

원자력 발전소의 전기설계 동향

서 윤 석

(한국전력기술 전기기술부장)

1. 머릿 말

전기에너지를 지속적으로 원자력발전에서 얻으려는 작금의 추세와 원자력 이용에 관한 국민적 합의 (Public Acceptance, PA) 필요성이 높아지고 있는 차체에 원자력발전소의 안전성에 전기 설계 (Electrical Engineering)는 어떻게 접근하고 있는가를 살펴봄으로써 원자력 이용 기술을 보다 구체적으로 신뢰하고 나아가 발전시켜 가는데 도움이 되리라 생각되어 원전 전기설계의 내용과 동향을 기술적 측면에서 소개하려고 한다.

편의상 본고에서는 프랑스의 900MW급 가압경수로 (PWR) 2기 (950MW×2, 울진원자력 1, 2호기)가 경북 울진에 건설됨으로서 그들의 기술을 중심으로 살펴보고자 한다. 이는 프랑스가 추진한 원전 도입 방식과 설비의 기술적 특성은 미국에서 도입한 원전과는 현격한 차이를 보이고 있고 동일한 설계목표에 대한 상이한 기술적 접근 방법들을 평가하는 것은 원전 안정성에 접근하는 각국의 의도를 보다 용이하게 들여다 볼 수 있는 기회일뿐만 아니라 그들 기술을 소화하여 우리 교유의 기술로 정착시키는 데도 도움이 되기 때문이다.

프랑스는 1970년부터 PWR 900MW급 34기 (CP1, 2), 1,300MW급 20기 (P4, P'4)를 추진하고 있고, 1,500 MW (NH)급 2기는 순수한 프랑스 설계로 알려져 있다. 이들의 설계는 초기에 미국의 참조 발전소를 참고로 하였으나 프랑스의 국내산업 관행에 맞

도록 적응시켜 국산화 하였으며 많은 부분이 자국 산업기술에 맞도록 재생되어 원래의 기술 도입선인 미국의 설계와는 상당히 다르게 프랑스식으로 개발된 것으로 평가되고 있다.

1981년에는 미국에 이어 원전 건설 및 설계에 관한 기술기준 (Code and Standard) RCC Code까지 개발 시행하므로써 그들의 원전 산업을 뒷받침하고 있다.

본고에서는 미국의 기술을 자국의 기술로 정착시켜간 프랑스의 PWR 900MW급의 전기설계 동향과 미국과 기술적으로 차이가 지는 부분도 함께 소개하고자 한다.

2. 안전요건

원자력발전소의 안전관련 계통의 전기부하에는 설계기준사건 (Design Basis Event) 과 발전소의 모든 운전 모드에서도 전력 공급이 지속되어야하고 이 전력 공급 계통은 안전 관련 계통에서 요구하는 신뢰성을 필요로 한다. 이것은 원전 전력공급 계통설계에서 실현해야 할 목표들이다. 안전관련 발전소 소내 보조기기에 전력을 공급하는 계통설계는 다음의 조건을 반드시 만족하도록 요구하고 있다.

첫째는 전력공급계통의 어떠한 고장도 전력공급의 전체 상실을 초래해서는 안되며 발전소 정지를 유발하는 이러한 사고(특히 장기간 지속되는)의 경우에도 원자로의 설계 제한치를 초과하지 않도록 노심의

잔열을 제거하기 위한 관련 보조기기에 전력이 반드시 재공급되어야 하는 점이다.

둘째는 냉각재 상실과 같은 사고의 경우 방사성 분열물질의 외부 누출을 막기 위하여 전력공급 계통은 비상 보조기기에 즉각 전력을 공급할 수 있어야 하는 점이다. 이러한 필수 요구사항에 대한 구체적인 대응설계는 적절한 다중성(Redundancy)의 실현으로 단일 사고 기준(Single Failure Critrion)을 맞추고, 다양성(Diversification)과 독립성(Independance)을 부여함으로써 공통 유형고장(Common Mode Failure)의 위험 요소를 최소화하며 적절한 배전망을 구성하여 뒷받침함으로써 실현된다. 이에 더하여 이들 대처 수단에 대한 감시 시험 장치의 설계와 계통을 구성하는 전기기기의 성능검증 (Equipment Qualification)활동을 통한 기기의 신뢰도를 높이는 일들이 뒤따른다.

전력공급 계통은 적절한 다양성을 얻기 위하여 소내전원 설비를 두어 소외전력계통의 단시간 정전 가능성을 모면케 하며 소외전력계통은 10CFR50, GDC-17에 따라 2개의 독립된 회로를 둔다. 이렇게 소내의 전력공급계통 각각에 다중성을 부여 함으로써 필요로 하는 신뢰성에 도달하며 전력공급계통의 독립성, 공급력(Capability)과 가동성(Availability)을 확보할 수 있게 된다. 소내 전원장치의 수량은 비상계통에 공급되는 전력의 다중성을 유지할 수 있을 정도로 결정되는데 2대의 디젤발전기를 설치한다.

