

'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회
운전 자동화를 위한
예상임계점 계산 전산화

김 정수, 박 재창, 정 철환, 함 창식

한국원자력연구소

요 약

원자로를 임계에 도달시키기 위해서는 먼저 운전원이 예상임계 제어봉위치를 설정한 후, 예상 임계점을 계산하여, 원자로 냉각재 봉산농도를 조절하고 제어봉을 인출하여 원자로를 임계에 도달하도록 한다. 현재 원자력발전소에서는 이러한 기동과정에서의 예상임계점 계산은 수작업으로 하고있다. 본 논문은 고온대기에서 2% 출력까지 자동기동 시스템을 개발하기 위해 예상임계점 계산 전산화가 필요하므로 자동으로 예상임계점을 계산하는 프로그램을 개발하였다.

1. 서 론

일반적인 가압경수로형 원자력발전소의 경우 정상운전시 기동 운전모드는 충수 및 배기가 완료된 상태에서 저온정지까지의 운전모드, 저온정지에서 고온정지까지의 운전모드, 고온정지에서 고온대기까지의 운전모드, 2차계통 가열 및 기동모드, 고온대기에서 2%까지의 운전모드등으로 분류할 수 있다. 이들 기동 운전모드들은 현재 발전소의 경우 많은 부분이 자동화가 이루어져 있지 않아 운전원이 수동으로 운전하고 있다. 그러므로 운전원의 운전부담이 상당히 많은편이다. 외국발전소의 경우 특히 일본의 경우에는 기동구간에 대해 자동기동 및 정지시스템을 개발하여 Ohi 3&4 호기 발전소에 설치, 운전원의 업무분담을 크게 줄였다고 발표하였다.[1-2]

한편 원자력발전소의 경우 원자로를 임계에 도달시키기 위해서는 먼저 운전원이 임계도달시간과 지는 생성을 고려하여 예상임계 제어봉위치를 정한후, 예상임계점(estimated critical position)을 계산하여, 원자로 냉각재 봉산농도를 조절하고, 제어봉을 인출하여 원자로를 임계에 도달하도록 한다.[5-6] 그러나 현재 발전소에서 예상임계점을 계산하기 위해서 운전원은 발전소 타입에 맞는 곡선집[4]으로부터 예상임계점 계산에 필요한 표("MOL. Temperature defect versus average moderator temperature" 등)를 이용하여 곡선의 눈금을 읽어서 계산하므로 원자로가 임계에 도달하였을때 제어봉위치와 운전원이 계산한 예상임계 제어봉위치 사이에 상당한 차이가 발생하고 있다. 또한 봉산값에 대한 투입 및 회석여부를 운전원이 잘못 계산한 경우, 발전소의 봉산농도가 정상으로 회복될때까지 발전소는 기동을 중지하고 기다려야만 한다. 이러한 오류를 줄이기위해 고온대기에서 2%까지의 자동화를 위해 임계점 계산의 전산화가 필요하다.

본 논문은 고온대기에서 2%까지 운전모드중 자동화를 위한 제어시스템 개발[3]에서 자동화에 필요한 예상임계점 계산을 전산화하였다. 이 예상임계점 계산 전산화를 위해서 고온대기에서 2%출력까지의 종합 운전절차를 분석하여, 자동화 기준을 선정하고, 예상임계점 계산을 자동으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 운전절차서 분석

고온대기에서 2% 출력까지의 운전절차를 요약하면 다음과 같다.

- 원자로 초기조건을 확인 및 기록한다.
- 정확한 예상임계점을 계산한다.
- 예상 임계 제어봉위치 및 정지여유도를 확인한다.
- 두대의 선원영역 검출기가 선택되었는지를 확인한다.
- 봉산주입/회석을 판단한다.
- 시료분석에 의한 농도를 확인한다.
- 임계도달까지 15분 간격으로 기록한다.
- "Hi flux at shutdown"경보를 차단한다.
- 선원영역 검출기의 계수율을 기록한다.
- 예상임계점 계산에서 선택한 제어봉위치를 운전원이 확인한다.
- 제어봉 제어스위치를 "수동"위치로 선택하고 제어봉을 인출한다.
- 제어봉이 삽입한계이하에서 임계에 도달하면 제어봉을 노내에 완전히 삽입하고 원자로 기동을 중지하고 임계점 계산부터 재 실시한다.
- "P-6"를 확인한다.
- 임계를 확인하고 출력을 안정시킨다.
- 예상임계점 확인 및 임계정보를 기록하고 원자로 출력을 2%까지 출력한다.

