

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 소외전원상실에 대한 사고해석측면에서의 고찰

송진호, 이상근

한국원자력연구소

### 요약

영광 3,4호기 FSAR 이후에 인허가 쟁점이 되고 있는 USNRC의 GDC17에 대한 재해석의 적용과 이에 관련된 소외전원상실, 소외전원상실과 원자로정지로 인한 터빈정지사이의 3초 지연시간에 대하여 그 영향이 15장 사고해석에 미치는 영향을 고찰하여보았다. 영광 3,4호기 예비안전성분석보고서, 최종안전성분석보고서, CESSAR-F, 영광 1,2호기, CESSAR-DC의 개정판 H 및 N의 15장에서 소외전원상실이 적용된 방법을 살펴보고 소외전원상실과 밀접히 관련된 전기계통의 설계차이점을 살펴보았다. 각각의 접근방법의 차이점 및 타당성에 대한 검토로부터 바람직한 사고해석 방법론을 제시하고자 하였다.

### 1. 배경

소외전원상실이란 스위치야드로부터 전기가 발전소의 전기계통으로 공급되지 않는 상황을 의미한다. 소외전원상실이 발생하면 원자로냉각재펌프로 공급되는 비안전등급의 전기 공급원이 없어짐에 따라 원자로냉각재계통의 유량이 감소되어 노심의 열적성능이 감소하게 된다. 따라서 사고해석에서 소외전원상실은 중요한 역할을 하게된다. 안전성분석보고서 15장에 대한 표준검토절차서[1]에 따르면 소외전원상실에 의해 모든 원자로냉각재펌프로 전기가 공급되지 않는 사고경위가 15.3.1절에 하나의 독립적인 사고로 분류되어 있으며 가상사고 (Limiting Fault)의 경우에는 단일고장외에도 추가로 소외전원상실여부가 사고의 결말에 미치는 영향을 고려하도록 언급하고 있다. 한편 예상과도사태 (Anticipated Operational Occurrence: AOO)의 경우에 대해서는 소외전원상실의 영향을 어떻게 고려하는가에 대해 구체적으로 언급하지 않고 있다.

15장 사고해석에서 소외전원상실을 고려하는데 있어서 CESSAR-F와 영광 3,4호기 PSAR, FSAR[2,3,4]에서 보여지는 접근방법과 영광 1,2호기 FSAR[5]에서 사용된 Westinghouse의 접근방법은 서로 상이한데, 그 각각은 미국 NRC로부터 승인을 받았다. 영광 1, 2호기의 FSAR에서는 예상과도현상의 해석에서는 소외전원의 상실의 영향을 고려하지 않고 가상사고에 대해서만 표준검토절차서에 따라 소외전원의 상실 및 추가의 단일고장을 고려하였다. 한편 영광 3, 4호기 PSAR 및 FSAR에서는 예상과도현상의 해석에서 소외전원의 상실을 고려하여 사고해석을 수행하였

다. 즉 소외전원상실을 단일고장으로 고려하여 사고의 분류를 Infrequent Event로 간주하고 그에 해당하는 허용기준인 소량의 핵연료피손을 보여주고 있다. 가상사고에 대해서는 표준검토절차서에 따라 소외전원상실 및 추가의 단일고장을 고려하였다.

한편 ABB-CE는 System 80+에 대한 안정성분석보고서인 CESSAR-DC, 개정판 H[6]의 15장 사고 해석에서는 소외전원 상실의 시점에 대해 CESSAR-F 및 영광 3, 4호기 PSAR의 다소 일관성없는 접근방법을 수정하여 사고발생과 동시 혹은 원자로정지에 의한 터빈정지이후 3초 후에 발생하는 것으로 통일하였다.

## 2. 소외전원상실의 고려 방법에 대한 U. S. NRC의 재해석

U. S. NRC는 ABB-CE의 System 80+ CESSAR-DC의 개정판 H에 대한 DSER[7]에서 CESSAR-DC 15장 사고해석에서 소외전원상실을 고려하는 방법에 대해 이견을 제시하고 있다. 주요 쟁점 사항은 터빈트립에 의한 소외전원상실의 발생에 대한 3초지연 시간에 대한 타당성과 소외전원상실을 단일고장으로 간주할 수 있는가에 대한 것이다.