가압경수로를 채택하고 있는 프랑스는 미국의 기술기준 (Code & Standard)을 자국의 산업 표준과 특수산업연계등을 반영하여 활용하고 있다. 전통적으로 미국의 기술기준이 PWR 원전에 적용되어 왔고 전력 공급의 관점에서 미국연방규제인 10CFR50 Appendix A의 General Design Criteria, GDC-17 (Electrical Power System)이 전력공급설계에 기술기준으로 사용되고 이 기준과 관련 Regulatory Guide (RG-1.32, 1.6, 1.53, 1.9)와 IEEE-308(Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations)이 개발되어 있다.

GDC-17은 기본적으로,

- 원전보조기들이 연계된 소내 배전망에 송전계통으로 부터 공급되는 소외전력은 물리적으로

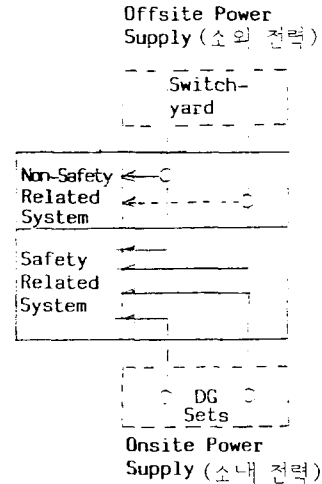


그림 1. 원전 전력 공급 방식

- 독립된 2개 회로에 공급되어야 하고,
- 2개 회로가 동시에 상실되는 동일 유형 사고 확률을 실질적으로 최소화하여야 하며,
- 적어도 이중 1개 회로는 냉각재 상실사고 이후 수초내 회복되어 쓸 수 있어야 하며,
- 소내의 전력 공급은 가상 사고에 대하여 핵연료 설계와 압력 경계 제한치를 초과하지 않도록 하고 노심의 냉각과 격납건물의 건전성이 확보되도록 설계되어야 한다고 되어 있다.

이러한 설계에 바탕을 둔 원전의 신뢰성 있는 전력공급은 주요 설비의 사고 결과를 축소하거나 피하는데 필수적인 것이며 이를 위한 전원은 그 다양성이 중요시 된다. 프랑스 경수로의 설계 및 제작의 기술적 방향은 미국의 원자력 규제위원회 (USNRC)가 개발한 심층방어 (Defence in depth, 어떤 사고의 파급영향을 최소화하는)개념에 기초는 하고 있으나 프랑스의 안전 대응 추세는 어떤 사고 발생의 원인 자체를 봉쇄하려는데 관심을 갖고 있는 것 같다.

3. 계통연계

원전의 계통연계는 400KV 주전력망에 연계된 정상공급 회로와 225KV 계통에 연계된 보조 공급회로로 구성된다. 이들은 심각한 기후 조건이나 지진과 같은 예외적인 사고등 주변 환경에 대한 보호는 고려하지 않는다. (우리나라는 정상과 보조공급회로를 공히 345KV 계통에 접속하고 있다.) 여기에 소내

보조설비로서 소내비상전원(디젤발전기)과 적절한 배전망을 구성, 전원의 전체상실을 방지하도록 설계한다.

3.1 정상 공급 회로

프랑스 전력공사 (EdF)가 건설하는 기력 및 원자력 발전소의 동급 표준발전소 기술(Paliers Technique)은 보조기기의 정상공급은 발전기부하차단기와 주변압기 사이에서 인출 사용하는 방식 (그림2 참조)을 선택함으로써 발전소를 기동정지 할 때마다 소내보조기기 전력공급의 동요와 전기기기에 주는 스트레스를 피하고 모션절환을 생략함으로써 전력공급에 높은 신뢰성을 기대할 수 있게 했으며, 더욱이나 모션절환 실패로 인한 모든 주요 펌프의 상실을 수반하는 운전의 심각한 과도현상 발생을 억제한다.

CIGRE가 원자력발전소 소내전원 공급방식에 관해 조사한 바로는 28개국(동구권 포함)중 20개국이, 총 조사된 214개 유니트중 91개 유니트가 발전기 부하차단기(GLB)를 채택하고, GLB를 주변압기 이후에 설치한 곳이 10개, GLB를 채택하지 않는 곳이 64개소 기타가 47개소로 GLB를 선택한 유니트가 48%로 훨씬 많은 편이며 최근 원전 건설에서 GLB를 선택하는 것은 공통적인 추세이다.

이 방식은 GLB의 제작기술 발달과 시험설비의 출현에 힘입고 대용량발전기의 초고압 전력계통 투입경향 때문에 더욱 광범위하게 채택되는 경향이고 기술적, 경제적 측면에서의 유리한 평가가 이를 뒷받침 해주고 있다.

