

FTA 기법에 의한 원전기동전원의 이용률 예측에 관한 연구

論 文
48A-5-5

A Study on the Availability Prediction of Start-up Power Supply in Nuclear Power Plant by FTA Method

崔圭植*
(Che Gyu Shik)

Abstract - The Start-up transformers or on-site stand-by transformers are installed for the start-up and shut-down of generator and emergency status in nuclear power plant. The on-site power supply configuration using these transformers must be determined by considering configuration requirements, site characteristics, reliability and availability severely because it is remarkably important for safety and benefit of plant.

The start-up or stand-by power supply configuration has been determined considering only safety requirements and construction cost up to now in Korea.

I study various reliability estimating methods for the prediction of availability, and estimate the unavailability for the start-up power supply system of two 1,000MW nuclear power plants. I also determine the reliability and unavailability of equipment, system and configuration using FTA method.

Key words : FTA, ETA, FMEA, reliability, unavailability, start-up transformer, minimal cut-set

1. 서론

원자력발전소에는 발전기의 기동, 정지, 운전 및 보수 등에 필요한 소내전원을 공급하기 위하여 소내보조변압기와 기동변압기 또는 소내대기변압기를 설치하여 운영하고 있다. 이러한 소내전원계통의 구성은 발전소의 경제성과 안전성면에서 중요한 문제이기 때문에 발전소 건설계획이 수립되면 소내보조변압기와 기동변압기의 대수 및 구성방식에 대하여 검토하게 된다. 기동전원계통은 발전소의 건설과 관련된 송전선로의 구성요건, 부지특성, 선행기의 기동전원구성방법 등을 고려하여 구성되어야 하므로 지금까지는 비교적 부지특성에 적합한 소내전원계통을 연구하였다. 즉, 부지특성을 고려한 여러 가지 실현가능한 구성방식을 제시하여 단락전류와 전압강하의 입장에서 기술적인 문제점을 검토하고 그 다음에 초기투자비라 할 수 있는 건설공사비를 비교하여 최적안을 결정하였다.[1-5] 상기 연구에서 최적으로 제시된 안은 부지특성의 영향을 많이 받으므로 어느 발전소에도 공통적으로 적용되는 통일성 있는 결론이라고는 할 수 없으며, 소내전원계통의 이용률능도에 따른 발전대체비를 고려하지 않았기 때문에 발전소 전 수명기간동안의 총 경비를 감안한 경제성분석이 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 발전소의 소내전원구성이 전력계통에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 기동전원의 계통구성에 중점을 두고 소내보조변압기, 기동변압기 또는 소내대기변압기, 주요 고압소내모선 등의 신뢰성과 이 설비들이 시스

템을 구성했을 경우의 이용률능도를 평가하여 발전소 소내전원의 적정구성방안을 연구한다.

연구방법으로는 지금까지 제시된 각종 신뢰성기법을 고찰하고, 원자력발전소의 설비에 적용하기 위한 이용률기법을 모색하여 적절한 안을 선택한다. 현재 우리 나라에서 운전중이거나 건설중인 1,000MW급 원자력발전소의 소내전원구성현황을 조사하여 각종 인허가요건, 기술기준 및 기술규격에 부합하는 안으로서 표준안으로 연구된 안을 제시한다. 제시된 안에 대해서 신뢰성과 이용률능도를 산출한다.

2 장에서는 현재 우리 나라에서 건설중이거나 운전중인 원전 기동전원의 현황을 조사하여 우리 나라의 표준원전을 감안한 기동전원으로서 채택 가능한 안을 제시한다. 3 장에서는 단위설비나 시스템의 신뢰성 및 이용률을 평가할 수 있는 기법들을 기술하고 본 연구에서 채택하고자 하는 배전 이용률능도의 평가법으로서 FTA 기법을 실증적으로 연구한다. 4 장에서는 FTA 기법을 이용하여 제시된 안에 대한 배전 이용률능도를 구한다. 5 장에서는 제시된 기동전원 구성안의 이용률능도에 대한 결론을 맺는다.

2. 소내전원의 구성방식

2.1 현황

우리 나라의 PWR형 원자력발전소 중 고리원자력 2호기, 월성원자력 1~4호기 및 울진원자력 1, 2호기에서 발전기 1기당 1대의 소내대기변압기를 보유하고 기타 원전에서는 모두 발전기 1기당 2대의 기동변압기 또는 소내대기변압기를 보유하고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 상당기간 지속될 것으로 전망된다. 월성 1~4호기는 CANDU형으로서 고리 2호기나 울진 1, 2호기와 유사한 방식을 취하고 있으나, GCB나

*正 會 員 : 建陽大 情報電子通信工學部 副教授
接受日字 : 1998年 12月 1日
最終完了 : 1999年 3月 15日

GLBS가 없다는 것이 다르다. 고리원자력 2호기와 울진원자력 1, 2호기에서는 1기당 1대의 소내대기변압기를 보유하고 있는 대신 발전기부하차단개폐기(GLBS ; Generator Load Break Switch))를 설치하여 2개의 소외전원을 확보하고 있으며, 울진원자력 3, 4호기와 영광원자력 5, 6호기에서는 발전기차단기(GCB : Generator Circuit Breaker)를 설치하였음에도 불구하고 안전급 고압모선계열(division)에의 예비소외전원공급의 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 2대의 소내대기변압기를 설치하고 있다. 이상의 내용을 요약한 것이 표 2.1에 나타나 있다. 고리원자력 1, 2호기 및 월성원자력 1호기를 제외한 기타 원자력발전소의 기동변압기의 고압측 정격전압은 345kV이다.

