

2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

기능분석 결과에 따른 SMART 제어계통 구조 개발  
Development of the SMART Control System Architecture  
Based on the Functional Analysis

이철권, 허섭, 박희운, 구인수, 장문희

한국원자력연구소

**요 약**

SMART 제어계통의 기능과 설계개념을 설정하고 계통구현을 위한 첫 단계로 제어계통의 구조를 개발하였다. 체계적인 구조개발을 위하여 NUREG-0711이나 EPRI URD 등에서 제시하고 있는 방법인 기능분석 결과를 근거로 하였다. 즉, SMART의 기능을 상위수준의 기능에서부터 하위수준의 상세기능에 이르기까지 상세히 분석하여 이를 기능중심으로 집단화함으로써 체계적인 제어구조를 만들고자 하였다. 이러한 제어구조는 운전원 기능중심으로 설계되는 MMI를 지원하고, 운전원의 플랜트에 대한 이해력을 높일 뿐만 아니라 세부 제어기능 수행을 위한 제어기로의 접근성을 향상하여 운전성을 개선할 수 있다.

**Abstract**

Establishing the functions and design concepts of SMART control systems, the architecture of control system is developed. This is based on the results of functional analysis, which is recommended on NUREG-0711 and EPRI URD, in order to lead the control system to a highly structured system. In the process of design, the SMART functions are analyzed from high level functions to detailed functions and grouped by function. This structure supports the MMI designed by operator's function basis, and enhances the operability of the plant through improved operator's understandability to the plant and easy access to the controllers to perform the intended control functions.

## 1. 필요성

현재까지 원자력에서의 제어계통은 유체나 노심 및 성능해석 설계자의 요구나 설계결과에 따라 제어기를 필요로 하는 기기에 제어계통이 설치되는 형태로 설계되어 왔다. 그러나 최근 체계적인 MMIS 설계가 요구되고 제어계통 설계 또한 이의 범주에 포함되어 있다.[1] 본 연구는 원자력연구소가 개발중인 일체형원자로인 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)의 제어계통에 기능중심으로 SMART 기능을 분류하고 집단화함으로써 제어계통 구조를 설계하였다. 이러한 설계는 기존의 설계방법에 비해 최근 운전원 기능중심으로 설계되는 MMI 설계를 지원함은[2] 물론 계통의 설계, 운전 및 보수유지에 이르기까지 많은 개선사항을 제시할 수 있을 것이다.

## 2. 배경

### 1) 제어개념

SMART가 목적을 달성할 수 있도록 원자로 및 각종 기기들의 제어를 담당하는 제어계통은, SMART의 안전을 보장하는 운전제한치 내에서 최적의 상태를 유지하면서 효율적이고 경제적으로 운전이 이루어지도록 관련 기기들을 제어한다. SMART 제어계통은 대부분의 구동기기를 자동 제어 방식으로 제어하나 운전원의 조작명령을 받아 수동으로도 제어할 수 있다. 자동제어 방식은 SMART의 운전모드를 고려하여 프로그램된 제어량에 따라 제어대상을 제어하는 것으로, 자동제어를 위하여 제어계통은 SMART 상태뿐만 아니라 현재의 운전모드를 정확히 인식할 수 있어야 한다. 수동제어는 제어실 운전원이 제어대상을 조작하면 이 명령이 제어계통에 전달되고 제어계통은 전달된 명령을 해석하여 요구된 제어대상을 제어하게 된다. 제어계통은 제어결과를 제어실 운전원에게 제공하여 SMART 운전을 용이하게 한다.

### 2) 설계요건

SMART 제어계통은 기존의 아날로그 기기가 아닌 디지털기기 및 정보통신기술을 이용하고 소프트웨어기반으로 설계를 수행하여 계통설계 및 구현의 유연성을 확보할 뿐만 아니라 정확도를 향상한다. 제어계통은 계층적 구조로 설계하며 각 계층은 기능적으로 분산되고 필요시 지역적 또는 타 방식의 분산구조를 적용한다.[3] 이러한 기능에 따른 분산구조를 갖는 각 제어계통은 세부 기능 및 계통별로 별도의 프로세서를 가지도록 구획화되며, 각 프로세서는 다중화 설계되어 한 프로세서에서 고장 발생시 대기중인 프로세서가 기능을 연속해서 수행하게 하여 가동율을 높이고 제어계통에서 발생하는 고장의 전파를 최소화한다. 각 제어계통 간 및 제어계통 내의 세부계통간