프랑스의 계통운영상 특기할 사항으로 원전의 소내부하운전 가능성을 들 수 있다. 전력계통 사고시 원자로의 터빈발전기는 정지하지 않고 그대로 운전

하면서 필요에 따라 발전기를 바로 재병입할 수 있게 하기 위해서 보조기기에 전력을 계속 독립적으로 공급할 수 있도록 하는 소내부하운전 (House Load Operation 또는 Island Operation)능력을 갖추도록 했으며, 소내부하운전은 가압경수로 발전소 설계 초기부터 고려된 것으로 터빈우회계통 (Turbine Bypass)의 과도적 증기덤프능력, 증기발전기 저출력 수위제어능력, 보조기기 가속능력등을 예로 들 수 있을 것이다. 소내부하운전의 실용성은 시험 결과 높은 성공률로 입증되고 있으며 이 과도 상태를 모의해 본 결과 보조기기에 아무 문제도 주지 않았음이 확인되고 있다.

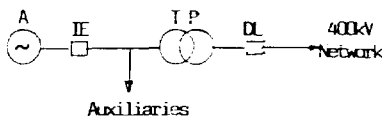
이들 전력공급 계통의 운전은 GLB를 이용하여 400kV 계통으로부터 소내보조기기에 직접 전력을 공급하며, 이에 아무 간섭을 주지 않고서도 주변전기를 계통에 병입하거나 계통으로부터 병해하는 것이 운전의 요체이다.

또한 소내전기회로에 영향을 주지 않는 고장일 경우의 비상정지는 GLB를 개방함으로써 간단히 이루어진다. 전력계통에 교란이나 고장이 발생해서 400kV의 전압감쇄가 지속되는 경우에 유니트는 400kV 측 차단기를 끊어 계통으로부터 분리시키고 열린다. 발전기는 회전수와 전압 조정으로 충분히 안정되어 보조기기 전원을 확보하며 유니트의 소내부하운전은 최소한 1시간 정도 허용되고 있다.

한편, 유니트 내의 전기적고장 (주변압기, 소내변압기, 발전기, 차단기, 모션등)인 경우는 400kV측 차단기를 열고 유니트를 비상정지시키며 전압상실 확인과 동시 영구부하의 모션은 자동으로 예비변압기 (TA)로 절환된다. 그리고 비상 디젤발전기는 TA가 고장시 기동된다.

3.2 보조 공급 회로

정상회로와 엄연히 구분되는 이보조회로연계 (그림3 참조)는 발전소 주변의 계통구조와 환경 여건 그리고 경제성을 고려하여 설계한다. 이 설계는 400kV 계통사고에 영향을 받지 아니하며 전원전체상실 가능성도 감소 되었음이 연구 결과 입증되어 있고 그 신뢰도는 정상회로 만큼은 갖고 있다고 한다. 이 보조회로는 단락용량이 제한되어 있어 소내변압기 (TS)에서 TA로 모션절환시 관련 회로 전체의 단락



- A : Generator
- IE : Generator Load Breaker (GLB)
- TP : Main Tr., DL : Line Breaker

그림 2. 발전기 접속방식

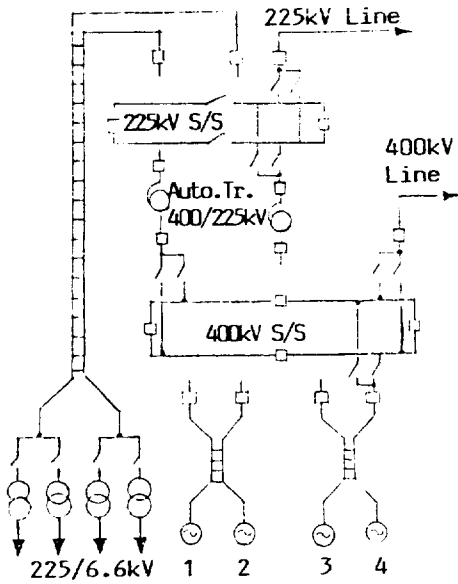


그림 3. 발전소의 계통연계방식

리액턴스 때문에 소내보조기기의 즉각적인 재가속이 어렵게 될 수 있기 때문에 이에 대처하기 위하여 경제적이며 운전 측면에서도 유연성을 가질 수 있는 변압기 2차측 접속을 두개의 유니트에 교호접속 (Split Connection)시키는 방식을 채택하고 있다. 다시 말해서 각 변압기가 두 유니트에 교호접속 (Split Connection)시키는 방식을 채택하고 있다. 다시 말해서 각 변압기가 두 유니트에 각각 연결되어 한 유니트가 TA로 모선절환시는 두 변압기가 동시에 한 유니트의 소내부하를 분담하여 주는 셈이 된다. (올진 1,2호기는 선로의 단락용량이 충분하여 교호접속하지 않는다.)

