

## 시스템즈 엔지니어링 기법을 이용한 원자력 발전소 소내 전력계통 설계

장중구

한국전력국제원자력대학원대학교

### Systems Engineering Approach to Design of Electric Power Systems for Nuclear Power Plants

Choong-Koo Chang

KEPCO International Nuclear Graduate School

**Abstract** - 원자력 발전소 소내 전력계통은 구성에 있어서 어느 발전소와 크게 다를 바 없지만, 원자력안전계통에 전원을 공급하는 안전 1E 등급 전력계통은 전기관련 법규와 규정 외에도 원자력관련 법규와 규정을 준수해야 하고 규제기관의 검토와 승인을 받아야 하는 점에 있어서 상당한 차이점이 있다. 또한 설계기간만도 7년이 소요되는 만큼 설계문서 관리도 복잡하고 까다로울 수밖에 없다. 게다가 최근 더욱 높아진 원자력안전에 대한 의식과 규제도 인하여 현재 세계 각국의 원자력 발전소 건설프로젝트들이 공기지연과 건설비 예산 초과로 어려움을 겪고 있다. 본 논문에서는 이러한 현안에 대한 대책의 일환으로 시스템즈 엔지니어링 기법을 소내 전력계통에 적용하는 방법을 제시하고자 한다. 시스템즈 엔지니어링이란 품질목표를 달성함과 함께 예정된 공기와 예산범위 내에 프로젝트를 완성하도록 지원하는 엔지니어링 기법이다.

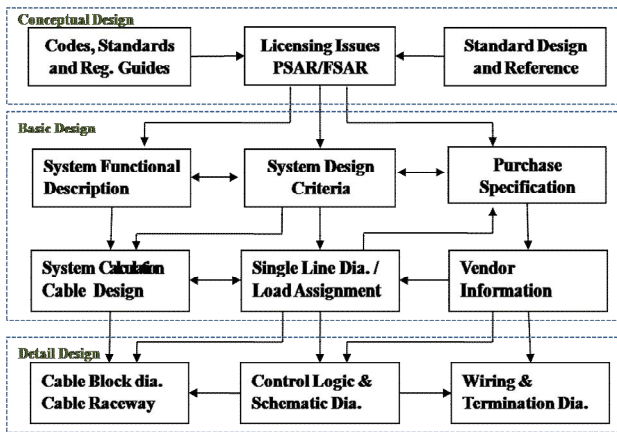
#### 1. 서 론

시스템즈 엔지니어링의 기능은 복잡한 시스템의 엔지니어링을 안내하는 역할이다. 여기서 안내라는 말 속에는 우세한 경험을 바탕으로 주어진 과정의 수행을 돕는 '유도', '관리', '지휘' 그리고 '방법 제시' 등과 같은 활동을 한다는 의미가 포함되어 있다. 여러 가지 선택 가능한 경로 중에서 하나의 경로를 선택하는 하는 과정을 강조하는 것이 시스템즈 엔지니어링의 1차적인 기능이기도 하다[1].

#### 2. 본 론

##### 2.1 기존의 설계절차 및 방법

기존의 원자력 발전소 소내 전력계통 설계 절차와 방법을 간략히 정리하면 아래와 같다.



<그림 1> 전력계통 설계 흐름도

##### 2.1.1 개념설계

인허가 서류인 예비 안전성분석보고서(Preliminary Safety Analysis Report: PSAR)와 최종 안전성분석 보고서(Final Safety Analysis Report: FSAR)에는 규제요건을 충족시키기 위해 필요한 전력계통 전반에 관한 구체적인 이행사항이 기술되어 있다. 설계기준서 (System Design Criteria: SDC), 시스템 기능설명서(System Functional Description: SFD) 또는 구매 규격서(Purchase Specification) 등에 기술된 요건들은 인허가 검토 및 승인의 바탕이 되는 PSAR/FSAR의 내용과 상충되지 않아야 한다.

##### 2.1.2 기본설계

기본설계 단계에서는 SDC, SFD, 구매 규격서, 기술 계산서, 단선도 작성 등의 작업을 하며, 작업의 흐름은 <그림1>과 같다.