정보교환은 계통내부 통신망을 이용한다. 제어계통으로의 정보는 계측계통과 보호계통으로부터 통신망을 경유하여 입력되며, 또한 제어실 제어반에 설치되는 소프트웨어기나 각종 스위치를 통한 운전원 입력이 있다. 제어계통은 공정기기 구동을 위한 제어신호를 전송할 뿐만 아니라 제어실 운전원 정보표시를 위하여 정보준위계통으로 제어와 관련한 운전정보를 제공한다.

### 3. 제어구조 설정

#### 1) 기능분석

기능분석은 SMART 계통을 기능중심으로 분류하여 MMIS에서 수행되는 기능을 운전원 입장에서 파악하고 MMIS 설계요건을 설정하기 위한 기본적인 기능구조를 설정하는 것으로서, 상위 수준의 기능으로부터 상세기기 수준의 기능까지 분석한 결과를 검토하였다.[4] SMART 기능분석 구조는 3 개의 최상위 목적인 안전성확보, 전기생산, 보조기능으로부터 8 개의 필수기능(Critical Function)을 정의하고, 각 필수기능은 다시 주요 기능(Major Function)으로 나누어지며, 이들은 다시 부 기능(Sub-Function) 들로 나누어진다. 또 각각의 부 기능은 여러 개의 계통기능(System Function)으로 분해된다. 안전성 측면의 기능은 보호계통 및 안전제어계통으로 본 연구에서 제외되며, 보조기능은 설계가 진행된 후 추가된다.

경제성 측면의 기능을 달성하기 위하여 수행되는 SMART 기능은 크게 표 1과 같이 원자로 내에서의 핵분열 에너지 생산과 증기 생산을 위한 생성열의 이차계통으로의 이송을 담당하는 기능과, 생산된 증기로부터 전기생산 등 경제적 목적으로 변환 후 재 급수되기까지의 유체의 전달을 담당하는 기능으로 나누어진다. SMART 제어계통은 전자의 기능을 일차계통 제어로, 후자는 이차계통 제어로 분류한다. SMART에 대해 수행된 기능분석으로부터 제어기능을 추출하고 계통설계자의 P&ID 등 계통설계 결과 및 기기분석 결과를 바탕으로 기능분석 구조에서 계통수준의 기능별로 제어계통과 이들이 제어하는 기기를 기능에 따라 표 2에서 할당하였다.

기능분석 결과는 설계과정에서 제어계통의 기능을 한 눈에 파악가능케 하여 설계상의 오류를 줄이고, 설계후 확인용으로 사용가능하다. 예를 들어 급수계통 기능은 표 2에서 "Supply FW" 외에도 "Control Moderator Temp."도 있음을 설계자가 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 후자의 경우 일차계통 기능으로 분류된 기능임을 비추어 이차계통 제어인 급수계통이 일차제어 계통과 연계가 있음을 예상할 수 있다.

#### 2) SMART 계통 및 구성기기 분석

SMART의 원자로나 유체계통 별로 제어기기 들을 파악하여 기능분석 결과에서 파악된 각 기능을 담당하는 SMART 계통이나 기기를 검토하였으며, P&ID, 계통별/제어변수별 제어기 현황

을 파악하고 기동에서 전출력까지 운전 시나리오에 따른 계통기능 및 운전원 직무분석 결과를 입력자료로 사용하였다. 분석결과 SMART 설계에서 많은 기능이 피동개념으로 설계되므로써 제어 기능이 요구되지 않으며, 또한 시스템이 단순하여 수동제어되는 것이 많았다.