U. S. NRC는 10 CFR 50, Appendix A의 GDC 17[8]에 대한 재해석을 통해 (CESSAR-F에서 소외전원상실을 단일고장으로 고려한 것에 대하여 승인하였었다) 소외전원상실은 단일고장으로 고려될 수 없고, 따라서 사고해석시 소외전원상실을 가정하는 경우에도 사고의 빈도범주(Frequency Category)가 변화되지 않아야 한다고 주장하였다. 즉 보통빈도의 사고들에 대해 기본적으로 소외전원상실을 가정하고 핵연료손상을 허용하지 않는 허용기준을 적용하겠다는 것이다. 또 한가지 이와 밀접하게 논란이 된 것은 CESSAR-DC에서 터빈정지에 의한 소외전원의 발생이 3초 이상의 지연시간을 가지고 발생하는 것으로 가정한 것에 대한 것이다. 이 3초 지연시간은 CESSAR-DC에 따르면 미국내의 가장 고립된 그리드에 대한 그리드 안정성해석에 의해 얻어진 것이다. 이에 대해 U. S. NRC는 이 3초 지연시간의 타당성을 검증하기 위해서는 그리드에 대한 안정성해석을 뒷받침할만한 추가의 자료가 필요함을 지적하고 3초 지연시간을 허용하지 않았다.

이에 대해 ABB-CE는 USNRC의 입장에 동의하여 CESSAR-DC의 개정판 N[9]를 제출하였는데 이 개정판에서는 예상과도현상에서 소외전원상실을 가정하는 동시에 빈도범주를 변화시키지 않는 방법을 취하였으며 3초지연시간에 대한 가정을 대부분 사용하지 않았다. 영향을 가장 많이 받은 것으로 판단되는 사고는 증기발생기 대기방출밸브의 부주의한 개방사고, 제어봉인출사고, 원자로냉각재펌프 회전자 고착사고, 증기발생기세관파단사고 등이다. 증기발생기 대기방출밸브의 부주의한 개방사고, 제어봉인출사고등의 보통빈도사고들에 대해서는 추가적으로 소외전원상실을 고려하게 됨에 따라 노심유량의 감소로 인한 열적여유도 감소를 보상하기 위해 Required Over Power Margin(ROPM)을 늘릴 필요가 있게되었다. System80+의 경우 고온관온도감소등의 설계개선을 통해 ROPM의 증가를 운전여유도의 훼손이 없이 확보할 수 있을지 모르나 영광 3,4호기등

기존의 설계에는 많은 영향을 미칠것으로 판단된다. 한편 증기발생기세관파단사고에서는 3초 지연시간이 없어도 핵연료 손상이 없도록 노심보호연산기에 새로운 원자로정지 기능을 추가하였다.

그런데 CESSAR-DC 및 이에 대한 NRC의 인허가 과정에서 다소 일관성이 없어 보이는 점은 제어 붕괴사고에서 3초 지연시간이 인정된 것과 복수기진공상실사고의 경우 오히려 3초 지연을 가정하는 것이 보다 실제적이고 동시에 보수적인데도 불구하고 사고초기에 소외전원상실을 가정한 점이다.

### 3. 소외전원상실과 원자로정지에 의한 터빈정지사이의 지연시간

GDC17 쟁점사항과 밀접한 관련이 있는 소외전원상실과 원자로정지에 의한 터빈정지사이의 지연시간은 발전소의 전기계통과 밀접한 관계가 있으므로 영광 3,4호기, 울진 3,4호기, System80+ 전기계통을 비교하고 각 발전소에서 어떻게 3초 지연시간이 구현되고 있는가 살펴보고자 한다.

울진 3,4호기에는 주발전기(Main Generator)와 주변압기(Main Transformer: MT) 사이에 발전회로차단기(Generator Circuit Breaker: GCB)가 설치되어 있다. 정상운전시에는 Class 1E 전기와 non-Class 1E 전기가 모두 주발전기(Main Generator)로부터 보조전압기(Unit Auxiliary Transformer: UAT)를 거쳐서 공급되게 된다. 터빈정지이후에는 원자로냉각재펌프를 포함하는 소내부하는 급속절체(Fast Transfer)가 없이 그리드로부터 주변압기와 보조변압기를 통해서 공급되게 된다. 보조변압기 혹은 GCB의 예기치 않은 고장의 경우에는 예비보조변압기(Standby Auxiliary Transformer: SAT)로 급속절체를 하여 Class 1E 및 non-Class 1E 전기를 공급받는다. 이러한 전기계통의 구성은 System80+의 전기계통과 거의 동일하다.

영광 3,4호기 전기계통에는 발전회로차단기가 설치되어 있지 않으며 Class 1E 전원의 공급은 기동시나 정상운전시 모두 기동변압기(Start-up Transformer: SUT)를 통해 공급된다. 소내부하는 정상운전시에는 보조변압기로부터 공급받게 되나 터빈정지시에는 기동변압기로의 급속절체를 통해 외부 그리드로부터 전원을 공급받게 된다.