SFD는 개별 시스템의 설계 및 운전에 관한 사항을 서술한 문서로서 기기의 성격, 운전요건 및 성능, 보호기능, 그리고 다중화 사항 등이 기술된다. SDC는 특정 기기나 시스템에 국한하지 않고 종합적인 설계 기준이 되는 사항을 기술한다. 즉 주제 범위가 넓고 다수의 시스템 혹은 기기들이 동시에 포함된다. 구매 규격서는 특정 기기에 대한 사항을 기술하며 관련 산업표준을 인용하므로써 SDC에서 산업표준을 반복하여 기술할 필요가 없도록 해 준다. 기술계산서는 전체 전력계통이 설계기준서에 규정된 상태에서 운전될 수 있도록 하고 정상 상태 혹은 비정상 운전상태일 경우에도 안정성을 유지할 수 있는 기반을 제공해 준다. 전력계통 관련 기술계산서 작성은 기본설계와 상세설계 두 단계에서 이루어진다. 기본설계 단계의 예비 계산서는 예상 부하를 기준으로 작성하며, 각종 기기의 실제 데이터가 확보되지 않은 경우 ETAP과 같은 프로그램에서 제공하는 대표 값을 이용한다. 확정 계산서는 발전기, 변압기, 전동기, 수배전반 등과 같은 전기기기의 제작자 데이터가 접수된 이후 완성된다. 전체 단선도(Station Single Line Diagram)은 발전소 전체의 전력계통을 단선으로 단순 간략하게 표현한 도면으로써 프로젝트 시작과 함께 제일 처음 작성하는 전기도면이다. 전체 단선도는 실선과 기호를 이용하여 소내 배전계통의 상호 연결 상태와 주요 기기를 보여준다. 전체 단선도에는 발전기, 고압 및 저압 배전계통 설비 그리고 기동 및 예비설비 등이 성격과 함께 모두 표현된다.

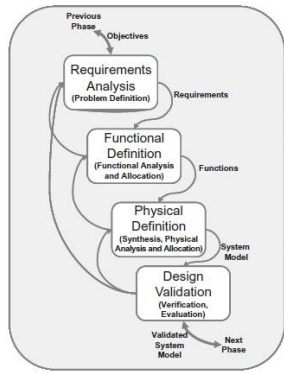
##### 2.1.3 상세설계

상세설계 단계에서는 주로 케이블 배선과 관련된 설계도서를 작성하며 기기내부 회로와 관련된 도면도 상세설계 단계에 작성한다.

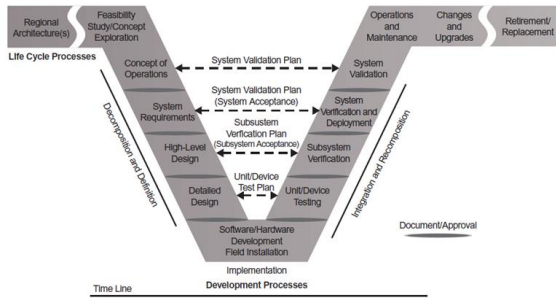
케이블 블록 다이어그램(CBD)은 각 기기의 단자대에서 외부로 연결되는 케이블의 요건을 표현한 도면이다. 기기가 설치된 위치를 하나의 블록으로 표현하고 블록 간을 케이블로 연결한다. 일반적으로 블록 간 케이블은 단선으로 표현하고, 명확성을 위해 필요한 경우에는 다중선으로 표현한다. 제어 논리도(Control Logic Diagram)은 기기가 특정 기능을 수행하기 위해서 필요한 단계와 사건의 순서 또는 변수들 간의 상관관계를 논리회로 표현한 도면이다. 제어, 보호 및 감시회로를 위해서는 계통도 (Schematic Diagram)를 작성한다. 계통도는 표준 소자 도표(Elementary Diagram)을 이용하여 작성하며 상세 설계정보를 통합적으로 표현한다. 케이블 접속도(Connection Diagram)은 현장에서 케이블을 접속하는데 필요한 정보를 제공해 준다. 케이블 식별번호, 케이블이 연결되는 기기와 단자대 등을 나타내 준다.

