

원전 완전전원상실 사고에 대한 전력계통 특성평가

°오 성현*, 주 운표*, 류 부형*, 정 윤형*, 김 대일*, 임 장현*, 김 진중**
* 한국 원자력 안전기술원 ** 충남 대학교

A Evaluation on the Characteristics of Electrical Power System for the Station Blackout Events

°S.H.Oh°, O.P.Zoo°, B.H.Ryu°, Y.H.Chung°, D.I.Kim°, C.H.Lim°, K.J.Kim°
* Korea Institute of Nuclear Safety ** Chung Nam National Univ.

ABSTRACT

Station Blackout(SBO) event means the complete loss of alternating current(AC) electrical power to the essential & nonessential switchgear buses in a nuclear power plants.

Since many safety systems in nuclear power plants depend upon alternative current power, the SBO event could be an important contributor to damage of reactor core. Therefore, the SBO events have been considered as a very important safety issues in a nuclear power plants.

In this paper, as evaluating the design characteristics of offsite & emergency power systems, an acceptable minimum SBO duration is calculated. And it is presented that the design method for alternative AC(AAC) sources to cope with the SBO events.

1. 개요

원자력 발전소의 완전전원상실 (Station Blackout : SBO) 사고는 발전소내의 모든 교류전원이 완전히 상실된 사고로써 발전소의 유일한 전원은 밧데리밖에 없는 상태를 말한다. 즉, 발전소의 스윗치야드를 통해서 공급되는 소의 교류전원이 모두 상실되고 발전소내의 비상교류전력 공급원인 비상디젤 발전기까지 기동을 하지 못하여 전원을 공급할 수 없는 사고를 말한다.[1]

SBO 사고발생확률은 소외전력계통의 고장확률과 소내비상 교류전력공급계통 (비상 디젤발전기)의 고장확률로부터 결정되어야 된다. 이와같은 SBO가 발생하면 발전소 정전 기간 동안 원자로 냉각을 포함한 원자로 안전관련기능은 보조급수 계통에 의존하게 되는데 발전소의 유일한 전원인 밧데리와 보조급수계통의 사용가능 시간이 발전소의 정전시간보다 짧은 경우, 원자로심의 용융사고 위험이 높아지게 되므로 이로 인하여 심각한 결과를 초래할 수 있다는 점에서 SBO사고는 매우 중요한 안전성 문제로 인식되고 있다.[2]

이러한 SBO의 위험도를 평가하기 위해서는 소외전원상실의 가능성, 소외전원 상실기간, 소내 교류전원의 다중성 및 신뢰도 등이 평가되어야 한다. 이와관련하여 본 연구에서는 SBO 사고대처능력 평가를 위한 SBO 대처방법, 대체교류전원구성 방법 과 국내원전 전력계통 설계특성등을 평가하여 최대 허용SBO기간을 계산하고 SBO 대처방안등을 제시하였다.

2. SBO 사고 대처방법

원전에서 SBO 사고발생시 이에대한 대처방법으로서는 대별하여 발전소가 SBO에 대한 대처능력을 고유하게 갖고 있다는 대처능력 분석방법과 대체 교류전원을 설치하는 방법으

로 구분된다.

대처능력 분석방법은 소내정전시 별도의 교류전원이 없는 상태에서 밧데리와 인버터의 전력과 보조냉각수를 발전소 안전정지를 위해 필요한 계통과 설비에 공급하여 소내정전을 극복하는 방법이다. 이 방법은 정상적인 교류전원공급이 불가능하므로 보조 냉각수공급은 터빈구동 보조급수 펌프에 의존해야 하며, 격납건물내의 건전성 유지에 필요한 냉각수량의 계산, 밧데리의 공급능력평가, 냉난방 환기설비의 동작불능으로 인한 기기온도상승 대처능력 평가를 포함한 정전사고시의 각종 운전절차서를 작성해야하는 등의 매우 광범위하고 복잡한 분석 및 보고서를 필요로 한다.[3]

대체 교류전원 (Alternative AC:AAC)을 설치하는 방법은 대체 교류전원용 발전기를 설치하는 방법과 인접한 발전소의 교류모선과 상호연결하는 방법이 있으며, 대체 교류전원용 발전기를 설치하는 경우에는 대처능력분석 채택시 요구되는 소내 정전극복능력을 입증하는 별도의 분석과 각종 절차서가 요구되지 않는다.