표 2.1 변압기의 설치 현황(발전기 1기 기준)

Table 2.1 Trasformer installing status

경우	소내보조	소내대기	GCB	적용예	비고
1	2	2	×	고리1, 고리3,4, 영광1~4	
2	2	2	○	영광5,6, 울진 3,4	GCB
3	1	1	○	고리2, 울진 1,2	GLBS
4	1	1	×	월성1~4	CANDU

2.2 전원구성방식 및 변압기의 용량 선정

본 연구에서 제시하는 안은 그림 2.1과 같은 안으로서 이 안에 대해서 신뢰성 및 이용율을 연구하고자 한다. 표 2.1에서 보인 바와 같은 모든 구성방식이 원자력 안전성에 대한 10CFR50 부록 A의 일반설계기준[6] 및 IEEE765[7] 등 모든 안전성 규정에 적합하지만, 우리나라에 고리 1호기가 도입된 이래 오랜 설계, 건설 및 운전 경험을 통하여 가장 적합한 안으로 결정된 그림2.1의 경우를 선정하였으며, 이것은 최근의 기술발전 및 강화되는 안전성 기준에 맞도록 설계된 안이다.

이 안은 발전기차단기가 있으며, 소내보조변압기를 발전기 1기당 2대씩으로 하고 소내대기변압기를 1기당 2대씩 구성하여 평상시에는 대기상태로 있다가 주발전계통 이상시 안전급모선계열(division)과 비안전급 모선에 2대의 소내대기변압기를 통하여 예비소외전력을 공급하는 방안으로서, 우리나라에 건설되는 표준원자력발전소에서 채택된 안이다. 이는 표 2.1의 경우 2에 해당하는 안으로서 적용 예로서는 최근에 설계, 건설되고 있는 울진원자력 3, 4호기, 영광원자력 5, 6호기 및 후속호기이다. 이 안을 중심으로 신뢰성을 연구하고 경우 1이나 경우 3의 내용과 비교하면서 고찰하고자 한다. 경우 1은 발전기차단기가 없으며, 소내보조변압기를 발전기 1기당 2 대씩으로 하고 기동변압기를 발전기 1기당 2 대씩 구성하여 기동시에는 기동전원으로 활용하고 정상운전시에는 안전급고압모선계열(division)에 상호독립된 우선전력을 공급하는 방안이다. 적용 예로서는 고리원자력 3, 4호기, 영광원자력 1~4호기를 들 수 있다. 경우 3은 발전기차단기가 있으며, 소내보조변압기를 1기당 2대씩으로 하고

소내대기변압기를 1기당 1대씩 구성하여 평상시에는 대기상태에 있다가 주발전계통 이상시 안전급모선과 비안전급모선에 1대의 소내대기변압기를 통하여 예비소외전력을 공급하는 방안이다. 적용 예로는 고리원자력 2호기, 울진원자력 1, 2호기를 들 수 있다.

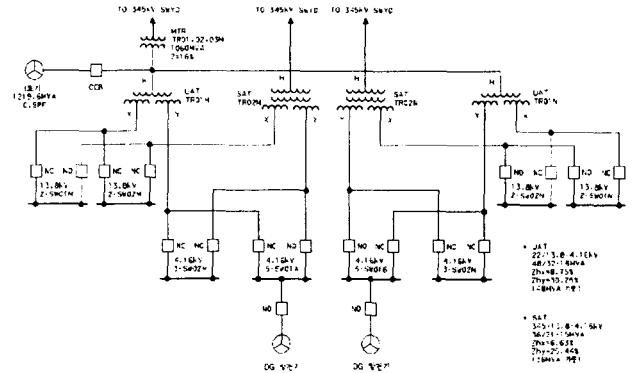


그림 2.1 원자력발전 기동전원 구성
Fig. 2.1 start-up power supply config.

소내보조변압기 용량으로서 정격은 22kV권선 : 48/64 MVA, 14.49kV권선 : 32/42.7 MVA, 4.47kV권선 : 16/21.3 MVA OA/FA 55°C이고, %임피던스는 Z_{hx}=8.75%, Z_{hy}=30.25%, Z_{hz}=39.00% 48 MVA 기준이다. 기동변압기 용량으로서 정격은 345kV권선 : 36/48 MVA, 13.8kV권선 : 21/28 MVA, 4.16kV권선 : 15/20 MVA OA/FA 55°C이고, % 임피던스는 Z_{hx}=6.63%, Z_{hy}=25.44%, Z_{hz}=32.07% 36 MVA 기준이다.

3. 신뢰성 평가기법

3.1 하드웨어의 신뢰성

신뢰성이라는 것은 예를 들어 하드웨어 즉, 설비가 규정된 환경조건하에서 규정된 시간동안 고장 없이 기능을 수행할 확률을 의미한다. 신뢰성은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t z(x) dx\right) \tag{3.1}$$

여기에서 R(t)는 시간 t에서의 신뢰성이고, z(x)는 하드웨어의 고장율로서 x 시간까지 고장이 나지 않은 상태에서 x에서 x+dx 시간 사이에 고장이 일어날 확률이다.