### 3) 계통 분류

표 2의 제어기능 할당에서 볼 때 Critical Function 수준에서 SMART 제어계통은 기능적으로 일차계통 제어와 이차계통 제어로 나누어진다. 이들은 다시 Sub-Function 및 System Function으로 분해되고 계통기능 별로 제어계통이 할당된다. 일차계통 제어로 분류된 기능을 수행하는 계통으로는 제어봉구동장치 제어계통과 Makeup 제어계통 등이 포함되며, 이차계통 제어는 주증기 제어를 포함하는 터빈출력 제어계통, 복수 및 급수 제어계통 등이 있다. 그러나 기능분석에서 파악된 계통기능 외에 SMART 성능해석으로부터 일차계통 제어에는 운전상태에 따라 SMART의 일, 이차측의 전체 에너지 균형을 조절하는 원자로출력제어, 주기기의 동작불능에 따른 과도상태에서 원자로출력을 급감하기 위한 급감발 제어가 포함된다. 또한 운전성 향상 측면에서 운전원의 업무부담을 줄이기 위하여 도입되는 자동기동 및 냉각 제어가 포함된다.

본 연구에서는 System Function 수준의 일차 및 이차계통 제어기능 중 SMART에서 복잡한 계산 알고리즘이 요구되지 않고 펌프나 밸브 등의 단일 기기 및 단일 공정에 대한 제어기능만을 수행하는 제어계통들과 수동으로 운전되는 계통을 공정제어 계통으로 분류하였는데 이들은 주로 Component Function 수준의 기능을 수행한다. 공정제어계통은 설계상에서 다시 일차측 기기제어와 이차측 기기제어로 구분된다. 그림 1은 SMART 제어계통 구조를 보여준다.

### 4) 계통 기능

#### 가) 일차계통 제어

계통별로 분산, 구획화되고 고 신뢰도를 갖도록 이중화계통으로 설계한다.

#### (1) 제어봉구동장치제어계통

제어봉 구동장치 제어계통은 제어봉 구동장치를 움직이는 제어신호 및 구동력을 제공하여 노심에 있는 제어봉 집합체를 상하로 움직인다.

#### (2) 원자로출력제어계통

터빈 등 이차계통 측의 부하변동에 대하여 증기압과 원자로 온도를 규정치 내에 유지하면서 원자로출력을 자동제어하기 위하여 다양한 운전조건에서 급수량 및 제어봉구동장치를 제어하기 위한 제어입력 신호를 발생한다. 원자로 출력제어 논리는 운전모드를 고려하여 원자로 출력에 따른 급수유량과 노심 고온측(증기발생기 입구측) 온도의 관계식으로 프로그램된다.

### (3) 원자로출력 급감발 제어계통

원자로출력 급감발 계통은 냉각재 펌프나 급수펌프 정지 등과 같은 주기기 손상에도 불구하고 제어봉을 삽입하여 원자로 출력을 급격히 줄이므로써 SMART의 지속적인 운전을 가능하게 한다.

### (4) 자동 기동 및 냉각운전 계통

운전원 지원계통으로 포함되는 자동기동 및 냉각운전 계통은 주터빈을 가동할 수 있는 20% 열출력 상태까지 원자로를 자동으로 기동하고 또 역으로 냉각시키는 운전으로, 수동운전에 따른 운전원의 업무부담을 감소시키고 원자로 상태나 조건에 따라 최적의 운전을 수행하도록 하여 운전의 신뢰도와 가동률을 향상한다. 정지 또는 냉각운전은 연료 재장전 등을 위한 정상 정지 운전과 사고로 인한 긴급 정지운전으로 구분된다.

#### 나) 이차계통 제어

계통별로 분산, 구획화되고 이중화계통으로 설계한다.

#### (1) 급수제어계통

기동운전과 냉각운전시 설정 주급수유량이 자동으로 정해지며 출력운전시 급수유량을 조절하여 원자로출력제어를 위한 입력변수로 사용한다.

#### (2) 주증기 제어계통

우회증기 유량을 통해 증기압력을 제어한다. 증기압력 계측기와 우회증기 제어밸브를 수력학적으로 연동시켜서 증기압력이 높으면 제어밸브를 많이 개방하고, 증기압력이 낮으면 제어밸브를 닫으므로써 증기압력을 일정하게 유지한다. 또한 터빈제어와 연동되어 터빈의 출력변경이 발생하는 경우에도 증기압력을 일정하게 유지하면서 우회증기량을 제어한다. 기동용 냉각기는 기동운전중 증기발생기로부터 방출되는 증기를 복수기로 직접 보내는 역할을 수행한다.

