

표준형원전 전기적 과도상태에 따른 소내 모선전압 영향 분석

김문영, 김복렬, 조영식, 장홍석, 김인용, 이재도
한국원자력안전기술원

The Analysis on the Effect for Bus Voltage of Onsite Power System by Electrical Transient in Korea Standard Nuclear Power Plants

Moon-young Kim, Bok-ryul Kim, Young-sik Cho, Hong-seok Jang, In-yong Kim, Jae-do Lee
Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - When onsite power is supplied from grid due to electrical transient in NPP, the effect of the nuclear plant risk will be increased by the change of grid performance. It is important to analyze the effect for bus voltage of onsite according to grid reliability. Therefore, we analytically accomplish the effect for bus voltage by electrical transient in KSNP.

1. 서 론

최근 원전 불시정지 원인 중 전기적 원인에 의한 원자로 및 발전정지 사례가 많이 발생되고 있다. 원전 내부의 전기설비 고장으로 인한 불시정지는 설비개선 등으로 그 대책과 재발방지가 가능하나, 원전 외부적 요인 즉, 송전망(Grid) 원인으로 인해 원전의 갑작스런 정지는 원인 규명이 어려울 뿐만 아니라 원전 위험도(risk)에 큰 영향을 주게 된다. 특히, 전력산업 규제개편에 따라 원전 사업자와 송전망 운영자가 서로 분리되어 다른 형태로 운영되므로 송전망의 성능 변화에 의해 원전에 미치는 영향 효과는 크게 작용되고 있다.

원전 불시정지와 같은 전기적 과도상태에서는 원전의 안전적인 정지를 위해 필요한 안전부하/필수부하들은 송전망으로부터 전원을 공급받게 된다. 그러나 이 때 송전망 신뢰도나 성능에 있어 변화가 발생할 경우, 원전 소내전력계통의 모선전압은 전압저하 등으로 직접적인 영향을 받게 된다. 전동기의 토크는 전압의 제곱에 비례하므로 모선전압 저하에 따라 토크는 크게 떨어지게 되어 모선전압에 연결된 필수부하들의 기동 및 운전토크에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이와 같은 경우는 잠재적인 소외전원상실(LOOP) 사고가 되며, 소외전원상실 사고는 원전의 노심손상빈도(CDF)를 증대시키고, 독립된 두 소외전원공급회로가 가상사고에서도 견뎌야 한다는 원전 일반설계기준(GDC) 17을 만족 못 할뿐만 아니라 발전소 정전사고(SBO)의 전단계가 된다.

따라서 원전의 전기적 과도상태에서 송전망으로부터 전원을 공급받게 될 경우, 송전망 신뢰도에 따른 원전 소내에 영향 및 원전 위험도 영향에 대한 분석은 중요하며, 원전 소내 모선전압의 영향을 분석하고 그 대책을 강구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 송전망 신뢰도에 따른 원전의 영향

그림1은 한국표준형원전(KSNP)의 전력계통에 대한 개념도를 보여준다. 정상출력 운전시에는 주발전기(G)로부터 생산된 전력의 일부가 소내전력계통(onsite power

system)으로 공급되고 대부분의 전력은 주변압기(MTr)를 통해 송전망(Grid)으로 보내진다. 터빈/발전기 트립과 같은 전기적 과도상태시에는 주발전기차단기(GCB)가 개방되어 주발전기를 분리시키고 송전망으로부터 스위치야드(SWYD) 설비를 통해 주변압기 및 소내보조변압기(UAT)를 거쳐 소내로 공급된다. 대기보조변압기(SAT)는 소내보조변압기로의 공급이 실패했을 경우에 대비한 대기전원공급회로이다.

원전 일반설계기준(GDC) 17 요건에 따르면, 소내전력계통 및 소외전력계통(offsite power system)은 안전기능을 다 할 수 있도록 충분한 용량과 능력을 갖추어야 하며 사고시에도 남아있는 전원의 전력상실 확률이 최소화 되도록 하여야 한다라고 명시되어 있다. 따라서 원전은 사고시에 대비한 충분한 용량과 높은 신뢰성을 갖춘 송전망과 연결되어야 한다. 또한, 표준심사지침 SRP 8장에서 원전 소내 배전계통 전압 적절성에 관해 기술하고 있으며 안전성 관련 모선의 전압은 소외전원의 예상 전압변동을 고려하여 예상되는 최대 및 최소 부하조건을 수용할 것을 명시하였다.