또한, 고장이 발생되면 고장을 수리해야 하기 때문에 고장간 평균시간(Mean Time Between Failure ; MTBF)을 아래와 같이 정의한다.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \tag{3.2}$$

이것도 신뢰성을 평가하는 중요한 척도중의 하나이다. 하드웨어가 정상적으로 운전되는 운전사이클기간에서 설비의 고장이 일정하게 발생된다고 보기 때문에 고장율 z(x)가 일정한 상수 λ라고 가정할 수가 있다. 이 때 위의 두 식은

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{3.3}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \tag{3.4}$$

와 같이 단순화된다.

3.2 고장수목법(Fault Tree Analysis ; FTA)

부품이나 설비, 시스템 단위가 될 복잡할 때는 상기 항에서 제시한 신뢰성이나 이용율을 이용하여 단편적으로 원하는 바를 이룰 수 있다. 그러나, 최근의 복잡한 시스템, 장치 예를 들면 원자력설비, 석유설비 등의 신뢰성과 안전성을 강하게 확보해야 하는 분야에서는 예측적으로 그 위험도를 알고 사전에 대책을 세워야만 한다. 이러한 경우에 전통적인 고장률의 예측이나 열화고장의 예측분야에 대해 각종 예측 방법이 고려되고 있다. 플랜트와 같이 여러 시스템이 복잡하게 얽히게 되면 직병렬관계가 발생되고 각 부품이나 설비의 신뢰성과 수리 시간이 제각각일 뿐더러, 보수나 시험운전, 대기상태 등도 고려해야 하기 때문에 각각에 대해서 구한 신뢰성이나 이용율의 값을 산술적으로 가감승제하여 전체의 신뢰성이나 이용율을 구한다는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 따라서, 이러한 복잡한 시스템에서의 신뢰성이나 이용율 또는 논리관계를 구하기 위해서 FTA 기법을 도입하게 된다.

설비나 시스템의 신뢰성과 이용율(또는 이용률)을 평가하기 위한 방법은 Bayesian 기법, Markov 기법을 비롯한 여러 가지가 있으며, 고장율이나 고장간 시간을 예측하기 위한 각종 방법들도 많이 등장하였다[8]. 또한, 이러한 기법들을 이용하여 설비나 시스템, 그리고 최근에는 S/W의 신뢰성을 평가하기 위한 기법들도 수없이 연구되고 있다[9-14].

이러한 것을 대별하면 정량적 해석법(확률, 고장률 등을 구해 평가하는 방법, 예를 들면 FTA), 정성적 해석법(상대적으로 위험성이 큰 곳, 지명도가 높은 것을 보여주는 것, 예를 들면 FMEA)에서 알 수 있다. 또, 해석 방향으로 시스템 고장의 원인측에서 반대로 결과쪽으로 해석하는 귀납적 방법과 이것과 반대로 시스템의 고장이나 불안전을 해석하여 원인에서 top down 방식으로 해석하는 연역적 방법의 2가지가 있다. 본 연구에서는 원자력분야에서 원자력의 안전성을 평가하기 위해 도입되는 FTA 기법 및 ETA 기법에 대해 고찰해보기로 한다.

○ FTA(Fault Tree Analysis)기법

직병렬계에 있어서 직렬의 경우에는 요소의 어느 것인가(OR)가 고장나면 고장이라 하고, 병렬의 경우에는 요소의 전부가 동시에(AND) 고장나면 고장이라 한다. 이들은 각각 OR방법, AND방법을 써서 계(전체)와 요소(부분)의 고장이 어떠한 논리(logic)로 결부되어 있는가를 고장수목(Fault Tree)으로 표현할 수 있다. FTA(고장수목해석)는 전체 시스템이 이용불능일 경우를 논리적으로 찾아내고 그 확률을 산출할 뿐더러, 전체 시스템의 건전성을 유지하기 위해서 어떠한 설비나 시스템 또는 논리를 어떻게 개선해야 할 것인가를 평가하는 강력한 도구라고 할 수 있다. 바람직하지 못한 상태나 불안정을 기본으로 하는 고장모드까지 이론적으로 해석하는 기법이다. 여기에서는 전후좌우의 논리관계를 도표로 그리고 Bool 대수를 이용하는 것이 필수적이다. 사실과 현상이 복잡한 경우에 인과(논리)관계를 알기 쉽다는

장점도 있다. 그러나, 논리를 세우고 계산하는 것이 시간도 오래 걸리고 쉽지 않다. 따라서, 이 가운데 최소단절집합(적어도 그것이 확보되지 않으면 시스템고장을 유발하는 중요부분)을 추출하고 수목을 간략화하지 않으면 안된다. 또 시간적인 사실과 현상의 연쇄를 보기 위해서는 ETA 결과도(consequence chart)에 의한 해석이 필요할 수도 있다.

예를 들어 어떤 실내에 2개의 전구가 동력선, 퓨즈를 거쳐 전력을 받아 실내를 밝히고 있을 때, "실내가 전부 어둡게 되는 현상"을 FTA 기법으로 해석해보기로 하면 그림 3.1과 같이 된다.