#### (3) 터빈출력 제어계통

주터빈은 원자로 출력이 20% 이상이 되면 회전력을 생산하며 정상적으로 작동한다. 보조 터빈 발전기는 원자로 출력이 5% 이상이 되면 전기를 생산할 수 있으며, 10% 이상이 되면 항상 전기를 생산하며 정상적으로 작동한다. 터빈의 출력제어는 설정 전기출력과 계측 출력을 입력신호로 하여 조절된다.

#### 다) 공정제어계통

공정제어계통은 다시 일차계통 기기제어와 이차계통 기기제어로 나누어진다. 자동 또는 수동으로 제어되는 몇 개의 유사 기능 및 계통이 하나의 제어용 프로세서에 할당되며, 각 프로세서는 중요성에 따라 이중화하고, 계통 고장의 국소화와 계통 응답시간을 고려하여 한 프로세서에

많은 기능을 부여치 않는다.

(1) 일차계통

- 주냉각재펌프 제어 및 관련 밸브
- 잔열제거 보수냉각재펌프 제어 및 관련 밸브
- 충수계통제어
  - o 가압기수위제어 및 가스실린더 압력제어
  - o 충수펌프 및 관련 밸브, 잔열제거계통 보충탱크 충수, 충수탱크 수위제어, 보상탱크 차단밸브 제어, 봉산수 주입
  - o 복수기 수위제어 및 공기압 제어
- 기기냉각수 유량제어 : 제어봉구동장치, MCP 모터, 내외부차폐탱크, 가압기 냉각기로 일정유량의 냉각수 공급

(2) 이차계통

- 해수펌프 제어
- 기동급수펌프 제어, 주급수펌프 제어 및 관련 밸브
- 복수펌프 제어 및 관련 밸브, 복수재순환 유량제어
- 과열저감기 분무수 및 기동용냉각기 분무수 유량제어

#### 4. 결론

체계적인 MMIS 설계를 위하여 미 NRC에서 제시하는 NUREG-0711의 인간공학적 설계절차에 따라 SMART 제어계통을 설계하였다. 우선 제어계통 체계를 구성하는 데 근거가 되는 SMART 기능을 상세히 분석하였으며, 기능분석 과정에서 드러난 SMART의 상세 기능별로 제어계통을 구성하므로써 기능중심의 체계적인 제어계통 구조뿐만 아니라 각 제어계통 별로 처리량 할당이나 신뢰성에 근거한 가동율을 설정하여 상세 제어계통 설계 및 구현시 이를 기준으로 활용할 수 있다. 또한 이러한 구조는 운전원 기능중심으로 설계되는 최신의 MMI 설계를 지원하며, 나아가 기능별로 분산되고 계통별로 구획화된 계통구조는 계통의 보수유지성을 향상한다. 또한 추후 제어기능의 추가나 설계변경이 용이하며, 기기 고장시 타 기능수행에 지장을 주지 않도록 고장을 국소화하여 안전성을 증대할 수 있다.

#### Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업 일환으로 수행되었음.

[참고문헌]

1. NUEG-0711, "Human Factors Engineering Program Review Model". 1994
2. 이철권, "기능기반의 소프트웨어기 화면설계", '99 춘계학술발표회, 원자력학회, 1999
3. 서용석, "SMART 제어계통 설계요건서", SMART-MM-SR245, 2000
4. 오인석, "SMART 기능분석 보고서", SMART-MM-RR221-02, 1999