3.3 소내 전원 회로

과거에는 소내 전원 설계에 있어서 독립된 보조발전비를 두거나 디젤발전방식을 썼으며, 그 선택은 소내 전원이 아주 짧은 시간내에 해당 부하에 전력을 재공급할 수 있어야 한다는 점인데 소내전원은 이러한 요구에 맞게 시간내 기동되든가 아니면 소내 전원계통이 보조발전설비처럼 연속운전을 하든가 하는 것이다. EDF는 투자와 운전비에서 아주 비싼 보조 발전설비를 포기하고 가압경수로에서는 기력발전 소나 흑연감속 원자로에서 사용했던 디젤발전기를

신뢰성에 대한 철저한 연구 검토 후 가압경수로의 소내전원으로 선택했다.

4. 소내 보조 기기 분류

소내보조기기에 대한 분류는 보조기기의 기능과 소요 전원수 별로 나누면 3종류가 있다.

첫째는 단일전원부하로, 발전소 운전에 긴요한 부하로서 유니트 정지와 동시에 정지되는 부하들로 냉각재펌프, 터빈발전기 보조기기, 급수펌프, 냉각수 펌프 등이 있으며 이러한 소내부하는 유니트가 기동 정지될 때나 계통에 병입되거나 또는 소내부하운전을 할 때 필히 있어야 할 것들로 단일 전원만을 필요로 하는 부하들로 전체 소내부하의 약 70%를 점하고 있다.

둘째는 이중전원부하로, 이들은 공용설비로, 안전 관련 요구 대신 두개의 공급회로를 요구하는 부하들로서 유니트의 정상운전시와 정지시 필요한 연속운전 부하로, 유니트의 정상운전시 전력 공급은 정상 공급회로로부터 정지시에도 운전을 계속해야 할 경우는 소외전력계통으로부터 보조 공급회로를 경유수전하며 이 분류에 속하는 부하로는 압축공기, 보조냉각, 보조증기, 생수공급 계통 부하와 발전에 직접 관여하지 않는 현장부하로서 조명, 작업용 압축

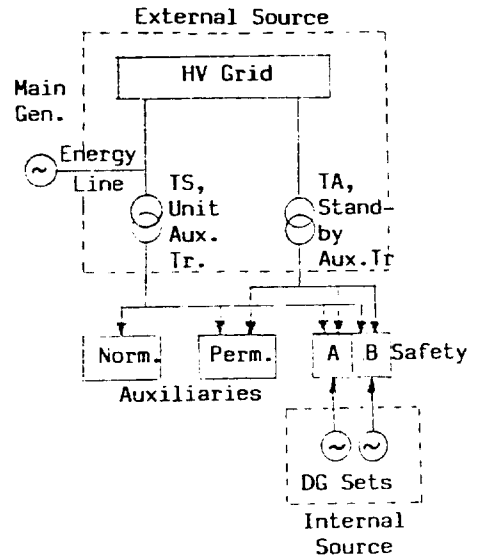


그림 4. 소내전기계통 접속방식

공기, 폐기물처리, 물처리, 행정사무실용 부하등 모두 영구 운전용 부하들로 약 16%를 점하고 있다.

셋째는 안전관련부하 (14%)로, 이들 중 첫째로 몇몇 부하는 유니트 주요설비의 안전을 확보해야하고 이들 부하에는 정상전원 고장시 대체 전원 공급이 지속되어야 하는데 주요부하로는 터빈 발전기의 윤활유펌프, 수소밀봉계통 등이다. 다음은 유니트를 안전하게 정지시키며 (원자로 잔열제거계통), 사고시 비상 부하 (필수기기 냉각수 계통)에 전력을 공급하는 기능으로 환경보존과 인명의 안전을 지킨다. 이들 부하들과 보호회로는 한 기기의 사고로 해당 안전기능이 망가지지 않도록 두개의 독립된 안전트레인 (Safety Train)으로 나눠 단일사고 기준을 맞추고 관련 전기배전 계통설계도 이 기준에 따른다. 이들 부하들은 2개의 소외전원과 2개의 소내전원 (디젤발전기)으로 부터 전력을 공급받는다. (그림 4 참조)

5. 소내 배전망

이상 검토된 내용을 바탕으로 실현된 단선도 (Single Line Diagram)의 개요는 그림5와 같다. GLB를 채택함으로써 모든 보조기기는 기동정지시 400kV 계통으로부터 전력을 공급받는데, 이 방식은 225kV 보조공급계통이 정상적으로 충분한 송전용량이 없을 경우 경제적으로 유리하기 때문에 채택되었다. 이것은 기동시 한 전원에서 다른 전원으로 전환시마다 관련보조기기에 주는 스트레스를 피할 수 있다. 따라서 보조공급계통과 예비변압기(TA)의 역할은 정상, 영구, 안전보조기기의 비상대응 전원으로서 제한된다. 정상공급(TS)에서 보조(TA)공급으로의 모선전환은 저속방식을 채택하고 있다.