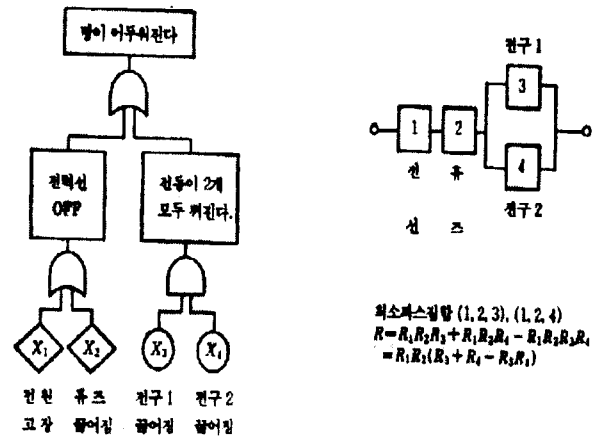


그림 3.1 FTA 논리도의 예[9]
 Fig. 3.1 example of FTA logic diagram

FTA 기법에서 자주, 그리고 유용하게 사용되는 논리는 일반적으로 우리가 사용하는 맥동률, 가법교환률, 승법교환률 등을 사용하여 계산을 단순화시켜 나간다.

○ ETA(Event Tree Analysis) 기법

사상과 현상의 수목해석(ETA)은 고장이나 불안전사상의 고리가 되는 사상을 출발점으로 시간을 갖고 사상이 어떻게 진전되고 최종상태에 도달하는지를 수목상에 전개하는 일종의 시계열적 해석법이다.

그림 3.2는 파이프에서 가연물이 새고, 어떠한 원인으로 스파크가 일어 점화하여 소화에 실패하고 최종적으로 탈출할 수 없는 사고가 된다는 과정을 해석한 것이다. 따라서, 고장이나 불안전사상을 일으킨 경우에는 이 연쇄를 끊으면 된다.

먼저, 사상을 ETA로 전개하고 여기에서 발견된 특정사상의 발생확률은 FTA로 구하는 등 다른 방법과 결합한다. 특히 ETA의 사실과 현상사이를 논리게이트로 묶는 방법도 있다. 예를 들면 가연물이 새고 더욱 더 큰 에너지를 갖는 스파크가 일어날 때 점화되므로 양자는 AND게이트를 끼워서 점화하는 사상에 결부된다는 것처럼 결합하는 방법도 있다. FTA와 이같은 논리게이트를 가진 ETA를 함께 한 것을 원인-결과도(Cause-consequence chart)라고 부른다. 원인도쪽은 FTA이고 결과도쪽은 원인에서 결과로의 결부를 경시적인 논리호로 나타낸 것으로 예를 들면 방지기구가 고장난 때 이상발생에 이르는 몇 개의 사상과정을 가리킨다. 이 양자에서 원인과 결과가 명확해진다.

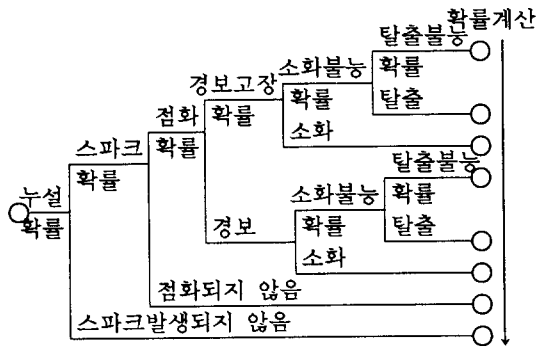


그림 3.2 ETA의 예[7]
Fig. 3.2 example of ETA

○ FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)

신뢰성(유지보수)설계의 하나의 방법으로서 고장이나 실수가 일어날 때 그것이 시스템이나 장치(software)의 신뢰성과 안전성에 어떠한 영향을 미칠까를 해석하고 필요한 수단을 사용하는 방법이다. 이러한 반대적인 방법중의 하나가 FMEA(고장모드영향분석)이고, 정량적이기보다는 정성적인 방법에 속한다. 특히 영향의 치명도를 중시한 것을 FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)라 부르고 있다. FMEA를 반영한 것으로는 에러모드(error mode), 소프트웨어고장모드에 대한 것이나 안전성의 위험원 해석(Hazard Analysis)이 있고, 설계 뿐만 아니라 공정, 시험, 유지보수 등에 이용된다.

이 외에도 이용율을 이용[6]하는 방법이 있어서 $t=0$ 인 시각에 동작중인 설비나 시스템이 어떤 시각 t 에서 동작조건에 있을 확률을 계산할 수도 있는데, 엄격하게 말하면 가동율이라고 해야 할 것이다. 시각 t 에서 동작조건에 있기 위해서는 설비나 시스템이 고장상태이면 안되며, 고장 나 있었다면 반드시 수리된 상태로 있어야 한다. 따라서, 이용율이란 신뢰성과 보수성 모두를 포함하는 의미가 된다. 이용율에도 여러 가지 기법이 있으나, 이러한 이용율 평가기법 중에서 플랜트의 이용율을 산정할 때 일반적으로 많이 쓰이는 기법은 고유이용율이다.

3.3 이용율 기법[8]

이용율이라는 말은 $t=0$ 인 시각에 동작중인 기기나 시스템이 어떤 시각 t 에서 동작조건에 있을 확률을 지시하는 것을 말하며, 엄격하게 말하면 가동율이라고 해야 할 것이다.