이러한 운전절차를 분석한 결과 자동화 가능한 사항과 운전원의 개입이 필요한 사항등으로 구분할 수 있다. 왜냐하면 운전원의 개입이 필요한 사항인 경우는 "P-6 확인", "봉산주입/회석판단" 등으로 발전소의 보호계통과 관련된 중요한 사항이거나 운전원의 판단이 필요로 하는 사항으로 운전원에게 메시지를 주어 운전원이 상황을 보고 처리해야 하므로 자동화 사항과 구분된다. 본문에서는 고온대기에서 2%까지의 자동화를 다음과 같은 기준으로 선택하였다.

- 원자로 냉각재 온도 및 압력 제어를 이용하여 고온대기까지 상승된 온도 및 압력을 계속 유지.
- 예상임계점 계산중에서 반응도 결손값을 계산하기위해 6종류의 표를 전산화하여, 정확한 예상임계점 계산.
- 예상임계점에서 미리 계산된 봉산값을 이용하여, 봉산농도를 적절히 맞춤.
- 제어봉을 예상임계표에서 제시한 값만큼 인출.
- "P-6"는 운전원이 수동으로 block.
- NR-45 기록계를 이용하여 임계여부를 판단.

3. 예상임계점 계산 전산화

정확한 예상임계점을 계산하기 위해서 “Integral rod worth versus steps withdraw” 등과 같은 여러개의 표가 필요하다. 그림 1은 발전소에서 기동시 실제 사용되는 예상임계점 계산양식을 나타내고있다. 예상임계점을 계산하는데 필요한 표의 기준은 MOL(Middle of Life)로 하였다. 이렇게 정한 이유는 발전소에서 BOL(Begin of Life), MOL, EOL(End of Life)에 대해 적용하고자 하는 각 표들이 각각 다르기 때문에 3개중의 중간값에 해당하는 MOL을 기준으로 설정하였다. 차후 발전소 현장에 적용시 BOL 및 EOL을 포함하여 개발할 예정이다.

예상임계점을 계산하기 위해서는 예상임계점 계산 양식에서 먼저 원자로의 정지시점을 기록한 후 정지전 상태항(예를들면 100 % 혹은 50%)의 정보를 입력하고, 원하는 제어봉위치의 예상임계점 변수값들을 입력한다. 각 변수에 대한 반응도 결손을 계산하여 원자로 냉각재 봉산농도를 조절한다. 이 예상임계점 계산에서 냉각재 온도에 대한 변수값은 “MOL. ARO(all rod out) Temperature defect versus average moderator temperature” 표를 이용하여 계산한다. 온도에 대한 반응도 결손표는 선형화시켜서 MOL(600 ppm)을 기준으로 프로그램하였다. 즉, 운전원이 온도값을 넣어주면 온도값을 읽어들이 계산된 반응도 결손값을 임계표에 표시하도록 프로그램하였다. 예상임계점 계산에서 봉산농도에 대한 변수값은 “Boron concentration versus differential boron worth” 표를 이용하여 계산한다. 이 표는 냉각재 온도에 대해 boron worth가 각각 변화되며 BOL과 EOL에 대해서만 표시하고 있으므로 BOL과 EOL의 중간값을 취하고 온도를 18 단계(309 °C-291 °C)로 구분하여 프로그램하였다. 예상임계점 계산에서 출력결손에 대한 변수값은 “power defect versus power at BOL and EOL” 표를 이용하여 계산한다. 이 표는 선형화 되어있고 600 ppm을 기준으로 프로그램하였다. 예상임계점 계산에서 제어봉위치에 대한 변수값은 “Differential and integral rod worth versus steps withdraw banks D, C, B, moving with 113 steps overlap, EOL, equilibrium xenon” 표를 이용하여 계산한다. 이 표는 전 구간이 선형적이지 못하므로, 구간을 5개 부분으로 구분(C-50 까지, C-50 - 100, C-100 - D-100, D-100 - D-170, D-170 - D-228)하여 각 부분을 선형화하여 프로그램화하였다. 예상임계점 계산에서 지논에 대한 변수값은 세가지 표를 이용하여 계산한다. 첫번째로 “등가지는 출력계산”표를 이용하여 경과시간에 대한 평균출력을 작성한다. 두번째로 지논의 정지전상태의 등가출력에 대한 반응도값은 반응도 “Integral worth of xenon following plant startup at BOL at various power levels versus time”표를 이용하여 계산하는데 앞의 “등가출력” 표에서 계산된 등가출력값을 이용하여 반응도결손값을 계산한다. 이 표는 30시간 이전과 이후로 분리하여 프로그램했다. 그리고 지논의 경우 시간이 경과함에 반응도가 증가함으로 예상임계상태의 반응도결손값은 반응도 “Reactivity inseration due to xenon at BOL versus time following plant trip after steady state operation at various power levels”표를 이용하여 계산한다. 이 표에서는 등가출력에서 나온값으로부터 약 8시간 까지는 2차적으로 증가하다가 8시간 이후에는 감소하는 형태이다. 이 표는 예상임계 계산시점부터 임계로 가는 시점(예를들면 봉산투입후 약 30 분후에 임계임)을 고려하여 지논값에 따른 반응도를 보상하는데 이용된다. 계산방법은 “등가출력표”에서 나온 출력값을 이용하여 표 “Integral worth of xenon following plant startup at BOL at various power levels versus time” 에다 표 “Reactivity inseration due to xenon at BOL versus time following plant trip after steady state operation at various power levels”를 고려하여 계산했다. 예상임계점 계산의 사마리움은 최종임계상태의 등가출력과 이때의 반응도결손값을 계산해야 하는데 실제 발전소에서도 임계점 계산시 계산에 고려하지 않으므로 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다.

