

차세대원전 안전등급모선의 전원공급 다중성 연구

윤정현, 지문구
한국전력공사 전력연구원

Study on the Diversity of Power supply to Safety related Bus in Korean Next Gener

Jung-Hyun Yun, Mun-Goo Chi
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The electrical power of nuclear power plant consists of Safety related power systems and Non-Safety related power systems. The safety related power systems are designed to have sufficient capacity to safely shut down the unit and to mitigate the effects of an accident assuming loss of off-site power. This paper presents the operation scheme of the safety related power system for several plant conditions in Korean Next Generation Reactor and reviews the diversity of power supply to the safety related bus.

1. 서 론

차세대원전은 지금까지 축적된 국내의 원전운전 및 설계 기술을 바탕으로 개발중인 1350MWe급 개량형 경수로를 말한다. 본 연구에서는 차세대원전의 발전소 전력계통중 원자로 안전운전에 필수설비인 공학적안전설비등에 안정적으로 전력을 공급하도록 설계된 안전등급모선(safety related Bus)에 대해 발전소 운전조건에 따른 전원공급방법을 살펴보으로써 안전등급모선의 안정적 전력공급 가능성을 확인해보고, 발전소의 전력계통 안정성에 크게 영향을 주는 소내 모선절체화물을 검토해 봄으로써 차세대원전 전기계통의 신뢰성을 점검해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 차세대원전 소내전력계통 구성

차세대원전의 전력계통은 주전력계통과 보조전력계통으로 구분된다. 주전력계통은 발전기에서 24KV로 발생되는 전력을 주변압기에서 345KV로 승압하여 스위치야드 및 발전소 소내전력계통에 공급하며, 발전정지시에는 발전기와 주변압기 사이에 설치된 발전기차단기(GCB)를 개방하여 스위치야드와 주변압기를 통해 소외전원을 소내전력계통에 공급한다. 소내전력계통은 스위치야드나 주발전기로부터 공급받은 전력을 2대의 소내보조변압기에서 적절한 전압으로 변환시켜 필요한 소내부하에 공급하며 13.8KV 비안전등급모선 4개, 4.16KV 비안전등급모선 2개, 4.16KV 안전등급모선 4개로 구성된다. 주변압기나 보조변압기가 이용불가능한 경우에는 2대의 대기변압기를 통해 소외전원을 4.16KV 상시비안전등급모선 또는 안전등급모선에 공급하며, 소외전원상실시와 발전소정지시를 대비하여 안전등급 비상디젤발전기 2대와 대체교류전원(AAC)인 가스터빈발전기 1대가 설치되어 있다.

2.2 소내전력계통 운전방법

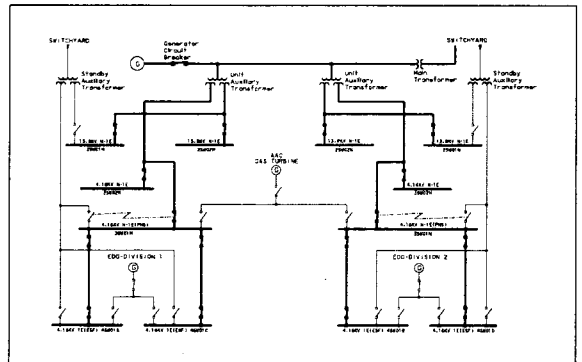
2.2.1 정상운전(Normal operation)

발전소 초기 기동시 발전소 기동에 필요한 전력은 발전기차단기(Generator Circuit Breaker)를 개방한 상태로 주변압기(MT)와 보조변압기(UAT)를 통해 스위치

야드에서 소외전력을 공급받으며, 터빈기동후 발전기 전압과 주파수가 정상상태로 확인되면 발전기차단기를 투입하여계통병입하므로써 소내전력계통과 소외전력계통에 전력 공급을 시작한다. 정상운전시 소내전력계통은 그림-1과 같이 운전되며 안전등급모선의 전원은 4.16KV상시비안전등급모선(Permanent Non-Safety Bus)을 통해 공급받는다.

2.2.2 소내부하운전(House Load Operation)

정상운전중 소외전력계통에 부하탈락(Load Rejection)이 발생하여 발전소가 소내부하로 운전되어야 하는 경우에는 스위치야드의 관련 차단기를 개방한 상태에서 그림-1과 같이 발전소를 계속 운전한다. 이때 안전등급모선은 상시비안전등급모선(Permanent Non-Safety Bus)에서 전원을 공급받는다.