시각 t 에서 동작조건에 있기 위해서는 기기나 시스템이 고장상태이면 안되며, 고장 나 있었다면 반드시 수리된 상태로 있어야 한다. 따라서, 이용율이란 신뢰성과 보수성 모두를 포함하는 의미가 된다.

○ 순간이용율 $A(t)$: 임의의 시각 t 에서 시스템이 동작중일 확률이다. 이것은 시스템의 기대운전시간이다.

$$A(t) = E[z(t)] \tag{3.5}$$

여기서, $z(t)$ 는 아래와 같이 정의되는 지시기변수이다.

$$z(t) = \begin{cases} 0 : \text{시각 } t \text{에서 시스템이 운전상태} \\ 1 : \text{시각 } t \text{에서 시스템이 고장상태} \end{cases}$$

따라서, 식(3.5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$A(t) = (1)P[z(t)=0] + (0)P[z(t)=1] = P[z(t)=0] \tag{3.6}$$

○ 평균운전이용율 $A(T)$: 주어진 간격(0, T)에서 시스템이 사용가능한 기간의 시간비율을 말한다.

$$A(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \tag{3.7}$$

○ 정상상태 이용율 $A(\infty)$: 시간간격이 매우 큰 범위에서 시스템이 운전중일 확률을 말한다.

$$A(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} A(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \tag{3.8}$$

○ 고유이용율 A_i : 교정 보수 정지시간만을 고려하며, 준비시간, 예방보수정지시간, 공급시간 및 대기정지시간을 제외한 시스템이 운전중인 시간의 비율을 의미한다.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{3.9}$$

여기서, $MTBF$: 고장간 평균시간
 $MTTR$: 평균수리시간이다.

○ 취득이용율 A_a : 고장보수 및 예방보수정지시간을 고려하며, 준비시간, 공급시간, 대기정지시간을 제외한 시스템이 운전중인 시간의 비율을 말한다.

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + M} \tag{3.10}$$

여기서, $MTBM$: 유지보수 사이의 평균시간

M : 분해 및 예방보수 행위에 의한 평균보수정지시간

○ 운전이용율 A_o : 준비시간, 공급시간, 교정 및 보수정지에 따른 대기시간을 고려한 시스템이 운전중인 시간의 비율을 말한다.

$$A_o = \frac{MTBF + \text{준비시간}}{MTBF + \text{준비시간} + MDT} \tag{3.11}$$

여기서, 준비시간 : 운전사이클- $MTBF$ - MDT ,

MDT : 평균정지시간= M +공급 및 행정관리 요인에 의한 지연시간이다.

이상의 각종 이용율 평가기법 중에서 플랜트의 이용율을 산정할 때 일반적으로 많이 쓰이는 기법은 고유이용율 A_i 이다. 따라서, 본 연구에서는 이용율을 계산할 때, 식(3.9)를 이용하고, 이용불능도는 이의 보수를 취한다. 즉,

$$\bar{A} = 1 - A_i \tag{3.12}$$

이다. 그리고

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \tag{3.13}$$

인 관계를 이용해서 고장간 평균시간을 구한다.

4. 대상 시스템의 신뢰성

4.1. 적용 데이터

발전소가 정상운전중일 때는 고장율이 거의 일정하므로 이것을 상수로 보았으며, "원자력발전소의 표준화설계를 위한 조사용역-발전소 정전방지 검토"[15]와 "영광1,2호기 확률론적 안전성평가용역"[16]의 최종보고서로부터 필요한 데이터를 인용하여 활용하였고 그 내용은 표 4.1에 수록한 바와 같다. 따라서, 신뢰성을 계산할 때 식(3.3)을 적용한다.

표 4.1 기기별 평균이용불능도

Table 4.1 mean unavailability for each equipment

고장 내용	평균고장율 (회/d,회/h)	MTTF (h/회)	이용불능도
소외전원 고장	1.00E-005회/h	4	4.00E-005
주발전기 고장	1.80E-007회/h	36	6.48E-006
주변압기 고장	2.40E-007회/h	36	8.64E-006
기동/대기변압기 고장	1.03E-006회/h	36	3.71E-005
소내보조변압기 고장	3.40E-007회/h	36	1.22E-005
발전기차단기의 차단 실패	8.39E-004회/d	10	8.39E-004회/d
차단기의 차단 실패	3.01E-004회/d	12	3.01E-004회/d
차단기의 투입 실패	8.39E-004회/d	12	8.39E-004회/d
차단기의 오동작 개방	1.80E-006회/d	12	2.16E-005
345kV 케이블 고장	2.15E-006회/h	16	3.44E-005
154kV 케이블 고장	2.15E-006회/h	16	3.44E-005
6.9kV 케이블 고장	8.80E-006회/h	8	7.04E-005
상분리모선 고장	1.64E-006회/h	9.5	1.56E-005
비상분리모선 고장	4.98E-007회/h	24	1.20E-005
모선 사고	1.94E-007회/h	26.8	5.20E-006

표 4.1의 번호부여체계는 아래와 같다.

E K ----- B S ----- Y ----- 0 1 S A ×

① ② ③ ④

여기서,

① : 전압구분, ② : 설비명약어, ③ : 고장의 종류, ④ : 일련번호이다.

4.2 배전이용불능도 검토대상조건

배전이용불능도를 계산하기 위하여 여러 경우를 검토하여 표 4.2에 표시한 경우를 연구대상으로 하였다.