미국 원자력 규제기관인 NRC는 2003년 미국 북동부 및 중서부 지역에서 발생한 대규모 정전사태 이후로 송전망의 중요성을 인지하게 되어 송전망 신뢰도와 소외전원 운전가능성 및 원전 위험도에 관한 영향 파악을 위해 Generic Letter(2006-02)을 발간하였다. 여기에서 NRC가 알고자 하는 정보는 송전시스템운영자(TSO) 및 독립시스템운영자(ISO)와 원전사업자간 협약을 이용하는지, 전력조류분석 프로그램을 이용하여 소외전원 운전가능성 및 송전망의 상태를 감시할 수 있는지, 원전사업자의 소외전력계통 복구 절차서 및 송전망 사고에 의한 소외전력계통 손실빈도에 대한 정보를 갖추고 있는지 등이다.

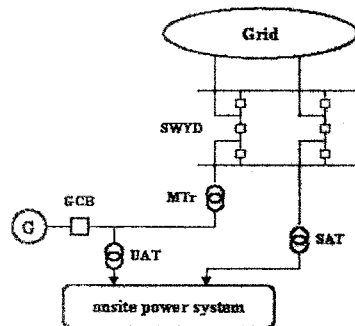


그림 1. 한국표준형원전 전력계통 개념도

미국 원자력 규제관련 기술보고서인 Nureg-1784

(2003)에서는 송전망 사건(event)에 따른 원전 성능의 영향에 관한 내용을 보고하였다. 전력산업 구조개편에 의해 발전회사와 송전회사이간 송전망 운영을 위한 협조시간이 길어지게 되어 원만한 협력이 이루어지지 못 하며 운영의 형태가 서로 다르게 되므로 송전망의 성능 변화는 원전의 소의전원상실 사고 및 잠재적인 위험도 증가 등 원전 안전성과 성능에 영향을 주게 되므로 송전망의 변화들을 규명하기 위한 평가가 필요하다고 기술하였다. 특히, 송전망의 사고 및 의란 등은 원전의 직접적인 영향은 물론이고 다중 원전에 동시 다발적인 영향을 줄 수 있으며, 송전망의 무효전력 용량감소 및 다중원전의 출력증감들은 원전의 적정전압 유지를 위한 송전망의 용량 및 능력에 영향을 주게 됨을 언급하였다. 이러한 원전의 과도상태에서 모선전압 회복을 빠르게 하기 위해서는 송전망 무효전력 용량이 충분해야 하며 원전사업자와 송전망 운영자간 규정된 협약에 의해 송전망 이용률 및 신뢰도를 갖추는 것이 필요함을 강조하였다.

2.2 국내 원전 사건사례

최근 국내원전에서는 송전망 영향에 의해 원자로정지로 도달하게 되는 사건이 고리과 울진 원전에서 발생되어 상기와 관련된 사건사례를 보여준다.

2007년 5월 16일 고리2호기의 경우, 소내보조변압기 저압측 케이블 스파크 발생으로 주발전기 및 원자로가 정지되었으며, 이에 따라 전원 수동절체 중 과도상태에서 전력계통 동기조건 불만족(out of syncho)으로 안전모션에서 저전압이 발생되었다. 동기조건 미형성에 대한 원인으로서는 고리원전과 연결된 154kV 선로의 신울산전력소에서 경부하 시간대에 부하조정을 위해 동기조상기 3대중 1대가 정지함에 따라 발전소내 부하변동에 따른 154kV 모선의 보상능력이 감소하게 되어 동기조건이 형성되지 못 하였다.

2007년 7월 29일 울진6호기의 경우, 정상 출력운전 중 낙뢰에 의한 지락 발생으로 터빈/발전기가 정지되었으며, 소내보조변압기에서 대기보조변압기로 전원절체 지연으로 인해 원자로가 정지되었다. 고속전원절체(fast transfer)가 정상적으로 이루어졌다면 원자로 정지까지 되지 않았을 경우이었으나, 낙뢰의 발생으로 소의전력계통의 영향으로 대기보조변압기 모선전압 저하에 의해 전원절체에 필요한 동기화 조건이 지연됨에 따라 원자로냉각재펌프(RCP)가 정지되고 원자로가 정지하게 되었다.

이와 같이, 원전의 과도상태시 송전망 신뢰도는 원전 성능 및 위험도에 밀접한 영향을 주며 소내 모선전압에 대한 영향 요인을 분석적으로 파악하는 것이 필요하다.