타호기 모선과 상호연결하는 방법은 다수의 원자력 발전소가 동일 발전소 부지에서 운전되고 있을경우, 타호기의 잉여 교류전력을 소내정전된 발전소에 공급하여 소내정전을 방지하는 방법으로써 전원을 공급하는 발전소의 공급능력과 전원공급시 전원을 공급하는 발전소의 운전에 지장을 초래하지 않는다는 것을 입증하면 가능한 방법이다. 만일, 타호기의 잉여 교류전원이 소내 정전된 발전소를 안전정지하는데 필요한 전력에 비해 부족하면 잉여교류전원의 이용과 대처능력분석방법을 병행하여 소내정전 대처능력을 입증하는 방법도 가능하다.

3. 대체 교류전원 설계 및 구성방법

원자력 발전소 소내정전사고는 기후조건에 의한 소외전력 계통 상실과 소내에 설치되어있는 비상 디젤발전기의 고장에 의한 사고로서 대체 교류전원(AAC)은 기존의 비상 디젤발전기와 공동원인고장을 최소화할 수 있도록 별도의 직류전원, 공기시동계통 및 연료공급장치를 갖추어야하고 비 안전급 AAC를 설치하는 경우에는 소내 안전급 전력계통과의 전기적 물리적 이격요건을 만족시켜야하며 규정된 시간 이내에 사용 가능하여 정전사고후 10분 이내에 소내안전급 모선에 전력을 공급할 수 있도록 설계되어야한다.[4] 또한 AAC는 소내정전 기간동안 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있는 충분한 용량과 주기적인 점검 및 시험을 실시하여 운전성과 신뢰성을 입증시킬 수 있어야 하며 0.95 이상의 신뢰도를 갖도록 설계하여야 한다. 앞절에서 언급한 SBO 대처방법과 관련하여 SBO 대체 교류전원 설치에 관련된 규정을 만족시키는 대체 교류전원의 설치방법에는 다음과 같은 방법이 있을 수 있다.

첫번째 방법으로는 그림 1의 A 부분과 같이 비안전급 AAC 전원을 소내 비안전급 전력 공급계통에 접속하는 방법과 그림 1의 B 부분과 같이 안전급 또는 비안전급 AAC 전원을 소내의 안전급 전력계통에 연결하는 방법이 있는데 이 경우에 있어서는 2개의 회로차단기를 직렬로 접속하여 AAC 전원과 안전급 모션간에 전기적인 격리를 시켜야 한다. 즉, AAC 전원쪽에는 비 안전급 회로차단기를 설치하고 소내 안전급 모션측에는 안전급 회로차단기를 설치하여 비안전급 AAC 전원측의 고장이 소내 안전급 모션에 영향이 미치지 않도록 하여야 한다.

두번째 방법으로는 그림 1의 C 부분과같이 다중화 되어 있는 소내의 안전급 모션 사이에 하나의 안전급 비상디젤 발전기를 설치하고 이 비상디젤발전기가 SBO가 발생된 두 모션중 어느 하나에 전력공급을 할 수 있도록 구성하는 방법과 그림 2와같이 다수호기 발전소가 있는 곳에서는 1개 발전소의 비상전원이 충분한 잉여전력을 갖고 있는 경우, 발전소 사이의 안전급 모션을 상호접속하여 SBO가 발생되지 않은 발전소의 비상 디젤발전기가 SBO가 발생된 발전소의 안전정지에 필요한 부하에 전력을 공급하도록 Tie Breaker를 설치하는 방법이 있다. 이 경우에는 비상전원 또는 AAC가 안전급 모션 A,B에 동시에 접속되지 않도록하는 등의 공통원인사고 방지를 위한 연동장치에 대한 설계가 고려되어야한다.