표 4.2 배전이용불능도 조건

Table 4.2 unavailability conditions

구분	정상운전시	기동시	소내보조변압기 고장중	
			모선 1개 정전	모선 2개 정전
주발전기	정상	정지	정상	정상
보조변압기	정상	정상	고장	고장
비상발전기	해당없음	해당없음	해당없음	해당없음
소내운전	고려	고려	고려	고려
정점사상	4.16kV 안전급	4.16kV 안전급	4.16kV 안전급	4.16kV 안전급
	모선 A의 전원상실	모선 A의 전원상실	모선 A의 전원상실	모선 A,B의 전원상실

4.3 고장수목모델

앞에서 언급한 고장수목분석(FTA)기법을 사용하여 논리도를 작성하였으며, 그 내용을 그림 4.1에 나타내었다. 고장

수목모델은 4.16kV 모선에서의 전압상실을 정점사상으로 하였으며, 제안한 안을 중심으로 표 2.1의 각 경우와 상대적으로 비교하는 것이 목적이므로 안에 공통적으로 적용되는 사항은 고장수목에 표시하지 않았다. 고장수목은 소내부하모선에 전력공급지장을 초래할 중요한 사상만을 표시하였다. 즉, 차단기의 투입 또는 차단실패, 차단기의 오동작 개방, 변압기(주변압기, 기동/대기변압기와 소내보조변압기)의 고장, 케이블고장, 상분리모선 및 비상분리모선의 고장, 발전기 고장, 소외전원상실 등을 고려하였다.

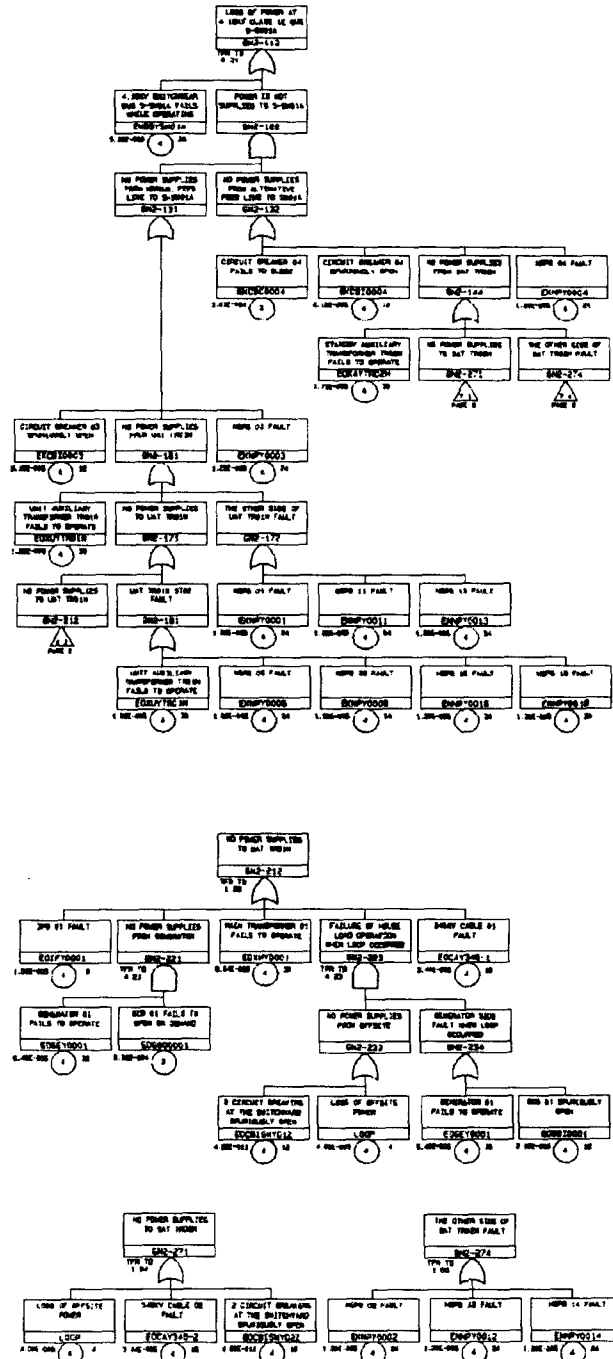


그림 4.1 원자력발전소 소내전원 고장수목 Fig. 4.1 FTA of on-site power supply in NPP

4.4 소내부하모선에서의 최소단절집합

정상운전중 소내전원을 공급받지 못할 배전이용불능도에 관한 최소단절집합을 표 4.3에 나타내었으며, 이 표의 순위 3을 예로 들면 최소단절집합의 이용불능도는 $EKCBC0004 \times EKCB10003=6.50E-09$ 와 같고, 정점게이트 GF2-112 즉, 4.16 kV 모선에서의 이용불능도는 $5.30E-06$ 이다.

여기서, 최소단절집합이란 그 부품의 집합을 시스템에서 제거했을 때 연구하고자 하는 부하점의 연속성이 상실되며, 그 자신이 시스템 단절집합이 되는 어떠한 부품집합도 부속 집합으로 포함하지 않는 집합[17]을 말한다.