2.3 모선전압 영향 관련 이론

다음의 그림과 같이 간단한 2모선 계통을 통하여 모선전압에 영향을 주는 요소에 대한 이론을 유도할 수 있다.

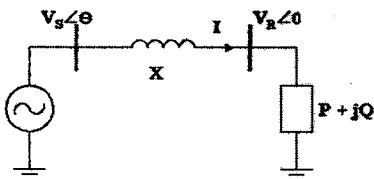


그림 2. 2모선 계통도

선로 임피던스는 리액턴스 성분만 존재하고 전력조류는 송전단(sending) 모선에서 수전단(receiving) 모선으로 형성된다고 하면, 전류식(I)과 수전단의 복소전력(S)은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{jX} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{V}_R \cdot \bar{I}^* \\ &= \bar{V}_R \cdot \left(\frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{jX} \right)^* \\ &= \frac{V_S \cdot V_R}{X} \sin\theta + j \left(\frac{V_S \cdot V_R \cdot \cos\theta - V_R^2}{X} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 수전단의 유·무효전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{V_S \cdot V_R}{X} \sin\theta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_S \cdot V_R \cdot \cos\theta - V_R^2}{X} \quad (4)$$

일반적으로 위상각(theta)은 매우 작은 값이므로 위상각이 0이라고 가정하면, 유효전력(P)은 0이 되며, 무효전력(Q)는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{V_R(V_S - V_R)}{X} \quad (5)$$

여기서, 전력조류는 송전단 모선에서 수전단 모선으로 형성된다고 전제하였으므로 전류(I)가 양의 값을 갖기 위해서는 송전단 모선전압이 수전단 모선전압보다 커야 ($V_S > V_R$) 한다. 그러므로 무효전력(Q)는 식(5)에서 양의 값을 갖게 되며 이는 전압이 높은 송전단 모선에서 전압이 낮은 수전단 모선으로 무효전력이 전달된다는 의미를 나타낸다. 따라서 무효전력은 전압의 크기에 비례관계가 성립됨을 보여 준다. 결국, 원전 과도상태의 경우 소내 모선전압에 직접적인 영향을 주는 인자는 송전망에서 공급되는 무효전력과 관련됨을 알 수 있다.

2.4 사례연구

전기적 과도상태에 따른 소내 모선전압 영향 분석을 모의하기 위해 그림3과 같은 분석 순서도에 따라 사례연구를 수행하였다.

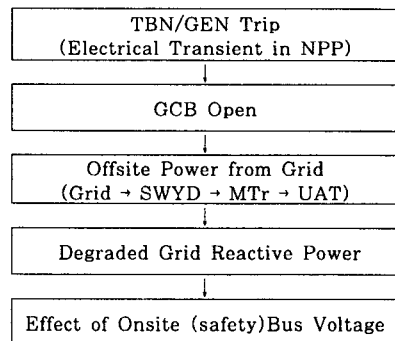


그림 3. 소내 모선전압 영향 분석 순서도

원전의 전기적인 원인에 의해 터빈/발전 정지가 발생된 상황을 가정하고, 발전기 트립에 따라 발전기차단기가 개방되어 소내 전력은 송전망과 연결된 스위치야드와 주변압기 및 소내보조변압기를 거치는 소외전력계통을 통해 전력공급 받게 된다. 여기에서 송전망의 무효전력 공급이 충분하지 못하거나 하절기 전력수요와 같이 부하의 증가로 인하여 송전망 전력계통에 큰 조류가 발생되는 등 송전망 전압제어가 부적절하게 됨을 가정하고 소내 모선전압의 영향을 모의하였다.

소외전원으로부터 전력을 공급받는 경우, 송전망의 신뢰도 변화 상황은 다음의 4가지 Case로 순차적으로 발생됨을 모의하였다.

- Case1 : 무효전력제어 발전기 1대 탈락
- Case2 : Case1 + 동기조상기 1대 탈락
- Case3 : Case2 + 원전 인근 부하증가
- Case4 : Case3 + 원전 인근 전력조류 증가

그림4는 ETAP 전력계통 해석 프로그램을 이용하여 한국표준형원전의 정상 출력운전시 전력조류 결과를 나타낸 것이다. 전기설비에 대한 데이터는 원전 인허가 문서인 최종안전성분석보고서(FSAR)에 나타나 있는 수치에 근거하여 입력자료로 이용하였으며, 소내전력계통 중 대형 전동기부하에 주로 전력을 공급하는 스위치기어 모선(13.8kV/4.16kV)을 중심으로 모의하였다.