이 단선도의 특징은 정상운전부하를 영구운전부하로부터 분리한 것이다. 이 분리는 보조공급회로에 딸린 부하를 가볍게 함으로써 각기 다른 부지 특성에 대한 보조회로 설계에 융통성을 부여하기 위해서이다. 이 전원은 비중요부하의 재기동에 의한 나쁜 영향을 받지 않도록 꼭 필요한 부하에만 국한한다. 이들 단선도의 주요 특징은 방사상구조, 모선자동절환의 간결성, 선택보호 등을 들 수 있다.

—방사상 구조

단선도의 방사상 골격의 선택은 고신뢰성과 경제성

그리고 단순하다는 이유에서이다. 고장은 일반적으로 능동기기(Active Component)와 그들의 접속으로부터 발생될 것이기 때문에 그들의 수를 줄이는 것은 신뢰도를 높이는 것과 직결된다. 배전반 사이의 수평연계(Links) 제거는 변압기 용량과 기기수량을 줄여 비용 절감 효과를 얻는 한편 운전의 제한요소를 줄이고 자동연동장치를 단순화시킬 수 있다.

—모선자동절환장치

배전반 사이의 수평연계 제거외에도 단지 두 차단기 사이에서만 절환이 이루어지도록 모선절환 설계를 단순화시켜 놓고 있다. 이것은 비상모선의 전원선택 절환을 단순처리하기 위하여 하나는 영구부하모선에서 다른 하나는 안전부하모선에서 처리하게 범위를 둘로 하고 명확한 책무를 주어서 운영을 단순 처리케한 것이다.

—선택보호

보호계통은 신뢰성 있는 감지기 사용과 트립식 계단식 선택방식 기준에 맞게 되어 있다. 선택보호는 계단 모양으로 계획된 시간지연을 상향 구간별로 차등을 두며 간격은 보통 0.2초이다. 소내전기기는 전기적 고장에 대해 최고 1초 정도는 견디도록 설계되어 이 선택보호 방식을 뒷받침하고 있다.

소내전기계통을 구성하는 주요 변압기 특성은 다음과 같다.

- 소내변압기(TS) : 24/6.8/6.8kV
58/29/29MVA, Xr=7.8-8.8%
- 예비변압기(TA) : 235/6.8kV
29MVA, Xr=7.8-8.8%

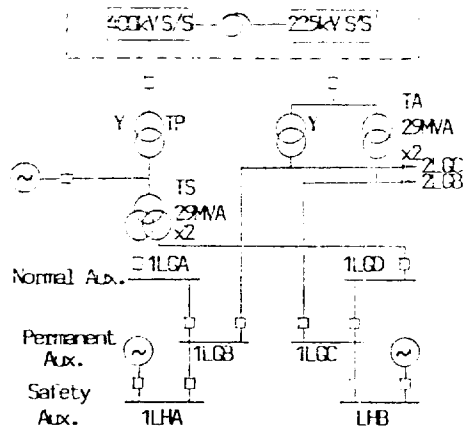


그림 5. 소내 표준배전 개략단선도 (EdF)

저압용 변압기 : 6.6kV/380V

Xr=4.05-4.95%

변압기의 최저리액턴스는 6.6kV 배전망의 단락전류가 40kA(디젤발전기 병결운전을 배제하고)를 넘지않게 선정하며, 이 전류는 전력공급망의 최대 단락 용량과 소내 전동 회전력에 따라 좌우된다. 최대 리액턴스는 한번 최저값이 결정된 다음 제작허용값에 의해 결정되는 값으로 다음의 가상되는 가혹한 가상 환경에서도 보조기기의 재가속을 허용할 수 있도록 한다. 400kV 계통고장인 경우 소내변압기와 발전기에 의해 모든 보조기기는 운전되고 유니트는 소내부하운전을 하게 되는데 TS의 2차측을 두개로 양분하여 소내부하의 운전조건에 부합하게 했으며 정상전력공급 차단기 영구부하와 안전부하의 운전은 예비변압기와 계통전원에 의존하며 이것은 발전소의 비상정지와 공학적 안전설비(ESF)를 기동하는데 필요하다. 한편 TS에서 TA로 모선전환시 저속방식을 채택하고 있어 이를 위해 변압기의 리액턴스 값은 낮게 설계되어 있다.

저압용 변압기 용량은 630KVA 한가지로 허용단락용량이 제한되어 저압전기기기의 차단용량을 줄일 수 있게 되므로 신뢰성을 높이는 효과가 있다.