세번째 방법으로는 원전근처의 수,화력발전소로부터 전력공급을 받는 방법으로서 그림 1의 D 부분과 같이 안전급 모션 전단에 있는 비안전급모션에 직접 수,화력발전소의 출력이 공급되도록 하는 방법과 그림 1의 E 부분과 같이 발전소 근처의 수,화력발전소 또는 F 부분과 같이 터빈발전기 출력이 직접 소내의 안전급 모션에 공급되도록 하는 방법이 있다. 이 경우에 있어서는 필히 안전급 차단기가 안전급 모선의 입력측에 설치되어 전기적인 격리요건을 만족하여야 한다.

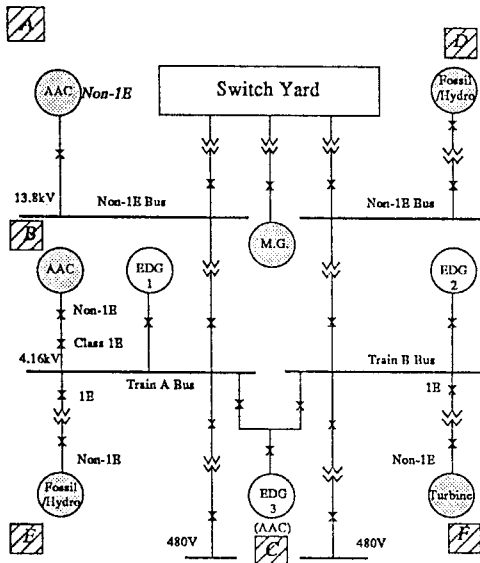


그림1. 대체 교류 전원 구성
Fig.1 AAC configuration

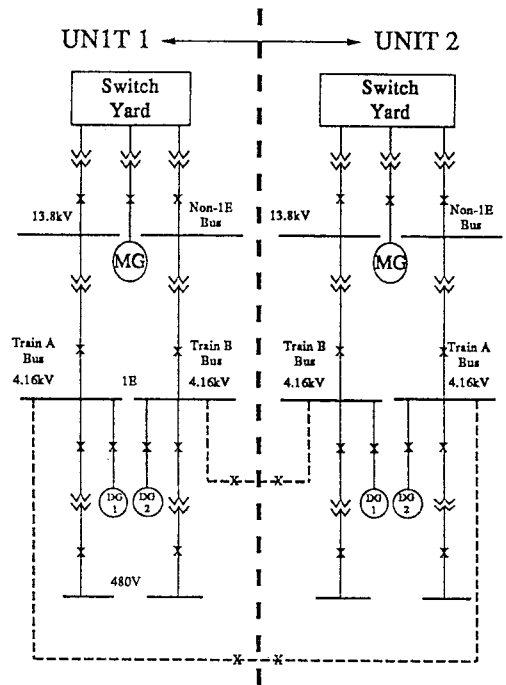


그림2. 다수호기 발전소 Cross-Tie 방법
Fig.2 Cross-Tie for Multi-Units Power Plant

4. 국내원전 전력계통 특성평가

원자력 발전소는 명시된 최소 SBO지속시간의 SBO에 견디어야 하고 규정된 정전기간내에 소내정전이 회복되어야 한다. 이 경우에 있어서 소내 정전기간은 기후에 의한 소외전원의 상실빈도, 소내 비상교류전원의 다중성 및 신뢰성, 소외전원의 독립성등에 따라 결정된다. 이와관련하여 본절에서는 운전중인 국내원전 고리 3,4호기와 건설중인 영광 3,4호기에 대해서 SBO 대처능력분석을 위한 전력계통 설계특성을 평가하였다.

4.1 소외전력계통 특성 평가

소외전원의 설계특성은 규제지침서 (Reg. Guide 1.155)에 따라 소외전원의 독립성에 대한 그룹분류 (I), 발전소 부지의 심각한 기후 분류그룹 (SW), 심각한 기후로부터의 복구에 대한 분류그룹 (SWR) 및 극단적으로 심각한 기후분류그룹 (ESW)등에 따라 P₁, P₂, P₃의 소외전원 그룹으로 결정된다.