이러한 6가지의 계산과정을 거쳐 예상임계점 계산이 완성되면 임계를 위한, 봉산농도의 투입/회석값과 제어봉 위치등을 운전원에게 알려준다.

4. 구성 및 실험방법

본 논문에서 개발한 예상임계점 계산 프로그램은 Foxboro I/A 에서 개발하였다. 이 워크스테이션은 SUN solaris 2.x의 OS를 사용하고 있으며, "c compiler"는 cc를 사용하고 있다. 개발한 예상임계점 계산은 "C" 언어로 개발하였으며, 운전원이 필요한 경우 쉽게 고칠수 있도록 하였다. 그림 2는 실제 운전원에게 알려줄 수 있는 예상임계점 계산값을 보여주고 있다. 운전원이 초기에 필요로 하는 초기값은 운전원이 직접 넣어주도록 하였다. 그림 3은 고온대기에서 2% 출력까지의 전체흐름도로써 이중 본 논문에서 개발한 결과는 예상임계점 계산 자동화이다. 표 1은 같은 조건하에서(온도, 봉산농도,출력결손,지논,제어봉위치) 운전원이 직접 계산한경우와 자동화된 프로그램에서 계산한 경우를 나타내는 비교표이다. 이 표를 보면 같은 조건하에서 운전원이 계산된경우와 자동화의 차이가 약 10 ppm 정도 차이가 남을 보여주고 있다. 이렇게 예상임계점 계산이 차이가 나는 경우 기동시 예상임계점에서 설정한 제어봉위치가 틀리게 되므로 제어봉위치를 변경해야한다. 또한 운전원이 수동으로 계산하는 경우에는 자동화된 프로그램보다 훨씬많은 시간이 소요된다.

5. 결론 및 향후 방향

본 논문은 고온대기에서 2%출력까지의 자동기동 시스템개발중 예상임계점 계산을 전산화하였다. 기존발전소의 경우 임계점을 계산하기 위해서는 일일이 운전원이 곡선집을 읽고 계산해야 하며 이러한 표들을 이용시 운전원이 잘못 계산하여 원자료가 임계에 도달하였을때 제어봉위치와 운전원이 계산한 예상 임계 제어봉위치 사이에 차이가 발생된다. 또한 봉산값에 대한 투입 및 회석여부를 운전원이 잘못 판단한 경우, 발전소의 봉산농도가 정상으로 회복될때까지 발전소는 기동을 중지하고 기다려야만 한다. 이러한 오류를 줄이기위해 고온대기에서 2% 까지의 자동화중 일부인 임계점 계산의 전산화가 필요하다. 그러므로 본 논문에서 제시한 예상임계점 계산 전산화는 운전원의 판단을 정확히 할 수 있도록 도와주며, 운전원의 계산부담을 상당히 감소시킬 수 있으며, 임계점 계산시간이 상당히 줄어들것으로 예상된다. 다만 MOL을 기준으로하여 계산하였기 때문에 이를 현장에 설치할경우 BOL, EOL도 포함하여 계산되어야 할 것이다. 향후 예상임계점 자동화를 기반으로 고온대기에서 2%출력까지의 자동화를 위한 prototype을 개발할 예정이다.