[그림-1] 정상운전, 소내부하운전 및 정상발전정지시

2.2.3 정상 발전정지(Normal Shutdown)

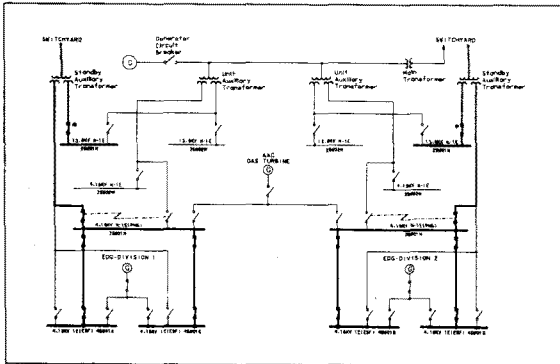
전력계통의 고장이 아닌 발전소 계통 고장으로 계획 정지 또는 불시발전정지가 발생하거나 연료교체를 위해 발전소를 정지한 경우는 그림-1과 같은 상태에서 발전기차단기만 개방한 상태로 스위치야드에서 주변압기와 소내보조변압기를 통해 소외전원을 계속 공급받게 된다. 이때, 각 모선은 전원상실이 발생되지 않으므로 정상 부하운전이 가능하고 안전등급모선도 상시비안전등급모선(Permanent Non-Safety Bus)에서 전원을 공급받는다.

2.2.4 비상 발전정지(Emergency Shutdown)

○ 주변압기, 소내변압기, 발전기차단기, 상분리모선 등 발전소의 정상전원 공급에 필요한 기기에 고장이 발생하거나 전력계통 부하탈락후 소내부하(House Load) 운전이 실패한 경우는 해당 고장 기기가 스위치야드 차단기 및 모선 인입차단기에 의해 차단되고 원자로와 터빈은 자동정지된다. 이때, 대기변압기측 전원이 건전한 경우는 그림-2와 같이 13.8KV 및 4.16KV 비안전등급모선의 전원공급은 상실되고 해당 부하차단기가 모두 개방된다. 또 4.16KV 상시비안전등급(PNS)모선은 소내 변압기(UAT)에서 대기변압기(SAT)로 자동절체가 일

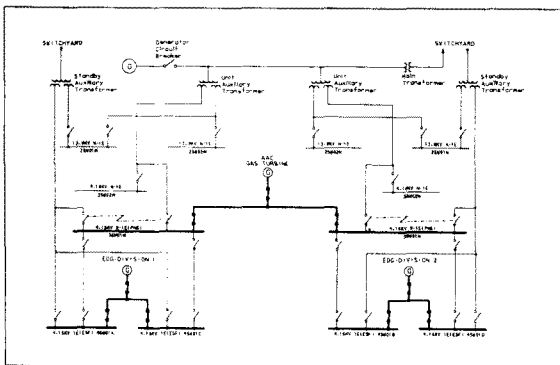
어나 스위치야드와 대기변압기(SAT)를 통해 소외전원을 계속 공급받게 되며, 안전등급모선도 상시비안전모선을 통해 전원을 공급받는다. 또 발전소 운전을 위해 필요한 경우에는 일부 13.8KV 비안전등급 모선(2SW01M, 2SW01N)을 대기변압기(SAT)로 수동절체하여 Division당 1대의 원자로냉각재펌프(RCP)를 운전할 수 있다.

○ 발전기 고장 또는 발전기와 발전기차단기사이의 상분리모선(IPB) 고장으로 발전정지가 발생한 경우에는 발전기차단기가 개방되어 터빈과 원자로는 자동으로 정지된다. 소내전력계통은 주변압기 및 보조변압기를 통해 스위치야드로부터 소외전원을 계속 공급받게 되므로 전원상실이 발생되지 않아 그림-1에서 발전소 기동시와 동일한 방법으로 운전된다. 이 경우에도 안전등급모선은 상시비안전모선(Permanent Non-Safety Bus)에서 전원을 계속 공급받는다.