6. 소내 전기계통의 특징

전술한 프랑스 원전 전기설계의 주요 방향과 미국에서 도입된 기준발전소(영광 3,4호기 포함)와의 기

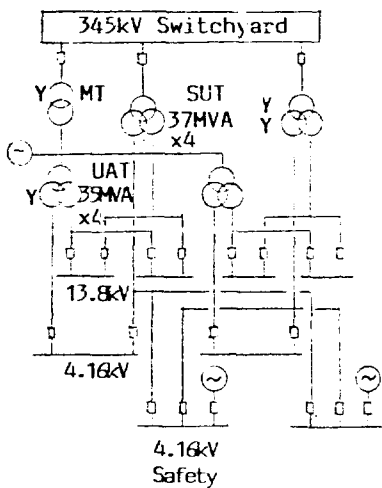


그림 6. 고리, 영광 원전 개략 단선도

술적 차이점을 지면 관계상 표로서 간단히 소개해두고자 한다. 이들 차이점에 대한 이해는 구미 각국의 산업환경, 규모와 경험에 따른 관습에서 오고 있다고 보여진다. 소내 전기계통의 기본 형태는 단선도를 통해 쉽게 감지할 수 있으리라 생각되어 기존호기의 개략 단선도(그림 6)도 함께 신는다.

7. 전력계통 안전분석

프랑스 원자력의 안전성은 기기설계의 기준과 발전소 운전 안전의 초기 평가에 이용되어온 결정론적 방법(Deterministic Methods)에 의하여 검토되어 왔고 이들 안전 기준은 근본적이며 효과적인 것이나 정량화될 수는 없었다. 이를 위해 결정론적 방법 전부를 대체할 수는 없더라도 신뢰도나 가동성 검토, 예상되는 사고의 전개 결정에 이용되고 보다 효과적인 것으로 확증된 확률론적 방법(Probabilistic Methods)을 쓴다.

NSSS공급자인 Framatome은 1972년부터 원전 설계 및 안전 평가에 확률론적 안전도평가(PSA) 기법을 적용하였으며, 두 등급으로 나뉘 Level 1은 설비 전체의 안전도 평가를, Level 2는 기기와 계통의 신뢰-가동-보수성(RAM)을 평가하는 것이다. 이 방식은 예상되는 사고의 영향과 확률이라는 모양으로 정량화가 가능하며 원자료를 구성하는 계통의 신뢰도와 가동성을 알 수 있다. 더구나 이 방식은 안전을 위하여 중요한 계통의 설계로부터 운전까지 안전의 평가에 통일된 규정으로 적용할 수 있게 됐다. 특별히 원전의 전력 공급계통 안전에 대한 설계기준과 계통 신뢰도의 확률론적 분석내용을 소개하려 한다.

7.1 전력 공급계통의 안전기준

프랑스는 안전기준에 있어 10 CFR50 GDC 17,18과 IEEE-308의 요구를 충족시키고 있다. 프랑스는 IEEE-308을 Class IE설비를 위한 전력공급 계통 설계의 가장 적절한 기준 도서로 취급하고 있다. IEEE-308의 주 규제는, Class IE 전력 공급계통은 원전 설계에 있어서 어떠한 기준 사고가 가정되더라도 그의 가능(적정한 전압과 주파수 공급)을 원수할 것을 요구하는 것이다. 이러한 사고로는 자연현상(지진, 홍수, 회오리바람 등) 또는 다른 예측 가능

표 1. 프랑스와 미국의 전기설계기술 차이점 비교

내 용	프랑스(울진원전)	미국(고리, 영광원전)
발전기 기동전원	주변압기(TP)와 소내변압기(TS) 경유하여 수전(GLB개방)	기동용 변압기(SUT) 경유 수전(계통병입 후에 소내변압기 UAT로 모선절환)
변압기 보호	2단 Buchholtz와 Tank to Earth Relay를 조합	비율차동계전 방식
소내변압기 2차측 접속	Delta(비접지)	Wye(저항 접지)
변압기 배치	소내변압기(TS) 3권선×1 예비변압기(TA) 2권선×1	소내변압기(UAT) 3권선×2 기동변압기(SUT) 3권선×2
소내 전압	AC-6.9kV, 480V, DC-230V, 120V, 48V, 30V	-13.8kV, 4.16kV, 480V -250V, 125V
모선절환방식	저속(2초이내) 방식 (TS→TA)	고속 방식(6 Cycle) (UAT→SUT)
회로 개폐기 (Medium Voltage)	750kW 초과시 CB, 750kW까지는 Fuse -Contactor Association 채용	CB 채용

한 사고(화재, 비산물등)가 있으며 기기 고장시의 대응 설계는 단일 사고 기준을 따르고 있다. 소외 전원은 어떤 자연 현상에 의해서 동시에 절단되는 수가 있을수 있으나 안전관련 보조 기기에 공급하는 디젤 발전기는 외부로부터의 사고에 견디게 설계되며 그들의 다중성과 독립성은 단일 기기 고장시 안전을 보증한다. 프랑스 전력 공급계통 전체의 신뢰도에 대한 EdF의 분석은 미국 원전 건설에 일반적으로 적용했던 접근 개념에 필적한다고 보고 있다. 미국의 발전소는 일반적으로 발전기와 주변압기 사이에 발전기 개폐 장치를 설치하지 않는 경향이며, 일반적으로 소내 부하운전을 배려하고 있지 않다.