**SMART Control System Configuration**

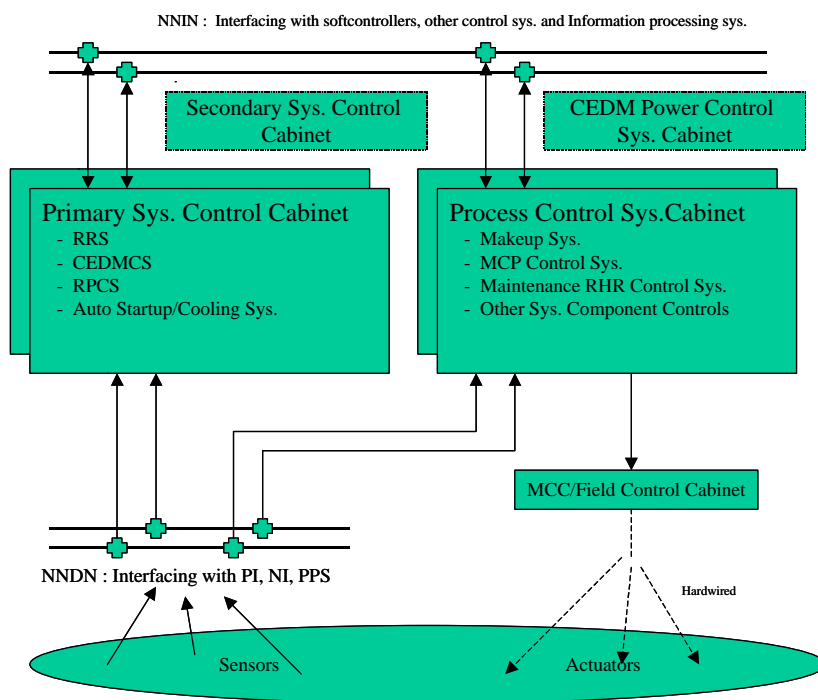


그림 1 SMART 제어계통 구성도

표 1. 전력생산 목적에 대한 기능분석 구조 일부

---

<b><u>Function Goal : Power Production</u></b>					
<b><u>Critical Function</u></b>	<b><u>Major-function</u></b>	<b><u>Sub-Function</u></b>	<b><u>System Function</u></b>		
Create Fission Energy	Control Reactivity	Control Rod	Regulate Shutdown Rod Regulate Regulating Rod		
		Control Boron	Inject Borated Water		
	Control Moderator Density	Control Moderator Temp.	Control FW Flow		
		Control Moderator Pressure	Control PZR Pressure		
	Transfer Fission Energy	Maintain Coolant Inventory	Control Coolant Flow	Align V/Vs Control Makeup Water	
			Maintain Coolant Purification	Connect Filters/Ion Exchanger	
		Maintain Sub-cooled Margin (Maintain Coolant Temp.& Press.)		Control PZR Temperature Control PZR Pressure Control Main Coolant Pumps Regulate Control Rods	
			Circulate Coolant	Maintain Forced Circulation	Control Main Coolant Pumps
				Maintain Natural Circulation	Control PZR Pressure
Maintain Secondary Heat Sink		Supply Feed Water	Regulate Feed Water Flow		
Create steam and Transfer Create electricity					

---



표 2. 기능별 제어계통 할당 예

<b>Function Goal : Power Production</b>				
<b>Major-function</b>	<b>Sub-Function</b>	<b>System Function</b>	<b>Assigned Control Sys.</b>	<b>Components</b>
Control Reactivity	Control Rod Absorber	Regulate Shutdown Rod	Rod Control Sys	Shutdown Rods
		Regulate Regulating Rod	Rod Control Sys.	Regulating Rods
	Control Liquid Absorber	Inject Boron	Boron Inject. Control Sys.	2 Makeup Pumps, Several V/Vs
Control Moderator Density	Control Moderator Temp.	Control FW Flow	Feed Water Control Sys.	3 MFWPs, 2 SFWPs, 2 Cont. V/Vs
	Control Moderator Press.	Control PZR Press.	PZR Control Sys.	5 V/Vs
Maintain Coolant Inventory	Control Coolant Flow	Align V/Vs	NSSS Comp. Control Sys.	Several V/Vs
		Control Makeup Water	Makeup Control Sys.	2 Makeup Pumps, Several V/Vs
	Maintain Coolant Purification	Connect Filters/Ion Exchanger	Coolant Purification. Control Sys.	Several V/Vs
Maintain Sub-cooled Margin	Maintain PZR Temp.	CCW Control Sys.	Several V/Vs	
		Control PZR Press.	PZR Control Sys.	5 V/Vs
	Control MCPs	MCP Control Sys.	4 MCPs	
		Regulate Control Rods	Rod Control Sys.	S-Rods, R-Rods
Circulate Coolant	Maintain Forced Circulation	Control MCPs	MCP Control Sys.	Same as above
	Maintain Natural Circulation	Control PZR Press.	PZR Control Sys.	Same as above
Maintain Secondary Heat Sink	Supply FW	Regulate FW Flow	FW Control Sys.	Same as above