표 4.3 4.16kV 안전급모선의 최소단절집합
Table 4.3 minimal cut-set on 4.16kV safety bus

순위	이용불능도	최소단절집합	
1	5.20E-06	EKBSYSW01A	
2	1.04E-08	EOCAY345-1	EKCBC0004
3	6.50E-09	EKCBC0004	EKCB10003
4	4.70E-09	EOIPY0001	EKCBC0004
5	3.67E-09	EOXUYTR01M	EKCBC0004
6	3.61E-09	EOXUYTR01N	EKCBC0004
7	3.61E-09	ENNPY0018	EKCBC0004
8	3.61E-09	EKNPY0001	EKCBC0004
9	3.61E-09	ENNPY0011	EKCBC0004
10	3.61E-09	ENNPY0013	EKCBC0004
11	3.61E-09	EKNPY0006	EKCBC0004
12	3.61E-09	EKNPY0008	EKCBC0004
13	3.61E-09	ENNPY0016	EKCBC0004

표 4.3 4.16kV 안전급모선의 최소단절집합-계속-

Table 4.3 minimal cut-set on 4.16kV safety bus

순위	이용불능도	최소단절집합	
14	3.61E-09	EKNPY0003	EKCBC0004
15	2.60E-09	EOXMY0001	EKCBC0004
16	1.38E-09	EOCAY345-1	LOOP
17	1.28E-09	EOXAYTR02M	EOCAY345-1
18	1.18E-09	EOCAY345-2	EOCAY345-1
계	5.30E-06	정점게이트 : GN2-112	

4.5 배전이용불능도 결과

발전소의 소내부하모선이 발전기의 정상운전시, 기동시 및 소내보조변압기 사고중에 전력을 공급받지 못할 확률 즉, 배전이용불능도의 계산결과를 표 4.4에 나타내었다.

표 4.4 배전이용불능도
Table 4.4 unavailability

정상운전시	기동시	소내보조변압기 고장중	
		모선 1개 정전	모선 2개 정전
5.30×10^{-6}	4.57×10^{-9}	4.87×10^{-9}	7.46×10^{-9}

표 4.4에서 보면 기동시의 이용불능도가 4.57×10^{-9} 로서 정

상운전시의 이용불능도 5.30×10^{-6} 보다 8.6배나 높은데, 이는 설비를 운전할 때 운전중보다 기동시에 고장이 훨씬 커질 수 있음을 의미한다. 또한, 정상운전시나 기동시 모두의 이용불능도에 가장 큰 영향을 미치는 최소단절집합은 EKBSYSW01A 즉, 운전중이거나 기동시에 4.16kV 스위치기어모선 5-SW01A가 고장일 경우이다. 이는 단일최소단절집합으로서 평균이용불능도가 가장 크기 때문이다.

소내보조변압기가 고장일 경우, 기동/대기변압기나 비상디젤발전기가 동작하게 되는데 이 때에 2개의 4.16kV 모선중 1개가 이용불능일 확률은 4.87×10^{-9} 이고 2개 모선 A, B 모두가 이용불능일 확률은 7.46×10^{-9} 로서 후자의 경우가 이용불능도가 약간 높다. 즉, 이용율이 약간 낮다. 이는 두 개의 모선 중 하나만이라도 이용가능한 경우보다 두 개 모두가 동시에 이용불능일 확률이 낮은 것은 사실이나, 두 개의 채널중 하나만이라도 이용가능한 경우보다는 고장확률이 높기 때문이다.

표 2.1에서 조사된 경우 1과 경우 3의 이용불능도를 동일한 방법에 의해서 구해보면 정상운전시에는 경우 1이 가장 낮고 경우 3이 가장 높다. 경우 1이 가장 낮은 이유는 본 연구에서 연구 대상으로 한 경우 2의 모선 A, B가 전기적, 물리적으로 완전독립인데 비하여 경우 1이 두 모선간에 비상전력을 공유할 수 있도록 하여 유사시 비상전력을 배타적으로 상호 공유할 수 있도록 했기 때문이다. 이와 같은 현상은 기동시나 소내보조변압기 고장시에도 비슷하다.

원전에서는 2 개의 독립된 소의전원을 공급받는 기동전원 계통을 구성하고 있으므로 발전기 기동시에 제시된 각 안의 기동전원 계통구성으로는 배전이용불능도가 각 안 공히 4.5×10^{-5} 정도로 근사한 결과를 나타내고 있다. 소내보조변압기사고중 4.16kV 안전급모선계열 A, B의 배전이용불능도는 기동변압기를 2 대 설치하는 제 1 안이 4.0×10^{-5} 으로 가장 낮고 소내대기변압기를 2대 설치하되 스위치야드로부터 소내대기변압기까지의 케이블을 공유하는 제 2 안의 배전이용불능도가 7.46×10^{-5} 으로 제 1 안보다 약 90% 정도 더 높으며, 제 3 안의 경우에는 소내대기변압기가 1대이므로 배전이용불능도가 2.08×10^{-4} 으로서 제 2 안보다 1.8배 정도 더 높은 것으로 나타났다.

5. 결론

원자력발전소의 기동전원 이용불능도는 모든 안이 독립된 2 개의 소의전원을 공급받을 수 있도록 설계되기 때문에 3 개안이 4.5×10^{-5} 정도로 큰 차이가 없다. 정상운전중에는 발전기의 소내운전을 감안하지 않은 제 1 안의 이용불능도가 상당히 높게 나타났고 소내보조변압기 사고중에는 제 3 안의 이용불능도가 제 2 안에 비하여 1.7배 정도 더 높다.