[그림-2] 비상 운전정지(Emergency Shutdown)시

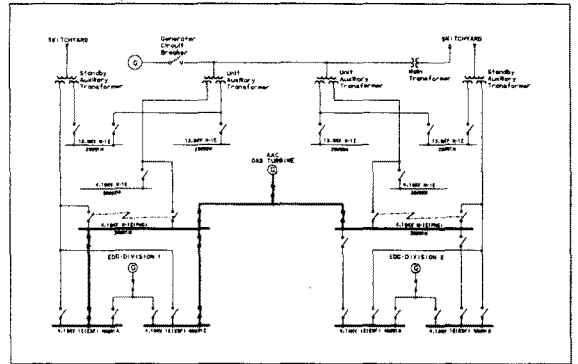
○ 소외전원상실(LOOP)에 의해 발전소가 정지된 경우에는 13.8kV 및 4.16KV 비안전모선은 전원공급이 상실되어 부하차단기가 모두 개방된다. 또한 4.16kV 상시비안전모선(PNS)도 전원공급이 차단되고 부하차단기는 모두 개방되지만 대체교류전원(AAC)인 가스터빈 발전기가 자동기동하므로 운전원 수동조작에 의해 전원을 공급받게 된다. 동일부하내의 2개 발전소에 동시 소외전원상실이 발생한 경우에는 각 발전소의 상시비안전모선 2개중 3SW01M에만 우선적으로 전원을 수동공급한다. 안전등급모선은 자동기동된 비상디젤발전기로부터 자동부하분담실행(Auto. Loading Sequencing)에 따라 순차적으로 전원을 공급받는다. 소외전원상실(LOOP)에 의해 발전소가 정지된 경우의 소내전력계통 운전방법은 그림-3과 같다.



[그림-3] 소외전원상실(LOOP)에 의한 발전소정지시

○ 비상디젤발전기를 포함한 모든 소내전원 및 소외전원이 상실되는 발전소정전(SBO)시에는 13.8kV 및

4.16 KV 비안전모선이 모두 전원상실되며 관련 부하 차단기가 개방된다. 이때, 4.16kV 상시비안전모선중 Div.1(3S W01M)은 대체교류전원(AAC)으로부터 우선적으로 전원을 공급받아 4.16kV 안전등급모선 4SW01A, 4SW01C에 수동으로 전원을 공급받게 된다. 그러나 4.16kV 상시비안전모선 3SW 01M의 비안전부하는 안전정지모선(4SW 01A, 4SW01C)에 전원을 공급한 후 대체교류전원의 부하운전상태에 따라 수동으로 전원공급을 할 수 있다. 발전소 정전사고이전에 이미 소외전원상실이 발생되어 대체교류전원에서 2개 발전소의 4.16kV 상시비안전모선(3SW01M)에 전원을 공급한 상태에서 발전소정전이 발생되었다면 AAC측면에서는 가장 심각한 경우이므로 상시비안전모선의 부하를 모두 차단한 후 발전소별로 1개 Division의 안전등급모선 4SW01A, 4SW01C에만 수동으로 전원을 공급해야 한다. 발전소정전시의 소내전력계통 운전방법은 그림-4



[그림-4] 발전소정전(SBO)에 의한 발전정지시

림-4와 같다.

○ 13.8KV 및 4.16KV 비안전등급 스위치기어나 4.16kV 상시비안전모선의 인입차단기 고장시에는 발전기차단기(GCB)와 스위치야드내 345KV 차단기가 개방되어 발전기가 자동정지되고 원자로 및 터빈이 정지된다. 소내전력계통은 해당 13.8KV 또는 4.16KV 비안전모선이 전원상실되어 부하차단기가 모두 개방되고, 4.16KV 상시비안전모선(PNS)은 SAT로 자동절환되어 관련 부하에 소외전원을 공급하고 안전등급모선도 4.16KV 상시비안전모선에서 계속 전원을 공급받는다. 이때의 소내전력계통 운전방법은 그림-2와 동일하다.

○ 13.8kV 비안전등급 스위치기어 모선 또는 차단기 고장시에는 13.8kV 비안전등급모선의 인입차단기가 개방되어 해당 모선이 전원상실되고 관련 RCP가 정지되어 원자로 및 터빈정지가 발생한다. 소내전력계통의 4.16KV 비안전모선과 4.16KV 상시비안전모선은 스위치야드로부터 주변압기와 소내보조변압기를 통해 소외전원을 계속 공급받는다. 또한 안전등급모선도 4.16KV 상시비안전등급모선에서 전원을 계속 공급받으며 이때의 소내전력계통 운전방법은 그림-1에서의 발전소 기동시와 동일하다.