참 고 문 헌

- 1.Y. Inazumi & M. Takashima, "Automatic control system for plant heatup and cooldown operations in japanese PWR plants", International Symposium on NPP I&C, Tokyo, 1992.
2. T. WATANABE et al., "Integrated digital control & instrumentation system for japanese BWR", presented at Instrument and Control Workshop, New Orleans, Louisiana, March 5-7, 1990.
3. 함창식 외 "첨단 계측제어기술 개발중 계측제어기반기술개발", KAERI/RR-1503/94, 한국 원자력연구소, 1995.
4. 원자력 5호기 제 1주기 곡선집.
5. 종합운전절차서, 한국전력공사, 원자력연수원, 1991.
6. 고리 3 & 4호기 일반 운전 절차서, 1984.

* 예상임계제어봉/봉산농도 원자로정지시점 년 월 정지시간 시 분
 (예상임계상태 계산 시점에서 1시간 이상 지연되어 기동하거나 지논의 변화가 있을 경우에는 재계산)
 상태 정지전 상태 임계 상태 실제임계상태

변수	최중임계상태 반응도 결손	예상임계상태 반응도 결손	실제임계상태
1. 월 일 시간			
2. 냉각제 평균 온도	° C	° C	*A ° C
3. 봉산농도	ppm	ppm	pcm
4. 출력(결손)	% (-) pcm	0 % 0 pcm	10*(-8) amps
5. 제어군위치	스텝 (-) pcm	스텝 (-) pcm	스텝
6. 지논	%동기출력 (-) pcm	(-) pcm	pcm
7. 사마리움	%동기출력 (-) pcm	(-) pcm	pcm
8. 반응도결손 합	(-) pcm	(-) pcm	pcm
9. 예상임계온도와 기준온도와의 차에 의한 반응도계산 (*A) $-291.7^{\circ}C = ()^{\circ}C * () \text{ pcm}/^{\circ}C = () \text{ pcm}$			
10. 반응도 변화량 = 정지전 반응도 결손합 - 기동시 반응도 결손합 $= - \text{pcm} (-) - \text{pcm} = \text{pcm}(+)$ 주의 : 정지후의 반응도차가 - 500 pcm 이상이면 노심관리원의 지시에 따라야 하며, 원자로 기동을 역계수율비에 준하여 시행한다. * B 상기반응도 변화량에 따라 봉산농도를 재설정한다.			
11. 반응도변화량 미분봉산농도 봉산농도변화 $\text{pcm} / (-) \text{ pcm} / \text{ppm} = \text{ppm}$			
12. 새로운 임계봉산농도 = 실제봉산농도 + 봉산농도변화 = ppm			
13. 최고와 최저 임계제어봉 위치 최고 위치 (-) pcm (-) 500 pcm (-) pcm (-) pcm 최저 위치 (-) pcm (-) pcm (-) pcm (-) pcm (최고 D군 228 스텝) / (최저 C군 92 스텝) 계산자 원자로 조종사 원자로 조종 감독자			

그림 1. 예상임계점 계산양식

	before shutdown status	after shutdown status	practical status
10 M 2 D 19 T 14 M			
Tavg	309 deg C - 439 pcm	292 deg C *A - 0 pcm	deg
boron con.	480 ppm (-) 4857 pcm	480 ppm 5712 pcm	ppm
power defect	100 % (-) 1550 pcm	0 % 0 pcm	10 * (-8) am
rod position	D- 203 step (-) 88 pcm	D- 150 step (-) 278 pcm	ste
xenon	100 % equal power (-) 2900 pcm	100 (-) 3483 pcm	
samarium	- % equal power (-) - pcm	- (-) - pcm	
reactivity sum	- (-) 9834 pcm	- (-) 9473 pcm	
* reactivity = power defect sum before trip - reactivity sum at startup $9834 \text{ pcm}(-) - 9473 \text{ pcm} = 361 \text{ pcm}(+ \text{ or } -)$ * caution : if criticality is to occur at conditions such that the difference causes an increase of + 500 pcm core reactivity from critical cond the last shutdown, the approach to criticality must be guide by an inverse count ratio plot boron insertion con. : 30 ppm rod position is D- 150 RCS Cb boron con. is 510 ppm			

