(LTC)를 사용하여 고장을 모의하였다. 이 코드는 격납용기, 노심, 증기발생기, 가압기, 냉각펌프 등의 주기계통의 모델을 포함하고 있으며 주급수 및 보조급수, 화학 체적 제어계통, 안전주입, 등의 보조 계통의 모델도 포함하고 있다. 모의코드는 LOCA가 아닌 거의 모든 사고에 대한 모사가 가능하다. 실제 플랜트와 공칭 모델에 모두 이 모델을 사용하였는데 이 경우 두 플랜트의 차수가 일치하므로 모델링에 의한 에러는 발생하지 않는다. 또한 운전변수 추정을 위한 칼만 필터 내에서는 노심, 증기발생기, 가압기의 지배방정식을 선형화하여 필터를 설계하였으며 실제 플랜트역할을 하는 모의 코드로부터 측정치를 받게 된다. 그림 3.1은 제한 제어기의 전체적인 신호 흐름도를 보여준다.

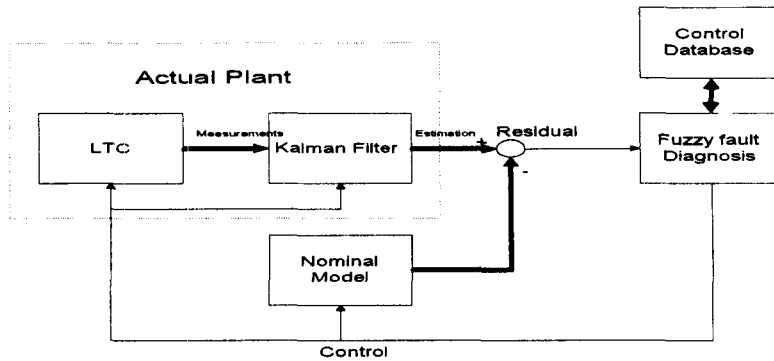


그림 3.1 제한 제어기에서의 신호 흐름도

4. 결과

1) RRS (Reactor Regulating System) 오동작

첫 번째 경우에는 50% 출력 운전중 1%/min의 출력 증가 요구를 계속해서 주었다. 이 경우 이차 계통에서 증기유량이 크게 증가하게 되므로 원자로의 출력과 증기발생기의 요구부하 사이에 출력편차가 발생하게 되고 제어봉이 인출되면서 출력편차를 줄이게 된다. 원자로의 제어계통은 출력 15~100%범위에서 5%/분의 연속부하증가와 10%의 계단 부하 증가가 가능하도록 설계되어 있다. 이 설계치를 초과하여 부하가 증가되면 보호계통의 작동에 의해 원자로가 정지될 수 있지만 1%/분의 출력 증가 요구는 위의 조건을 만족하므로 그림 4.1 에서 보듯이 큰 무리 없이 동작하게 된다. 또한 칼만 필터링한 동작변수들도 실제 플랜트의 값을 비교적 잘 추정함을 볼 수 있다. 그림 4.2는 RRS 오동작을 준 경우이다. 이 경우에 제어봉이 인출되지 않으므로 노심 출력이 출력증가요구에 따라가지 못하게 된다. 이 경우 시간이 갈수록 노심 출력과 증기발생기의 출력 사이의 편차가 커지고 증기발생기의 압력이 계속해서 낮아지다가 트립 셋포인트에 걸려 약 650초경에는 원자로가 정지된다. 이 경우에도 추정치 들은 실제플랜트의 값과 별 차이가 없이 잘 추정됨을 볼 수 있다. 그림4.3은 RRS 오동작이 주어졌을 경우 제한 제어기의 작동을 보여주고 있다. 굵은 선은 공칭 플랜트의 값이며 점선은 실제플랜트의 값을 추정한 추정치이다. 약 100초 이후부터 오차 이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 오차로부터 퍼지로그에 의해 고장을 발견해냈다. 이 고장을 검출하기 위한 소속함수는 그림4.4에 나타나 있다. 고장이라는 확신이 선 300초 이후부터는 고장 조정 작업에 들어가게 된다. 조정 단계에서는 원자로를 정지시키는데 가장 큰 영향력을 발휘하고 있는 증기발생기의 압력 값으로 조정을 하는데 증기발생기 압력 오차 적분 값과 그 미분 값으로 제어봉의 인출을 직접 조정하게 된다. 조정을 위한 소속함수와 조정 알고리즘은 그림 4.5와 4.6에 있다. 이 경우는 제어봉이 물리적 손상이 아닌 경우의 고장에 관한 경우이므로 그림 4.3에서 보듯이 조정 후 복구가 어느 정도 잘 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 그림4.7은 물리적 손상에 관한 제한 제어의 경우를 보여준다. 이 경우 조정모드 시작 후에도 제어봉이 전혀 움직이지 않게 되므로 오차가 계속해서 커지게 되고 제한 제어기는 제한동작 모드로 들어가 출력증가 요구를 제한하여 플랜트가 정지되는 것을 막고 있다. 그림4.8은 계측기기 고장의 경우를 보여준다. 실제 플랜트의 계측기 계측치와 그것을 추정한 값이 어느 한 부분에서만 편차가 발생할 때 이것은 실제 플랜트의 계측기 고장으로 판단할 수 있다. 실제 계통의 고장시 몇몇 경우를 빼고는 한 부분에서만 이상값이 발생할 수 없기 때문이다. 이 경우 운전원에게 이 사실을 알려줌으로써 불필요하게 작동될지도 모르는 보호계통의 동작을 막을 수 있다.