#### 2.2 시스템즈 엔지니어링 기법

시스템즈 엔지니어링 기법이란 시스템의 설계, 개발, 통합, 또는 시험시에 이용되는 공정의 순서와 방법론의 서술 관점에서 설명할 수 있다. 초기의 방법은 공정의 흐름과 단계별 순서가 선형이었으며, 일치성과 실행성 확인을 위한 논리적 수단으로 때로는 일련의 과정을 반복하기도 한다. <그림 2>의 a)는 인터페이스를 나타내주고 상호작용의 폭넓게 표현하기 위해 활용되는 폭포수 도표(Waterfall Diagram) 형식이다. 시스템즈 엔지니어링에서 보다 널리 사용되는 도표는 <그림 2>의 b)와 같은 'V' 다이어그램이다[2]. 'V' 다이어그램은 필요조건과 시스템 정의와 개발되고 입증된 제품간의 관계를 제품개발 전주기 과정과 함께 분명히 보여준다. 시스템 설계 단계는 '프로젝트 계획(Project Planning)', '요구조건 분석(Requirements Analysis)', '기능 분석(Functional Analysis/ Allocation)', '기본설계(High Level Design)', '상세설계(Detail Design)'의 단계로 이루어진다. 그리고 설계 결과에 대한 확인은 '검증(System Verification)'과 '비준(System Validation)' 단계로 이루어진다. 시스템 설계 프로젝트의 경우 소프트웨어 및 하드웨어 제작과 설치 그리고 시험 등의 단계는 생략 한다.



(a) 폭포수 도표

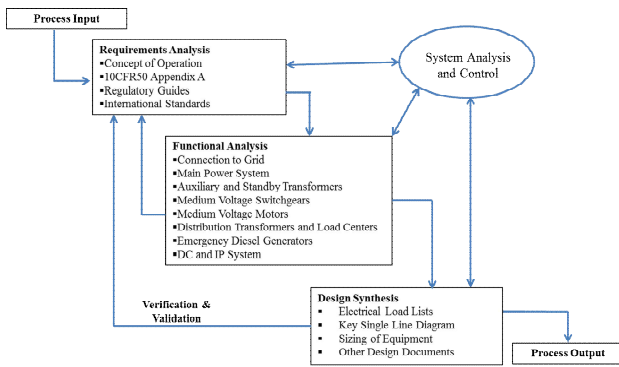


(b) V 다이어그램

<그림 2> 시스템즈 엔지니어링 기법의 예

### 2.2.1 요구조건 분석(Requirements Analysis)

요구조건 분석의 목적은 이해관계자(Stakeholder)의 요구사항을 이끌어내고 분석하여 제품에 대한 최상위 개념의 요구조건을 도출하고 이를 제품 레벨의 요구조건과 제약조건으로 구체화 시키는 작업이다. 요구조건에는 고객 요구조건, 운전 조건, 기능적 조건, 성능 조건, 디자인 조건 등이 있으며 제품의 기능과 제품에 대한 모든 요구조건들이 확인 또는 포착, 정의 및 분석될 때까지 요구조건 분석활동을 반복적으로 지속한다(그림3 참조).



<그림 3> 시스템즈 엔지니어링 프로세스 예

이 단계는 임무분석, 환경분석 등이 목적이며 사업 인가서류와 관련 법규 및 규정, 산업규격 그리고 설계지침, 참고 프로젝트 설계도서 등이 분석 대상이 된다. 분석결과는 기능적 요건과 요구 성능 그리고 설계 제약사항 등으로 정리되어 다음단계 작업의 입력요소로 이용된다. SDC가 요구조건 분석의 결과라고 할 수도 있다.

### 2.2.2 기능 분석 및 배분(Functional Analysis and Allocation)

기능분석 및 배분 단계의 목적은 요구조건 분석단계에서 도출된 결과를 시스템의 기능으로 논리적으로 표현하므로써 설계 단계의 지침으로 사용할 수 있도록 하는 것이다[4]. 설계자는 시스템이 수행해야 할 기능과 성능 그리고 제약사항 등을 숙지해야 할 필요가 있다. 전력계통 설계 프로젝트의 경우 이 단계에 이용되는 입력은 설계기준서(SDC), 운전 개념(Operation Philosophy) 등이며 결과물은 시스템 기능설명서(SFD) 기기 규격서(Design Specification), 하위 시스템 승인 계획(Subsystem Acceptance Plan) 등이 된다. 단, 기능 분석 및 배분의 성

과물은 다음 단계의 입력으로 사용됨은 물론, 이전 단계인 요구조건 분석 결과에 부합하는지 검증을 받아야 한다.