그러나 프랑스는 그들의 계통 여건을 고려 원전의 소내 부하운전 가능성과 발전기 부하 차단기 채택을 고려해 놓고 있다.

7.2 계통 신뢰도의 확률론적 분석

일반 설계 원칙은 ANSI N18-2(Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary PWR Plant)에 설명되어 있으며, 이들의 목표는 그들 확률에 따라 여러가지 사고를 분류하고 또 사고의 각 등급에 대

해 최대 허용영향을 정의함으로써 한 프로젝트에 전반적으로 적용할 일관된 기준을 얻는다.

소외 전력 계통에는 적용하지 않으나 발전소 특정 기기의 설계를 위한 가정으로 지진과 허리케인이 고려된다. 이러한 자연현상으로 한 발전소에 있는 모든 유니트의 두개의 소외 전원을 잃을 수 있다. 소내 부하운전 가능성을 배제하고라도 이들 가정하에서 발전소의 안전은 두개의 독립된 다중 계통에 의존하게 된다. 이들 각각의 계통은 기본적으로 디젤 발전기, 6.6KV모선과 안전 전동부하들로 구성된다. 이들 설비는 노심의 잔열제거와 발전소의 보호를 보장하게 된다. 두개의 소내 전원 상실 확률은 2대의 디젤 발전기를 운전하는 일주일간 약 10^{-2} 로 제한해 두고 있다. 그러나 이 확률은 며칠동안 2개의 소외 전원의 상실 가능성과 관련해서 생각해야 하며, 그 가능성은 무시할만한 것이다.

첫째로 발전소는 2개의 독립된 송전선로로 계통의 400kV 접속점(Node)과 225kV노드에 연계되어 있는데 철탑 파괴등과 같은 중대한 국부 손상이 송전선로에 가해진 경우 임시공급은 수일 이내에 회복될 수 있고,

둘째로 몇개의 400/225kV 단권 변압기를 통해

400kV노드에 접속된 225kV 보조공급회로가 400kV 노드의 파괴로 동시고장을 유발할 가능성도 적절한 계통 구상과 계통보호 설계로 해서 그 가능성은 대단히 미미한 것이다.

발전소에 따라서 동일 송전선 통로에 있는 두 선로의 상실과 같은 공통 유형고장이나 전력 생산과 수요 사이의 평형을 되찾기 위한 부하 차단계획과 고장 지역을 제한시키기 위한 회로 트립 계획등의 예방 조치에도 불구하고 계통의 지역적 고장 가능성 같은 흔치 않은 경우라도 소외 전력 공급의 결핍이 몇시간 동안 지속되지 않도록 하며, 계통의 일반적 고장에 대한 프랑스 전력 계통의 복구 원칙은 원자력 발전소에의 전력공급을 우선하며 한시간 이내에 회복될 것으로 보고 있다.

또다른 요인으로 상정 가능한 외부 고장과 함께 변압기, 차단기, 모선 또는 케이블등에 의한 발전소의 고장이 2개의 소외전원 상실을 유도할 수 있다. 현존하는 경험 자료에 의하면 이런 고장의 확률은 2×10^{-3} /년이고 이것은 변압기등의 기기를 수리하는데 며칠이 소요되더라도 며칠 정도의 장기 정전의 확률은 매우 적게 보고 있다.

예상되는 다른 유형의 전원 상실은 400KV 정상 공급회로 상실시 모선 절환후 225KV계통으로부터 보조기기를 운전할 수 없는 경우로, 개폐기구의 기능장애 또는 225KV계통의 단락용량 부족에 기인할 수 있다. 이때 2개의 소외전원 상실 확률은 2×10^{-3} /년(발전소의 전체 전원상실 기준 확률은 약 10^{-6} - 10^{-7} /RY)으로 이러한 사고의 경우 안전관련 보조기기에 전력 공급을 위해 225KV 보조 공급회로의 회복이 신속히 요구되고 있다.

이러한 상정 사고에도 불구하고, 원자력 발전소는 안전 관련 전기 구동 보조기구의 즉각적인 기동과 연속 운전을 필요로 하는 사고의 가능성을 제거하거나 감소하도록 원자로의 저온 정지와 같은 특별조치(Reg. Guide 1.93)를 사전에 취함으로써 한 소외 전력 공급상실(어느 계통구성요소도 장기간 운전불능)로 인한 심각한 영향의 파급 확률을 감소시키며, 열 사이폰에 의한 원자로 냉각 작용에 의존하여 심각한 영향없이도 소내외 전원의 재공급 시간을 1시간에서 20시간까지 지연시킬 수 있는 별도의 방편이 모색될 수 있을 것으로 보고 있다. 한편 전원의 다중 중복 설계에도 불구하고 원자력 발전소의 만일의 정전

(Station Blackout)에 대응하는 또다른 수단으로써 긴요한 설비의 보강 또는 대체 전원설비 추가 등이 고려될 전망이다.