2) 급수펌프고장

역시 영광3/4호기를 모델로 하고 있으며 100%출력 정상 운전중 2개의 급수펌프중 1개의 급수펌프고장에 의한 정상급수 감소의 경우이다. 우선 100%출력 정상운전일 경우를 보자. 그림 4.9는 20초 후에 1개의 급수펌프가 고장을 내고 정지해버린 경우이다. 이 경우 증기발생기의 수위는 고장 발생 직후부터 뚜렷하게 감소하기 시작하고 냉각수 평균온도(T_{avg})도 증가하기 시작한다. 또한 가압기의 압력도 증가하기 시작하는데 곧 증기발생기 로우 레벨의 정지 신호에 걸려 원자로가 정지되고 만다. 이 고장의 판단은 증기발생기 레벨의 신호와 가압기의 압력 신호로 판별을 하였다. T_{avg} 도 사고후 증가하는 경향을 보이기는 하지만 그 정도가 약해 뚜렷이 고장으로 진단할 만큼은 되지 못해 사용하지 않았다. 가압기 압력도 증가하고 있기는 하지만 이것만으로는 고장이라고 진단하기는 어렵다. 하지만 다른 작동변수들보다 변화 폭이 가장 뚜렷하기 때문에 증기발생기 레벨과 결합해서 급수펌프 고장 진단에 이용하였다. 그림 4.10은 고장 진단에 사용된 퍼지로그직과 소속함수를 보여주고 있다. 그림 4.11은 고장 발생시 제한 제어기의 작동을 보여주고 있다. 이 경우에는 노심의 출력을 일정한 정도까지 내려주는 것 이외에는 다른 방법이 없기 때문에 퍼지로그직에 의한 조절을 하지 않고 미리 선택된 몇 개의 제어봉을 떨어뜨리는 방법으로 출력을 급격히 줄여 주었다. 또 당연히 물리적인 손상이기 때문에 복구도 불가능하므로 제한동작 만이 가능하게 된다. 증기발생기 수위는 추정을 해서 얻은 값이 아니라 실제 플랜트에서 측정을 한 값이기 때문에 오차가 없다.