2.3 안전등급모선의 전원공급 다중성

2.3.1 차세대원전의 소내모선 절체

○ 모선절체란 발전소내의 주요 부하로 공급되는 정상전원이 상실될 경우 대기전원으로 전원을 절체하여 계속적인 소내부하운전이 가능하도록 하는 것을 말하며, 발전소의 안전운전 및 안전정지에 필요한 전원을 확보하기 위해 두개이상의 독립된 소외전원이 공급되도록 요구하고 있다. 그러나 실제 발전소에서 모선절체가 발생할 경우 모선절체방식의 성공여부와 관계없이 소내부하에는 전압, 주파수의 과도현상이 발생되어 관련 기기 및 모선에 손상을 주게되므로 소내모선절체의 발생확률이 작을수록 기기보호측면에서 유리하다.

○ 차세대원전 소내전력계통의 전원공급방법은 주변압기를 통한 정상전원공급과 대기변압기를 통한 대기전원공급으로 구분된다. 차세대원전에서 채택하고 있는 모선 절체방식은 정상공급전원이 차단되어 모선의 잔류전압이 30%이하로 감소되면 대기전원을 투입하는 잔류전압모선절체(Residual Voltage Bus transfer)방식이며 0.5~3초의 전원공급실시간(Dead Bus time)이 발생한다. 자동모선절체가 적용되는모선은 4.16KV 상시 비안전모선 2개 이며 13.8KV 비안전등급모선 2개(2SW01M, 2SW01N)는 원자로냉각재펌프 운전을 위해 필요한 경우 대기변압기로 수동절체가 가능하다.

○ 차세대원전은 발전정지가 발생될 때 발전기차단기만 개방하면 소내 모선절체없이 주변압기를 통한 계속적인 정상전원공급이 가능하므로 발전정지시 반드시 대기전원으로서의 모선절체가 요구되는 기존 원전보다 정상전원의 공급신뢰성이 높다. 차세대원전의 경우 운전기간중 자동모선절체 예상횟수가 유사한 전기계통을 적용한 울진 3,4호기의 확률계산을 참조할 경우 8.41×10^{-6} 회/시간으로 대략 40년기준으로 2.95회(60년에 4~5회)이며, 이는 발전기차단기를 채택하지 않은 기존 원전의 연 2~3회에 비해 아주 작은 값이다.

2.3.2 안전등급모선의 전원공급 다중성

○ 안전등급모선은 표-1에서와 같이 발전소 운전조건에 따라 다양한 방법으로 전원을 공급받을 수 있어 통상 소내보조변압기, 대기변압기 및 비상디젤발전기를 통해 안전등급모선에 전원을 공급하는 기존 원전의 경우보다 전원공급 다중성이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

[표-1] 운전조건별 안전등급모선 전원공급방법

| 운전조건 | 전원공급방법 |
|-----------|---|
| 1. 정상운전 | 발전기 → UAT → PNS → 안전등급모선 |
| 2. 발전정지 | SWYD → 주변압기 → UAT → PNS → 안전등급모선 |
| 3. UAT고장 | SWYD → SAT → PNS → 안전등급모선 |
| 4. PNS고장 | -EDG → 안전등급모선 -SWYD → SAT → PNS → 안전등급모선 |
| 5. 소외전원상실 | EDG → 안전등급모선 AAC → PNS |
| 6. 발전소정전 | AAC → PNS → 안전등급모선 |

○ 앞에서 살펴본 것과 같이 대기변압기는 안전등급모선의 정상공급전원에 대해 독립적으로 소외전원을 공급하기 위해 설치된 설비이나, 현재 표준원전 개량화와 관련하여 2대로 설계된 대기변압기(SAT)를 1대로 단일화하는 방안이 검토중이다. 여기서는 대기변압기(SAT)를 1대로 변경할 경우 안전등급모선의 다중전원 감소추천에서 발전소 노심손상빈도에 미치는 영향을 민감도 분석을 통해 살펴보았으며, 그 결과는 표-2와 같다.

[표-2] 대기변압기 단일화설계에 대한 민감도분석

| 항목 | 노심손상빈도 | 비고 |
|----------------|-------------------------------|----------------------|
| 내부사건 | $\Delta CDF \approx 1.0E-8/R$ | KNGR : $7.9E-7/R$ |
| 외부사건 (화재) | $\Delta CDF > 2.0E-7/R$ | Sys.80+ : $6.0E-8/R$ |
| 정지/저출력 (화재) | 외부사건서보다 증가예상 | Sys.80+ : $3.0E-7/R$ |
| 계 | $\Delta CDF > 2.1E-7/R$ | |