8. 품질보증

본고에서 채택된 설계개념이나 기술의 품질이 어떠한 가동성(Availibility)과 안전에는 사용된 여러 기기가 충분히 신뢰할만 한지가 중요하다. 이러한 사실 때문에 EdF는 기기의 품질 요건을 명시하거나, 그들이 기술사양에 만족하는지 점검하거나, 적절한 유지보수와 주기적 시험점검 등의 수단을 통하여 계통의 신뢰성을 계속적으로 보장하려는 장치를 한다.

기술사양서는 다음 두가지 시험 형식을 요구하는데, 첫째는 초기 설계의 시제 기기에 대해 수행되는 품질 검증시험과 둘째는 제작 완성된 기기가 초기 설계내용과 같은 품질인지를 보증하는 제반 인수시험이다. 시험사양서를 수립하고 그와 관련된 제반시험 집행은 제작자 공장에서, 또는 EdF 시험 시설에서, 그리고 EdF현장에서 각각 수행되고 또 디젤발전기는 EdF 시험 설비에서 체계적으로 시험하는 등 EdF는 기기의 품질을 보증하기 위해 제반 시험에다 중점을 두고 있는 것이다.

전기 공급계통에서 디젤 발전기와 같은 전기기기의 트립 회로나 재기동 회로와 같은 제어회로의 일부는 유니트가 정상 운전시는 쉬고 있다. 그래서 이들의 고장 위험을 줄이기 위한 주기 시험의 성격과 빈도를 정의하는 것이 필요하며, 이를 최적화하기 위해 확률론적 검토를 한다.

9. 맺는말

울진 원자력 1,2호기 건설참여를 계기로 세계 제2위의 원전 보유국인 프랑스의 원전건설기술이 미국의 가압경수로(웨스팅하우스) 설계로 시작했음에도 기존의 미국 기술과 많은 차이점이 있음과, 기술의 상대적 평가국으로서도 손색이 없음을 지적하고 싶다. 궁극적으로 이들 기술의 적용실상과 경험의 차이는 나뉠대로 인정이 되는 부분이며, 우리는 우리 고유의 한국적인 기술 관행을 세워 발전시켜 나아가야 할 처지에 있다고 본다.

본고에서는 프랑스 원전 전기계통의 설계개념과 안전성의 실상을 빌려서 원전의 안전성에 접근하는 전기설계의 일면을 보이려고 시도했으며 이를 통하여 전기 설계의 역할에 대한 구체적 이해가 다소나마 되어 전기 에너지를 원자력에서 구하려는 원자력 이용에 관한 국민적 합의를 생각하는데 일조가 되기를 바란다.

결론적으로, 원전의 전기설계는 원전 소내 보조기기에 전원을 확보하기 위해 첫째는 계통으로 부터 독립된 2개 회로와 둘째는 유니트 당 2대의 소내전원으로 구성한다. 이에 더하여 계통 고장시 보조기기의 전원을 주발전기로 부터 수전하는 소내부하 운전을 가능케 해두고 있다.

또한 안전 기준으로 검토된 단일사고 기준과 공통 유형고장 기준에 대한 대응설계로서 다중성과 독립성이 강조되었고 이러한 적절한 설계에도 불구하고 궁극적으로 인명의 손상방지와 기기의 안전성 유지를 위한 원전의 신뢰는 능동기기(Active Component)에 의존하게 되므로 기기의 성능검증(equipment qualification) 활동이 필연적으로 뒷받침 되고 있다.

한편 이러한 기술들을 도입하는 설계 과정은 완전 절차화되어 철저한 품질관리하에 진행되며 과거 원전운전 경험에서 교훈이 되는 사례와 운전편의를 위한 사안들이 일일이 검토되고 설계에 반영됨으로써 원전설계 도입 과정에서도 신뢰성을 높여가는 노력은 계속되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Sources auxiliaires pour centrales experience et pratiques adoptees par les diverses Compagnies dans les pays representés, CIGRE, 1978.
- [2] Sécurité de l'alimentation électrique des auxiliaires des centrales nucléaires, C. Hermant/J.P. Baloulin, EdF-1978.
- [3] Les méthodes probabilistes appliquées a des problèmes de sources électriques en sûreté nucléaire, A. Carnino, CEA/M. LLory, EdF-1979.
- [4] Evolution récente du materiel dans les installations industrielles, Association contacteurs-fusibles, RGE -October 1978.