고리 3,4호기와 영광 3,4호기는 각각 2개의 독립된 345KV 소외전력공급계통이 1개의 스위치 야드에 접속되어 있으며 [5,6], 안전관련 모션은 정상운전중 분리된 우선 전력공급원에 직접연결되어 있기 때문에 Reg. Guide 1.155의 표 5에 따라 소외전원의 독립성은 그룹 "2"에 속한다. 심각한 기후그룹 (SW)에 기인한 소외전원상실의 추정 빈도수 f는 다음식에 의해서 결정된다.

$$f = (1.3 \times 10^{-4}) h_1 + (b)h_2 + (0.012)h_3 + (C)h_4$$

여기서

h_1 : 연간부저 강설량 (inch)

h_2 : 시간당 113 mile (50.5 m/sec)이상의 바람을 동반한 회오리 바람의 연간 기대치

b : 12.5 (2개 이상의 직선선로에 송전선이 설치되어 있는 경우)

- b : 72.3 (하나의 직선선로에 송전선이 설치되어 있는 경우)
- h₃ : 75 mph에서 124 mph 사이의 풍속을 갖는 풍속의 연간 기대치
- h₄ : 연간 부지 태풍의 기대치
- C : 0 (스윗치야드가 열기성분부에 취약하지 않을 경우)
- C : 0.78 (스윗치 야드가 열기성 분부에 취약할 경우)

고리 3,4호기와 영광 3,4호기 최종안전성 분석보고서에 주어진 기상자료를 이용하고 잊식을 이용하여 심각한 기후그룹 (SW)에 기인한 소외전원 상실추정빈도수 f 를 계산하면 표 1 과같이 고리 3,4호기는 소외전원 상실의 추정빈도수가 2.5628 x 10⁻⁴ 이고 영광 3,4호기는 2.6287 x 10⁻³ 이다. 이와같은 값은 각각 Reg. Guide 1.155의 표 6에 규정된 SW 그룹 "1"의 값 (3.3 x 10⁻³)보다 적으므로 SW 그룹 "1"에 속하고 있음을 알 수 있다. 부지에 대한 극단적으로 심각한 기후의 분류를 나타내는 ESW 인자와 심각한 기후로부터의 복구에 대한 분류그룹 SWR 은 최종 안전성분석보고서의 기술내용에 따라 폭풍이 볼 수 있는 빈도수와 소외전원 복구절차 및 능력등을 평가한 결과, 이들값은 각각 ESW=1, SWR=2 로 계산되었다.

이상의 내용에 근거할때 고리 3,4호기와 영광 3,4호기는 각각 I=2, ESW=1, SWR=2, SW=1 로서 규제지침서 1.155의 표 4에 따라 소외전력 설계특성이 그룹 P₁인 발전소 즉, 소외 전력계통이 독립성 및 다중성을 확보하고 있으므로 소외전원의 상실빈도가 적은 발전소로 평가된다.

표 1 소외전원 상실 빈도수 및 관련변수

호기	h1	h2	h3	h4	b	c	f
고리3,4	1.42	0.0	0.0055	0.12	12.5	0.0	2.5628*10 ⁻⁴
영광3,4	12.97	0.0	0.0854	0.37	12.5	0.0	2.6287*10 ⁻³

4.2 비상전력 계통특성 평가

SBO 대처능력기간 평가에 있어서 소내비상교류전원 그룹은 소내의 비상교류전원의 다중성 정도에 따라 결정되는 그룹으로서 고리 3,4호기와 영광 3,4호기는 각 호기간에 비상교류전원을 공유하지 않고 2개의 독립된 비상 교류전원용 디젤발전기가 설치되어 있으며 각각의 안전관련부하에 1대씩의 안전급 비상디젤발전기가 접속되어 있다.[5,6] 이와같은 각각의 비상디젤발전기는 냉각재 상실사고 등과 같은 설계기준 사고시 발전소를 안전하게 정지시키기 위해 필요한 부하에 충분한 전력을 공급할 수 있는 용량을 갖고 있다. 따라서 Reg. Guide 1.155의 표 3에 근거하여 소내비상교류전원의 그룹은 "C"로 결정될 수 있다.