그림 2 전산화에 의해 계산된 예상임계점 계산값

표 1. 수작업에 의한 예상임계점계산 과 전산화에 의한 예상임계점계산비교

상 태	정 지 전 상 태	임 계 상 태	상 계 임 계 상 태
변 수	외종임계상태	예상임계상태	반응도결손
1. 열 일 시 간	309 °C	292 °C	*A
2. 냉각제 평균 온도	-420 pcm	480 pcm	5920 pcm
3. 동소농도	-4900 pcm	0 %	10*(-8) amps
4. 불해(결손)	100 %	d-203스텝 (-)100 pcm	스텝
5. 제어군위치	d-203스텝 (-)2300 pcm	d-150 스텝 (-)2500 pcm	
6. 지 논	%동기출력 (-)2300 pcm	(-)	
7. 사마리온	%동기출력 (-) pcm	(-)	
8. 반응도결손	(-)-93720 pcm	(-)-93720 pcm	
합			

* reactivity = power defect sum before trip - reactivity sum startup
 -9720 pcm + 9270 pcm = -450 pcm
 boron insertion con. = 40 ppm
 rod position is D-150
 Rod Cb boron con. 520 ppm

상 태	정 지 전 상 태	임 계 상 태	상 계 임 계 상 태
변 수	외종임계상태	예상임계상태	반응도결손
1. 열 일 시 간	309 °C	292 °C	*A
2. 냉각제 평균 온도	-439 pcm	480 pcm	-5712 pcm
3. 동소농도	-4857 pcm	0 %	10*(-8) amps
4. 불해(결손)	100 %	d-203스텝 (-)100 pcm	스텝
5. 제어군위치	d-203스텝 (-)2300 pcm	d-150 스텝 (-)2278 pcm	
6. 지 논	%동기출력 (-)2300 pcm	(-)-23483 pcm	
7. 사마리온	%동기출력 (-) pcm	(-)	
8. 반응도결손	(-)-9334 pcm	(-)-93473 pcm	
합			

* reactivity = power defect sum before trip - reactivity sum startup
 -9634 pcm + 9473 pcm = -361 pcm
 boron insertion con. = 30 ppm
 rod position is D-150
 Rod Cb boron con. 510 ppm

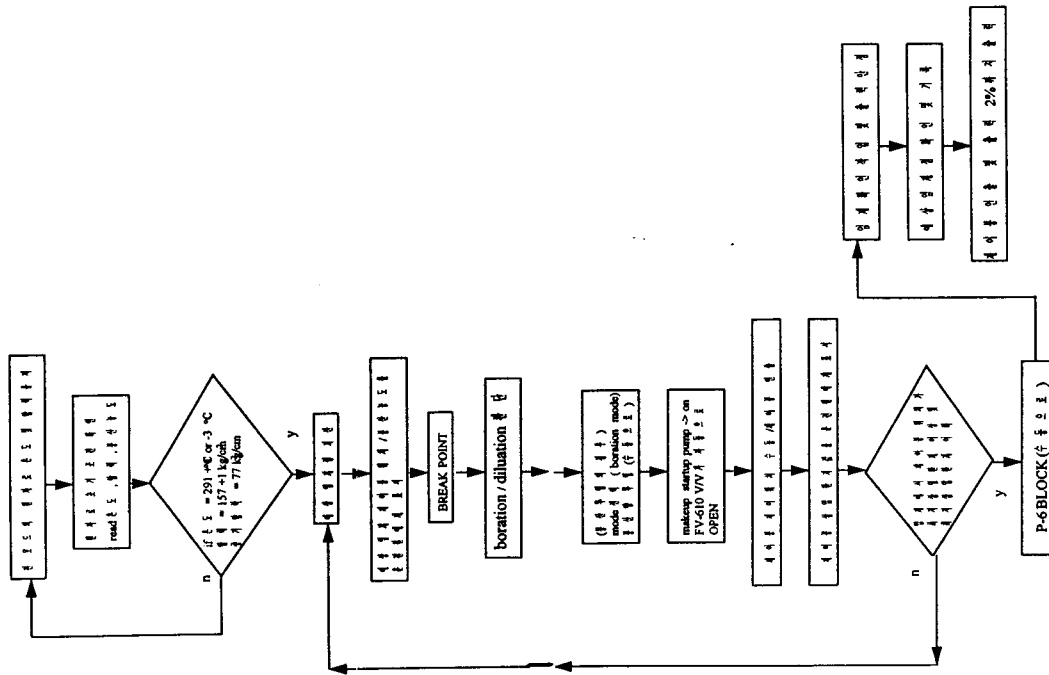


그림 3. 고온대기에서 2% 출력까지 전제흐름도