본 연구에서 제시한 표준안의 기동전원구성방식은 지금까지 우리 나라에 건설된 원자력발전소 기동전원의 배전계통으로서 다른 경우에 비하여 신뢰성 즉 이용율이 가장 우수하다. 발전기차단기 도입으로 소내보조변압기가 발전기의 정지 및 운전중에 소내부하에 전력을 공급하므로 모선절환이 불필요하여 운전개념이 단순해지고 소내전설비에 대한 전기적충격을 주는 기회가 줄어들어 소내전설비의 신뢰성을 향상시키는 부수적인 효과도 얻을 수 있다. 소내대기변압기

는 소내보조변압기로부터 전력을 공급받지 못할 경우에 스위치야드로부터 소외전원을 공급받아 안전정지에 필요한 모든 부하에 전력을 공급하도록 설계한다.

경우 1의 구성을 살펴볼 때 신뢰성이 뒤떨어진다. 기동변압기가 기동시에 모든 부하에 전원을 공급하며, 정상운전시에도 기동변압기 2 대에서 2 개의 안전계통모선에 전력을 필수적으로 공급하고 있다. 발전기의 기동, 운전 및 정지시에 비안전급모선부하가 기동변압기와 소내보조변압기측으로 절환되므로 소내설비에 전기적인 충격을 주어 설비의 수명을 단축시킬 수 있다.

경우 3의 구성은 신뢰성이 매우 우수한 것도 불량한 것도 아닌 보통수준이다. 지금까지 연구검토해본 안과 유사하나 소내대기변압기가 1 대인 점이 다르다. 따라서, 설비는 단순해지나 신뢰성이 약간 저하된다. 정량적으로 보아 배전이용불능도가 기동운전시나 정상운전시에는 대동소이하나 소내보조변압기의 사고를 가정하는 경우에는 배전이용불능확률이 본 안보다 약 1.7배정도 더 높아진다. 또한, 우리나라의 설계경험으로 보아 소내모선구성을 변경하고 부하를 재배치해야 하므로 설계를 변경하는데 추가역무가 발생하게 된다.

이상의 내용을 종합해볼 때, 지금까지 연구해본 제2안이 발전기의 기동 및 정지시에 소내부하의 모선절환이 불필요하며 소내설비에 대한 전기적 충격을 주지 않아 전기설비의 신뢰성을 증진시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서, 신뢰성이 가장높고 설계경험이 풍부한 본 안을 계속하여 지속하는 것이 바람직하다.

96-03	감사의 글
본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음	

참고문헌

- [1] 한국전력기술(주), "울진 3, 4호기 SAT 용량 및 대수검토보고서", 한국전력기술(주), 1994. 7.
- [2] Canatom Inc., "Design Description for 13.8kV and 4.16kV, Class III & IV, Power Distribution System", Canatom Inc., 8600-53000-0003-00-DE-A
- [3] 한국전력공사, "원자력 7, 8호기 Station Manual II, Electrical & Nuclear Control", 1994.9, pp3-pp31
- [4] 한국전력공사, "System Functional Description for YGN 3&4 Project", AP, 9-812-E403, 1993.1. pp1-pp18
- [5] 한국전력공사, "System Functional Description for ULJIN 3&4 Project", AP, 9-812-E403, 1994.12, pp1-pp18
- [6] USNRC, "10 CFR App.50- 17. General Design Criteria", USNRC, 1979
- [7] IEEE, "Standard for Preferred Power Supply for Nuclear Power Generating Stations", IEEE, 1983
- [8] Singiresu S.Rao, "Reliability-Based Design", McGraw-Hill, Inc., 1992, pp399-pp429
- [9] 강인선, 김진규, "신뢰성 공학", 한울출판사, 1997, pp183-pp215
- [10] 이상정 외 6인, "디지털 제어시스템 이용을 향상을 위

한 고장허용 제어알고리즘 개발에 관한 연구", 충남대학교, 1995.8

- [11] 여재홍, "TDX-10 전자교환기 제어계 설계와 신뢰성 분석에 관한 연구", 199, pp100-pp127
- [12] 성풍현 외 7인, "동적 경보처리 알고리즘 개발 및 경보계통 신뢰성 평가", 한국과학원, pp95-pp123
- [13] Michael A. Friedman, Jeffrey M. Voas, "Software Assessment : Reliability, Safety, Testability", Wiley, 1995, pp171-pp249
- [14] 문숙경, "THE ESTIMATION OF THE NUMBER OF REMAINING SOFTWARE FAULTS AND THE STOPPING RULE IN SOFTWARE RELIABILITY MODELS", 1990,10, pp1-pp79
- [15] 한국전력기술(주), "발전소 정전방지 검토", 한전기술(주), 1987. 8, pp113-pp163
- [16] 한국전력기술(주), "영광 1, 2호기 확률론적 안전성 평가", 한전기술(주), 1992.8, pp1-pp515
- [17] IEEE, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, pp20, 1991.2

저 자 소 개



최규식 (崔圭植)

1948년 12월 29일생. 1976년 2월 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 6월 뉴욕공과대학 전기과 졸업(석사). 1993년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업(공학). 1978.2-1993.2 한국전력기술(주) 연구소 책임연구원. 현재 건양대학교 교수

Tel : (0461) 730-5283
E-mil : che@kytis.konyang.ac.kr