발전소의 고유한 허용 SBO 기간은 결정하기 위한 다음단계로서는 비상디젤발전기의 평균 목표신뢰도값이 필요하다. 이 값의 결정방법은 각각의 비상디젤 발전기에 대하여 최근 20, 50 및 100회의 여러형태의 기동시도에 대한 신뢰도 평균치를 각 발전소 비상 디젤발전기의 평균 신뢰도로 결정한다.[7] 그러나 현재 고리 3,4호기의 비상디젤 발전기 사용자 기동 실패한 기록등이 관련요건 (Reg. Guide 1.108, IEEE Std. 387)에서 규정된 기동실패 및 성공에 대한 기준에 따라 발전기의 운전기록이 적절히 유지관리되고 있지 않고 데이터의 신뢰성등에도 문제가 있으며 영광 3,4호기는 현재 건설중에 있으므로 운전에 따른 평균 목표신뢰도값을 정할 수 없다. 비상 디젤 발전기의 대표적인 신뢰도는 일반적으로 0.98 - 0.99 범위이나 본 연구에서는 Reg. Guide 1.155의 최저 요구값인 0.95로 보수적으로 비상디젤 발전기의 신뢰도 값을 정하였다.

이상의 내용을 종합하면 고리 3,4호기와 영광 3,4호기는 모두 소외전력 특성이 P₁인 발전소이며, 소내 비상교류전원의 그룹이 "C" 이고 비상디젤 발전기의 신뢰도가 0.95인 발전소로서 표2 에 따른 최대 허용 SBO 기간은 고리 3,4호기와 영광 3,4호기 모두 각각 4시간으로 평가된다.

표 2 발전소 허용 SBO 기간 (hours)

소외전력 계통설계 특성그룹	소내 비상교류 전력계통 구성그룹							
	A		B		C		D	
	비상 디젤발전기 신뢰도							
	0.975	0.95	0.975	0.95	0.975	0.95	0.975	
P1	2	2	4	4	4	4	4	
P2	4	4	4	4	4	8	8	
P3	4	8	4	8	8	16	8	

4.3 대체 교류전원 평가

다수호기가 설치되어 있는 발전소에서 기존의 원전에 설치되어 있는 비상 디젤발전기를 SBO 사고시 인접한 발전소의 대체 교류전원 (AAC)으로 사용할 수 있는가에 대한 규정은 10 CFR 50.63, Reg. Guide 1.155 및 NUMARC 87-00에 기술되어 있다. 이들 규정에 따르면 다수호기가 설치되어 있는 발전소의 경우 전체 발전소에서 필요로 하는 최소 다중성을 갖는 비상전원의 수 이외에 추가로 잉여 비상전원이 있다면, 이를 전체 발전소의 대체 교류전원으로 사용할 수 있도록 되어 있다. 즉, 각 호기당 2대의 비상디젤발전기 (EDG)가 설치되어있고 전체호기에 최소한 1대의 비상디젤 발전기가 추가로 있거나 어떤 특정호기의 비상 디젤발전기 용량이 충분히 커서 소외전원 상실시 자체호기의 안전정지에 필요한 전원을 우선 공급하면서 남는 잉여전력을 SBO가 발생한 발전소에 공급하여 발전소를 안전정지시킬 수 있으면 이를 모두 AAC로 사용할 수 있다.

이와같은 규정을 국내 다수호기 원전인 고리 3,4/영광 1,2에 적용하여 본 결과, 고리 3,4호기의 경우 소외전원상실 사고시 발전소를 안전정지 하는데 필요한 부하는 5,931 KW 이고 각 비상디젤 발전기의 용량은 7,000 KW로 설계되어 있기 때문에 이 비상디젤 발전기는 1,069 KW의 잉여용량을 갖고 있다고 볼 수 있다.

일반적으로 원전 원전전원상실시 (SBO) 발전소를 안전정지시키기 위해 필요한 부하용량은 발전소의 용량 및 설계내용에 따라 상이하나 대략 1500 - 2000 KW 정도가 필요하다. 그러므로 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 SBO 발생시 최소부하 (1,500 KW)가 필요하다고 할 경우에도 원전상실사고가 발생하지 않은 발전소를 안전정지시키고 남는 비상전원의 잉여전력으로는 SBO가 발생한 발전소를 안전정지시킬 수 없다고 판단된다.[8] 따라서 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 기존의 비상디젤발전기는 SBO 대처용의 대체교류전원으로 사용될 수 없으므로 SBO 규정에 대한 대처방안이 강구되어야 될 것으로 평가된다.