3) Relieve 밸브 열림

100%출력 운전중 운전원의 실수 혹은 고장에 의해 1개의 가압기 relieve 밸브가 개방되는 경우이다. 이 경우 가압기의 압력이 감소하며 가압기 수위가 내려가게 되는데 그냥 방치해 두면 압력이 보호시스템의 작동을 유발시켜 원자로 정지가 일어나게 된다(그림 4.12). 이 경우 물리적 손상의 경우는 복구의 가능성이 없고 운전원의 실수에 의한 개방의 경우만 복구가 가능하다. 제한제어기는 가압기의 수위와 압력으로 고장을 판별하게 되며 고장진단을 위한 퍼지로그직과 소속함수는 그림 4.13에 있다. 불안정을 진단하기 위해 오차의 미분값의 변화량을 사용하였다. 밸브를 닫음으로써 복구가 완료되며(그림 4.14) 이것이 실패했을 경우 보호시스템을 동작시키게 된다.

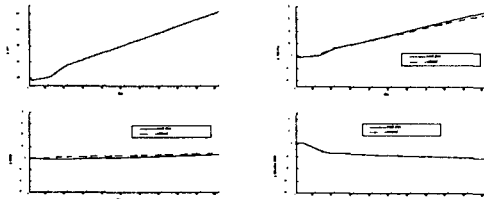


그림 4.1 정상동작

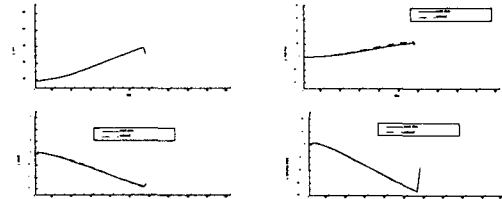


그림 4.2 제한제어가 없을 때(RRS 오동작)

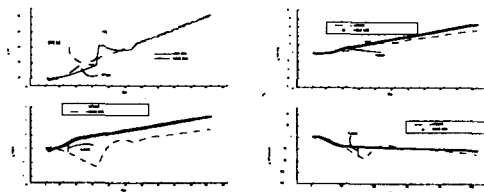


그림 4.3 제한 제어(복구가 가능 고장)

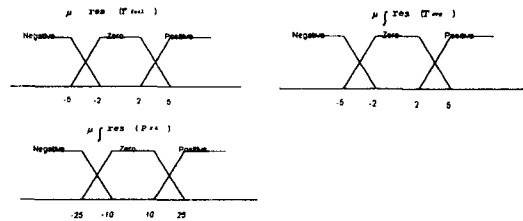


그림 4.4 사고진단을 위한 소속함수들

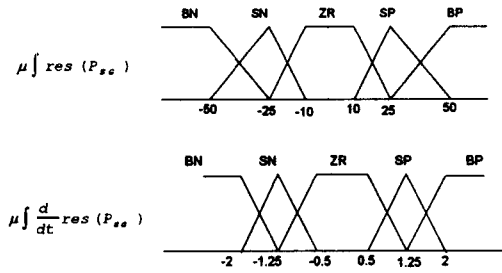


그림 4.5 사고조정을 위한 소속함수들

d/dt(res(P _{res}))	res(P _{res})					
	BN	SN	ZR	SP	BP	
BN	BN	SN	ZR	SP	BP	
SN	BN	SN	ZR	ZR	BP	
ZR	BN	SN	ZR	SP	BP	
SP	BN	ZR	ZR	SP	BP	
BP	BN	ZR	ZR	SP	BP	