현재 외부사건에 대한 민감도분석이 진행중인 상태에서 계산이 개략적으로 수행되었으며 분석결과, 대기변압기(SAT)를 단일화할 경우는 화재에 의한 외부사건이나 저출력/정지시의 노심손상빈도가 $2.1 \times 10^{-7}/R$ 이상 증가하는 것으로 나타나 대기변압기를 2대 설치하는 경우보다

노심안전성이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 경제성 향상을 위해 대기변압기를 단일화하는 것보다는 현재의 설계와 같이 2대를 설치하는 것이 안전등급모선의 독립된 다중 소외전원 확보 및 노심 안전성확보 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

○ 소외전원상실시 안전등급모선에 비상전원을 공급하는 비상디젤발전기는 Division당 1대씩 설치되어 있고 각 Division에는 2 Train의 안전등급모선이 연결된다. 여기서는 안전등급모선 전원공급원의 물리적 다중성을 확보하기 위해 비상디젤발전기를 4대 설치할 경우 발전소 노심손상빈도에 미치는 영향을 민감도 분석을 통해 살펴 보았으며, 그 결과는 표-3과 같다.

[표-3] 비상디젤발전기 4대설치에 대한 민감도분석

| 항목 | 노심손상빈도 감소 | 비고 |
|--------|-------------------------------|-----------------------|
| 내부사건 | $\Delta CDF \approx 8.7E-8/R$ | KNGR : $7.9E-7/R$ |
| 외부사건 | - | Sys.80+ : $6.0E-8/R$ |
| 정지/저출력 | $\Delta CDF \approx 2.4E-8/R$ | Sys.80+ : $8.37E-7/R$ |
| 계 | $\Delta CDF \approx 1.1E-7/R$ | |

분석결과, 차세대원전에 비상디젤발전기를 4대설치할 경우 발전소 내부 및 외부사건, 저출력/정지시의 노심손상빈도는 10%이하의 감소를 보이는 것으로 평가되어 추가설치로 인한 경제적 부담에 비해 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 현재 차세대원전의 안전등급모선은 2 Division, 4 Train개념으로 설계되어 있어 4개 Train 중 1개 Train 만 운전가능해도 만족하는 경우의 모선 이용률(4.455 $\times 10^{-7}$)가 2개 Division 중 1개 Division만 운전가능해도 만족하는 경우의 모선 이용률(1.043 $\times 10^{-3}$)보다 크게 작게 나타나고 있다. 따라서 현재의 차세대원전 설계특성과 비상디젤발전기 2대 추가시의 모선 이용률, 노심손상빈도, 경제적 효과등을 고려하면 비상디젤발전기 4대 설치에 의한 이득은 크지 않은 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 1350MWe급 개량형 경수로로 개발중인 차세대원전의 안전등급모선(safety related Bus)에 대해 설계현황을 살펴보고 발전소 운전조건에 따른 여러 형태의 전원공급방법, 소내전력계통의 안정성에 크게 영향을 큰 모선절체확률등을 기존원전과 비교해봄으로써 차세대원전 안전등급모선의 전력공급 다중성과 운전신뢰성이 향상되었음을 확인하였다. 또한, 대기변압기 단일화안과 비상디젤발전기 4대 설치안에 대한 노심 손상빈도 분석결과를 검토해 봄으로써 차세대원전 전력계통의 설계안정성을 확인해 보았다.

[참 고 문 헌]

- 한국전력공사 전력연구원, "차세대원자로 기술개발(I) - 차세대원자로 설계개발 최종보고서 1권 KNKR 발전소 계통구성개념(2/2)", p.481, 1994.12
- 한국전력공사 전력연구원, "차세대원자로 기술개발(II) - 종합분석 제2차 안전성분석보고서", p.76, 1998.3
- ABB-CE, "Electric Power", CESSAR-DC Ch.8 R p.8.1-1~8.2.8, 1996.12.31
- Nuclear Regulatory Committee, 10 CFR 50.34 "General Design Criteria for Nuclear Power P GDC-17 Electric Power systems", 1995.11.15
- 한국전력기술(주) 차세대원자로 전기설계팀, "차세대원전 소내전력계통설계 (기본설계만영내용)", Rev.B, 1997.8
- 한국전력기술(주) 차세대원자로 전기설계팀, "One Li Diagram of KNKR Station Power Block" Rev.0, 19
- 한국전력기술(주) 차세대원자로 전기설계팀, "SDC KNKR - Main power & Aux.Power" Rev.0, 1996.1
- 한국전력기술(주) 차세대원자로 전기설계팀, "SFD KNKR - Main power & Aux.Power" Rev.0, 1997.1