영광 3,4호기의 경우에는 각 발전소에 6,500 KW의 비상디젤 발전기를 각각 2대씩 설치하고 SBO 요건을 만족시키기 위해 별도로 비상 디젤발전기와 동일 사양의 안전급 비상디젤발전기 (6,500 KW)를 대체교류전원으로 설치하는 것으로 되어 있으므로 대체 교류전원 자체로서는 관련요건을 만족시키고 있다고 평가된다.

이밖에 국내에서 운전중인 가압 경수형 원자력발전소에 대

해서도 이와같은 SBO 규정이 적용되어 소외전력특성, 소내 비상교류전원의 신뢰성 및 대체교류전원등에 대한 평가가 이루어져야하나 이에대한 규정이 적용되어 있지 않다. 따라서 고리 1,2호기를 포함한 국내의 운전중인 가압경수형 원자로 (PWR)에 대해서는 SBO 요건이 적용되어 SBO발생시 원전의 안전정지가 보장되도록 하는 설계평가가 이루어져야 될 것으로 판단된다.

5. 결론

원전의 완전교류전원 상실사고와 관련하여 국내의 건설 및 운전중인 원전의 전력계통 설계특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

0. 대체 교류전원으로서 비안전급의 비상 디젤발전기가 사용되는 경우에는 소내의 비안전급 모선에 접속되어야하고 안전급 모선에 직접 접속시키기 위해서는 안전급 모선과 비안전급 전원간에 요구되는 전기적인 격리요건을 만족시키기 위해서 안전급 모선의 인입 차단기는 원전의 안전급 품질요건을 갖춘 차단기가 설치되어야 한다.

0. 운전중인 고리 3,4/영광 1,2 호기와 건설중인 영광 3,4 호기의 소외전력계통 설계특성은 각각 P₁ 발전소로 평가되고, 소내 비상교류전원의 다중성 정도에 따라서 소내 비상교류전원그룹은 "C"로 평가되며 비상디젤발전기의 목표신뢰도 값을 0.95로 고려할 경우 최대허용 SBO 기간은 고리 3,4/영광 1,2 호기와 영광 3,4호기가 각각 4시간으로 평가된다.

0. 다수 호기 발전소인 고리 3,4/영광 1,2호기에 설치되어 있는 비상디젤발전기의 잉여전력으로는 SBO가 발생한 발전소를 안전정지시킬 수 없으며, 별도의 대체 교류전원의 설치등의 SBO 대처 방안이 강구되어야 될 것으로 평가된다.

0. 원전의 안전성확보 측면에서 국내의 운전중인 PWR 발전소에 대해서도 SBO 발생시 원전의 안전정지가 보장되도록 하기 위한 SBO 대처방안에 대한 검토 및 이에 대한 이행이 이루어져야 하며, 국내원전은 모든 발전소가 다수기 발전소이기 때문에 각 발전소마다 대처능력분석방법을 선택하는 것보다는 각 부지에 공용의 대체 교류전원을 설치하고 호기간을 상호 접속하여 SBO 규정을 만족시키는 방법이 더 바람직한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Code of Federal Registration, Title 10 Part 50.63, " Loss of All AC Power, " June 1988.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.155, " Station Blackout," August 1988.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, " Reactor Safety Study," WASH-1400, October 1975.
4. Nuclear Management & Resources Council, " Guidelines & Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactors," NUMARC-8700, November 1987.
5. Korea Electric Power Company, " Kori Nuclear Unit 3,4 Final Safety Analysis Report."
6. Korea Electric Power Company, " Yonggwang Nuclear Unit 3,4 Final Safety Analysis Report."
7. Electrical Power Research Institute, " Reliability of Emergency Diesel Generators at U.S. Nuclear Power Plants," NSAC-108, September 1986.
8. 오성현,주운표,류부형 " 영광 1,2호기 비상전원 공유타당성 기술검토보고서," 한국 원자력안전기술원, 1992.