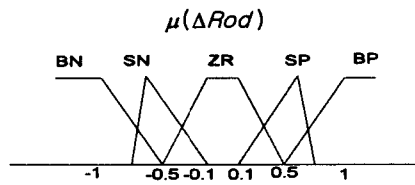


그림 4.6 사고조정 알고리즘

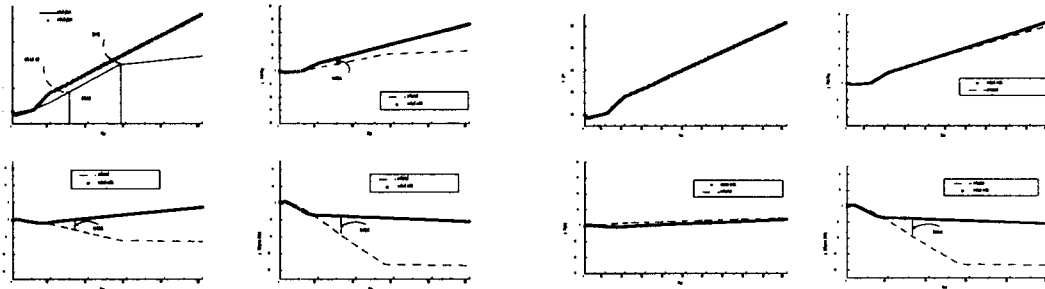


그림 4.7 제한 제어(물리적손상,제한모드작동)

그림 4.8 계측기기 고장

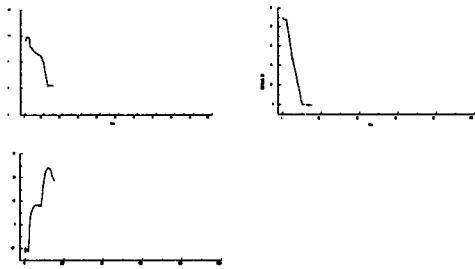


그림 4.9 1개의 급수펌프고장

if L_{in} is being Low and $\int res(P_{prz})$ is Positive then feedwater pump is failed .

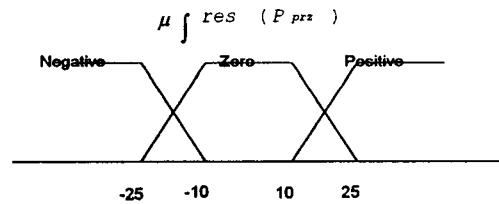


그림 4.10 고장진단

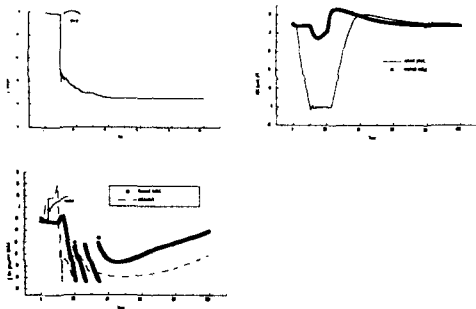


그림 4.11 제한동작 모드

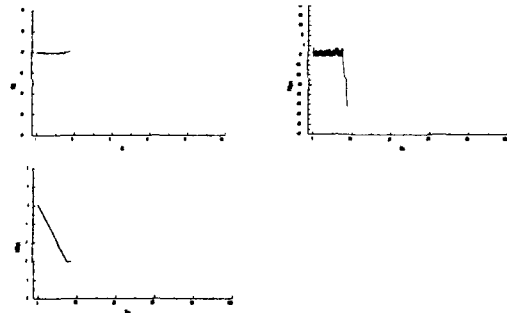


그림 4.12 Relieve 밸브 열림

If Level PRZ is being low, $RES(P_{PRZ})$ is Unstable, then Relieve valve is opened.