영광 3,4호기의 경우 원자로정지에 의한 터빈정지가 일어나면 주 발전기로부터의 전력생산이 줄어들고 이에 따라 외부그리드와 소내부하계통의 전위차에 의하여 일정시간 이후에는 전기가 역으로 공급되게 된다(이런 현상을 Backfeed라고 통상 칭한다). Backfeed 조건이 도달하게 되면 기동전압기로 급속절체를 시작하기 위한 타이머가 작동하여 약 3초뒤에 급속절체를 시도하게 된다. 이러한 Backfeed시에 주발전기의 과열문제를 고려하여야 하는데 영광 3,4호기의 터빈에 대해서는 문제가 없는 것으로 확인이 되고 있다. 한편 이러한 시간지연은 다른 발전소의 터빈트립시 야기되는 그리드 불안정성에 의한 불필요한 터빈트립을 방지하는 효과도 있다. 한편 3초가 지난 이후 원자로냉각재펌프(RCP)로 Grid로부터의 전기공급이 가능할 것인가에 대한 것인

데 이는 터빈정지에 의한 그리드의 안전성과 관련되게 된다. 한전이 주도가 되어 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기에 대한 그리드 안정성분석에 의하면 터빈정지에 의한 그리드 불안정성은 3초보다 훨씬 큰 시간후에 발생하는 것으로 보고되어 있다[10].

울진 3,4호기에서는 앞서 설명된 것처럼 발전회로 차단기의 설치로 인해 상황이 다소 다르게 되나 다음의 이유로 3초 지연이 정당화 될 수 있다. 원자로정지에 의한 터빈 트립이 일어나면 발전회로 차단기가 설치되어 있으므로 급속절체를 할 필요가 없게 된다. 급속절체는 기계적으로 breaker가 열고 닫히는 능동적인 행위이기 때문에 실패할 확율이 있고 실제로 두 breaker 중 하나의 불량에 의한 급속절체 실패가 영광 3,4호기 사고해석시 단일고장으로 고려되었다. 반면 발전회로차단기는 급속절체 기구에 비해 훨씬 간단하게 작동되어 신뢰도가 높은 이점이 있다. 발전회로차단기는 터빈정지후 3초후에 열리게 되어 3초 이후에는 주 발전기로부터의 전원 공급이 차단되고 외부 그리드에서 전기를 공급받게 된다. 발전회로차단기가 열리기 전에는 RCP는 외부그리드 혹은 주 발전기에서 공급되는 전기를 받게 된다. 이 기간중 주 발전기로의 Backfeed가 문제 될 수 있으나 터빈 제작자에 대한 설계요건으로 해결될 수 있다. 한편 터빈 정지에 의해 외부 그리드가 불안정해져서 전원공급이 될 수 있으나 그리드 안정성해석으로부터 3초보다 훨씬 긴 시간 이후에 터빈정지에 의한 외부전원이 불안정해지는 것이 보고되어 있다. 한편 최악의 경우에 GCB 혹은 보조변압기의 고장에 의해 원자로냉각재 및 Class1E전기가 공급되지 않을 경우에는 예비보조변압기로 급속절체 되기때문에 원자로냉각재펌프로 전기가 지속적으로 공급될 수 있다.

따라서 울진 3,4호기나 영광 3,4호기에는 3초 지연시간이 정당화 될 수 있다 하겠다. 그러나 System80+의 경우에는 발전소주위의 그리드 상황, 발전기의 제원등이 아직 상세히 정해지지 않아 그리드 안정성해석 및 주발전기로의 backfeed에 의한 과열에 대한 쟁점사항을 해결하지 못했기 때문에 NRC로부터 3초 지연시간을 인정 받는데 어려움이 있었다고 판단된다.

#### 4. 사고해석에서의 소외전원상실 및 지연시간 처리방법에 대한 비교 검토

앞의 논의를 종합하여볼때 다음과 같은 두가지 사항에 대한 체계적이고 일관적인 논의가 앞으로 진행되어야 한다고 여겨진다.

우선 보통빈도의 사고에 15장의 Initiating event의 하나로 분류된 소외전원상실을 추가로 가정하고 그 사고를 다시 보통빈도의 사고로 분류하여 핵연료 손상을 허용하지 않는 것이 지나치게 보수적이어서 설계자에게 부담을 주지 않는가 하는 것이다. 참고문서 11에 의하면 1988년까지 조사된 국내원전의 완전 소외전원상실사건은 고리 1호기에서 1번, 고리 2호기에서 2번, 그리고 고리 4호기에서 1번이 있었다. 사고의 원인으로는 송전 및 수전 설비에 염분의 축적으로 인한 접지저항 상실과 낙뢰의 간접적인 원인으로 보호계전기가 동작하여 외부전원이 상실된 경우이다. 위의 결과를 이용하여 국내의 소외전원상실빈도를 계산하여 보면 3건/48.8

Rx-Yr=0.06/Rx-Yr, 미국의 경우에는 62건/877.5 Rx-Yr=0.07/Rx-Yr 로서 비슷하였다. 이를 참조한다면 보통빈도의 사건의 빈도를 0.1/Rx-Yr로 한다면 두 사건이 중복되는 경우는 0.006-7/Rx-Yr로 산정되고 이 사건은 Infrequent Frequent 범주에 들게 될 것이다 (Reg. Guide 1.70 및 ANS 51.1 참조). 따라서 보통빈도의 사건에 소외전원상실을 가정할 경우에는 Infrequent Event로 분류하고 소량의 핵연료 손상을 허용하는 것이 타당하다고 판단된다.