### 2.2.3 시스템 설계 (Design Synthesis and Development)

기본설계 단계는 기능 설명서에 기술된 내용이 디자인으로 전환되는 과정이다. 기본설계 단계는 일련의 창조적인 작업으로써 시스템에 요구되는 기능을 사전에 정의된 성능 변수 한계 내에서 수행할 수 있는 물리적 구조와 구성요소를 정의하고, 품목, 정격 등을 선정하는 과정이다. 아울러 물리적 인터페이스도 정의된다 [5]. 전력계통 설계 프로젝트에 있어서는 SDC, SFD, 부하목록(Electrical Load Lists) 등이 이 단계의 입력요소가 되고 출력 결과물은 단선도(Single Line Diagram)과 기술 계산서 등이다.

상세설계 단계는 프로젝트의 최종 성과물을 생산하는 과정으로써 기본설계 단계의 결과물이 입력으로 이용된다. 전력계통 설계 프로젝트의 출력 성과물은 케이블 배선관련 설계도서(Cable Schedule and Raceway Design Documents), 기기제어 회로 및 배선 설계도면(Control and Wiring Diagrams), 기기 배치도면(Equipment Layout Drawings) 등이 있다.

### 2.3.4 시스템 검증 (System Verification)

시스템 검증은 시스템 설계 결과가 시스템 요구조건을 만족하는 물리적 구조를 가진 시스템을 창출할 수 있는지를 확인하는 작업 단계이다[6]. 시스템 검증을 위해서는 비용, 공정, 성능 요건의 만족여부를 검증하기 위한 기준 수립하여야 한다. 각각의 요구조건 만족여부를 검증하는 방법을 요구조건 분석과 기능분석을 하는 동안 수립하여야 한다. 검증 목록은 요구조건 배정 시트(Requirement Allocation Sheet)와 직접적으로 관련되어야 하며 지속적으로 갱신하여야 한다. 검증 방법에는 '분석', '검사', '시연' 및 '시험' 등이 있다.

### 2.3.5 시스템 비준 (System Validation)

설계 검증 후에는 설계결과에 따라 기기가 제작되고 전기설비 공사가 이루어지게 된다. 이때 전기설비의 운영자 또는 발주자 입장에서 자신들의 기준에 따라 완성된 시스템이 당초 계획했던 필요와 운영방침(Concept of Operations)을 만족하는지 여부를 확인하는 과정을 말한다. 운영방침 계획 단계에서 시스템 비준 계획서도 함께 작성되어야 한다. 검증(Verification)은 규정된 요구조건 만족여부를 확인하는 것이라면 비준(Validation)은 시스템이 의도한 용도를 만족하는지 여부를 확인하는 것이다.

## 3. 결 론

이상에서 원자력 발전소 소내 전력계통 설계의 절차와 내용을 간략히 소개하고 이어서 시스템즈 엔지니어링 기법을 적용하는 방법을 설명하였다. 작업단계의 큰 흐름에 있어서는 기존의 방법과 크게 다를 바 없으나 세부적인 방법론에 있어서는 많은 차이점이 있음을 알 수 있다. 물론 기존의 설계방법론에서도 요구조건을 분석하고 설계결과를 검증하는 과정이 포함되어 있다. 그러나 시스템즈 엔지니어링 기법의 가장 큰 차이점은 시스템의 생명주기(Life Cycle) 전 과정을 유기적으로 일관되게 관리하는 점이다.

시스템 분석 및 제어 활동에는 적정성 분석, 유효성 분석, 위기관리, 형상관리, 인터페이스 관리, 데이터 관리, 기술검토 및 성능 측정 등도 포함되며, 프로세스 전 과정을 추적 관리한다. 시스템 운영개념 설정시 시스템 비준 계획도 함께 수립하고, 시스템 요구조건 분석시에는 시스템 검증 및 승인계획도 함께 작성한다. 뿐만 아니라 시스템에 관련 모든 기술 분야가 시스템즈 엔지니어링을 통해서 필요한 요소를 집약되고 공정간의 상호지원이 원활하게 이루어지도록 할 수 있다.

따라서 시스템즈 엔지니어링 기법을 적용 할 경우 설계품질 향상은 물론 공기단축과 비용감축 효과도 기대할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Alexander Kossiakoff, William N. Sweet, Samuel J. Seymour Steven, and M. Biemer, Systems Engineering Principles and Practice, A John Wiley and Sons Inc, 2011, p.3
- [2] ibid, p.36
- [3] Defence Acquisition University Press, Systems Engineering Fundamentals, 2001, p.36
- [4] ibid, p. 45
- [5] ibid, p. 57
- [6] ibid, p. 65
- [7] Ed 코두, Overview of the Systems Engineering Process, North Dakota Department of Transportation, 2008, p.20