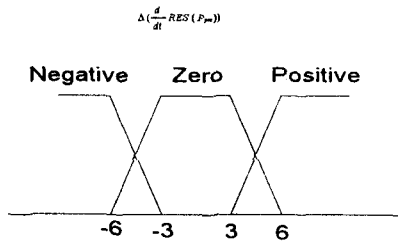


그림 4.13 소속함수

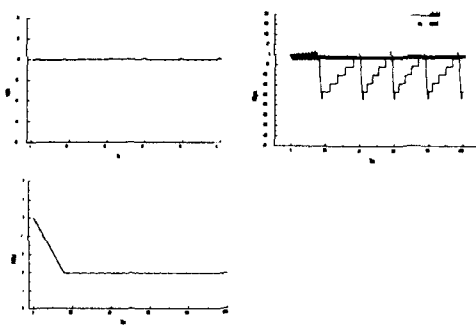


그림 4.14 복구

5. 결론

원자력발전소의 전체적인 상태를 감시하면서 고장 발생시 불필요한 운전정지를 막음으로써 운전효율성의 향상을 가져올 수 있는 제한 제어를 설계하였다. 우선 원자로의 상태를 감시할 수 있는 칼만 필터를 설계하여 추가적인 계측장비의 설치가 없이도 측정 가능한 몇 개의 플랜트 상태변수 만으로도 다른 상태변수를 실시간으로 추정해 내었다. 이것은 실제 상태변수들에 대한 측정이 어려운 부분이 많은 원자력 분야에서도 앞으로 많은 활용이 있으리라고 생각되어진다. 이상 상태 발생 시 고장의 판단과 그에 대한 조정은 퍼지로직을 사용하였다. 퍼지로직은 인간이 판단하는 방식 그대로 판단하므로 이상상태시 운전원들이 취하는 조치들을 이식해 사용하기에 매우 유리하였다. 실제 경우에 대한 적용으로 RRS 오동작과 정상급수감소의 경우와 relieve 밸브 고장 개방의 경우를 모사해 보았다. 세 경우 모두 고장에도 불구하고 원자로의 정지 없이 운전이 가능함을 볼 수 있었다. 앞으로는 더욱 많은 경우에 대한 모의가 좀 더 필요하다고 생각되며 이 작업이 노심 쪽에도 적용해 출력분포나 제논거동 등에 관한 추정을 통한 제어 등에 활용한다면 만족할만한 성능을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구를 좀 더 진척시켜 학습의 기능을 갖춰 좀 더 높은 수준의 지능적 동작을 할 수 있도록 하는 연구도 요구된다.

참고문헌

- [1]. Adel Ben-Abdenour and Kwang Y.LEE, " Supervisory Control with Fault Detection and Accommodation for Power Plants: A Mixed fuzzy logic and LQG/LTR approach ", proceedings NPIC & HMIT '96, Pennsylvania State University, USA, vol 1, pp 335-342, (1996).

- [2]. J. Louis Tylee, " On-Line Failure Detection in Nuclear Power Plant Instrumentation ", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. ac-28, no.3 ,pp 406-415 , March 1983
- [3]. S. H. Chang, K. S. Kang, S. S. Choi and H. G . Kim, " Development OF The On-Line Operator AID System OASYS Using a Rule-Based Expert System And Fuzzy Logic For Nuclear Power Plants ", Nuclear Technology ,vol 112 ,pp 266-294(1995).
- [4]. J. Louis Tylee ," A Generalized Likelihood Ratio Approach To Detecting And Identifying failures In Pressurizer Instrumentation",Nuclear Technology ,vol.56, pp.484-492,March 1982.
- [5]. Chaung Lin and Yih-Jiunn Lin ," Control of Spatial Xenon Oscillations in Pressurized Water Reactors Via the Kalman filter",Nuclear Science and Engineering,118, 260-267 (1994)
- [6]. Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews, " Kalman filtering : Theory and Practice" ,Prentice Hall
- [7]. Chao-Chee Ku, Kwang Y.LEE, and R.M. Edwards, " Improved Nuclear Reactor Temperature Control Using Diagonal Recurrent Neural Networks", IEEE Tranc. Nuclear Science ,vol 39 ,no. 6, DEC 1992
- [8]. Cheng Chung Kuan, Chaung Lin and Chang Chia Hsu , "Fuzzy Logic Control of Steam Generator Water Level in Pressurized Water Reactors ",Nuclear Technology , vol.100, Oct.1992
- [9]. Byung Soo Moon, Jae Chang Park, "Fuzzy Algorithms to Generate Level Controllers for Nuclear Power Plant Steam Generators", Journal of the Korean Nuclear Society, vol.25 , No.2, June 1993
- [10] " Abnormal Operations Guideline", CE International, Inc.
- [11]. 이광형,오길록,“퍼지 이론 및 응용 II권:응용”,홍릉 과학 출판사
- [12]. 남문현,이상효,남부희, “ 제어 시스템 공학”,자유 아카데미