또하나는 원자로정지에 의한 터빈 트립과 소외전원상실사이의 지연시간에 대한 것이다. 앞서 지적한 것처럼 System80+는 부지 및 BOP계통의 설계가 상세하지 못해 3초 지연시간을 인정받는데 어려움이 있었지만 앞에서 설명된 바와 같이 영광 3,4호기나 이와 유사한 설계형태의 후속호기에서는 전기계통 및 터빈계통의 설계를 통해 3초 지연시간이 입증될 수 있다. ABB-CE의 System80+는 GDC17의 재해석과 터빈트립과 동시에 소외전원을 가정함에 따라 Required Over Power Margin을 증가시키고 이로 인해 운전여유도를 줄이는 결과를 낳았다. 물론 System80+는 개량형 원자로로서 고온관 온도감소등의 설계개선사항이 채택되어서 운전여유도의 확보에는 큰 문제가 없다고 판단되지만 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 등에서는 설계변경을 시도하지 않는다면 운전여유도의 확보가 아주 어려워질 것으로 여겨진다. 따라서 운전범위에 지나친 부담을 피하려면 3초 지연시간을 설계를 통해 구현하고 이를 인허가 기관으로 부터 인정받는 것이 바람직한 방향이라고 생각된다.

#### 참고문헌

1. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, NUREG-0800, Rev. 2, U. S. Nuclear Regulatory Commission, July 1981.
2. CESSAR-F, Chapter 15, Combustion Engineering
3. Yonggwang Units 3&4 Preliminary Safety Analysis Report, Chapter 15, KEPCO
4. Yonggwang Units 3&4 Final Safety Analysis Report, Chapter 15, KEPCO
5. Yonggwang Units 1&2 Final Safety Analysis Report, Chapter 15, KEPCO
6. CESSAR-DC, Amendment H, ABB-CE
7. Draft Safety Evaluation Report, Related to the Design Certification of Combustion Engineering System 80+ Docket No. 52-002, NUREG-1462, September 1992.
8. GDC 17, Title 10, Code of Federal Regulations, Part 50, Appendix A.
9. CESSAR-DC, Amendment N, ABB-CE
10. UKS/ES-00097, '91. 10. 30.
11. KAERI/TR-363/93, 국내 원전 소외전원 상실사건 및 고리 3,4호기 비상디젤발전기 신뢰도 조사 및 분석, 1993. 5

**Table 1. Treatment of LOOP in Chapter 15 Analysis**

Events / SAR	YGN 3 & 4 PSAR, CESSAR-F	CESSAR-DC Amendement N	YGN 3 & 4 FSAR
15.1 IOSGADV (AOO) MSLB	LOOP at turbine trip LOOP at event initiation	LOOP at turbine trip LOOP at event initiation	LOOP at turbine trip LOOP at event initiation
15.2 LOCV (AOO) FLB	LOOP at event initiation Failure to Fast transfer	LOOP at event initiation LOOP at turbine trip	LOOP at turbine trip LOOP at turbine trip
15.3 Loss of Flow (AOO) Locked Rotor	Initiating event LOOP with 3 second delay	Initiating event LOOP at turbine trip	Initiating event LOOP with 3 second delay
15.4 CEA Withdrawal (AOO) CEA Ejection	Not Considered LOOP with 3 second delay	LOOP at turbine trip LOOP with 3 second delay	Not considered LOOP with 3 second delay
15.5 PLCS Malfunction	LOOP at turbine trip	LOOP at turbine trip	LOOP at turbine trip
15.6 SGTR	LOOP with 3 second delay	LOOP at turbine trip	LOOP with 3 second delay
LOOP as a single failure	Yes	No	No

**Note**

- 1) The LOOP is assumed to be coincident with turbine trip caused by high pressurizer pressure trip in the YGN 384 PSAR analysis
- 2) LOOP causes the coastdown of four Reactor Coolant Pumps (RCPs). However, failure to fast transfer causes the coastdown of two RCPs out of four RCPs
- 3) In CESSAR-DC amendment H, LOOP with 3 second delay is uniformly applied. In case of MSLB, LOOP was assumed to occur coincident with event initiation. For the LOCV event, the sensitivity study for the timing of LOOP on the amount of failed fuel was performed.
- 4) YGN 384 FSAR is now under revision. In the revision it is planned to incorporate GDC 17 issue with 3 second delay.