그리고 소내 모선전압의 변화율을 나타내기 위해 전압 변동률(ΔV)의 정의는 정상 출력운전시 전압(V_N)과 과도상태에 의해 변화된 전압(V_R) 관계식으로 다음의 수식으로 표현된다.

$$\Delta V = \frac{|V_N - V_R|}{V_N} \times 100\% \quad (6)$$

표 1은 원전 소내 계열별(Train A/B) 스위치기어 모선에 대해 각 Case에 따른 모선전압 변동률 분석 결과를 나타낸다. 표에서와 같이 각 Case에서 의미하는 송전망 무효전력 공급이 감소하거나 원전 인근 부하 증가 및 전력조류가 증가됨에 따라 정상운전시 전압에 비해 소내 모선전압 변동은 크게 나타나며 전압 감소율도 증대됨을 알 수 있다.

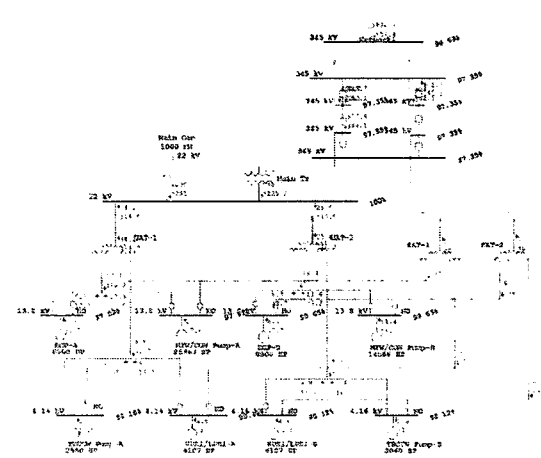


그림 4. 표준형원전의 정상운전시 전력조류 결과

표 1. Case에 따른 A/B 계열 모선전압 변동률

| Mode | A Train Bus Voltage | | B Train Bus Voltage | |
|-------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| | 13.8kV | 4.16kV | 13.8kV | 4.16kV |
| Case1 | 2.80% | 2.79% | 2.76% | 2.79% |
| Case2 | 3.33% | 3.32% | 3.28% | 3.32% |
| Case3 | 4.58% | 4.56% | 4.52% | 4.57% |
| Case4 | 5.89% | 5.87% | 5.81% | 5.88% |

그림5에서는 송전망의 무효전력 공급이 줄어들수록 모선전압은 감소하게 됨을 볼 수 있으며, 그림6에서와 같이 무효전력 감소율이 커짐에 따라 모선전압 변동률도 증가되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 분석 결과로부터 원전의 전기적 과도상태에서 송전망으로부터 전원을 공급받을 경우 송전망의 무효전력 부족은 원전 소내 모선전압에 직접적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

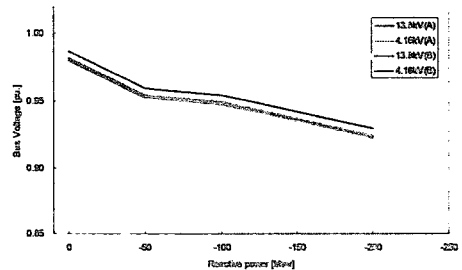


그림 5. 송전망 무효전력 감소에 따른 모선전압 변화

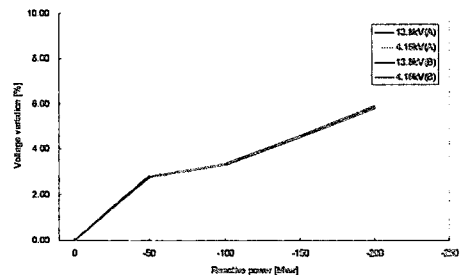


그림 6. 무효전력 감소에 따른 모선전압 변동률 변화

3. 결 론

송전망신뢰도 변화에 따른 원전 성능에 미치는 영향 효과를 파악하기 위해 모선전압 영향 인자를 규명하였고, 표준형원전에 대한 전기적 과도상태를 모의하여 소내 모선전압 영향 분석을 수행하였다. 분석 결과로부터 송전망의 무효전력 공급이 줄어들수록 모선전압이 감소되는 경향을 볼 수 있어 송전망 무효전력 부족은 모선전압에 직접적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
 [2] NUREG-1784, "Effects of Grid Events on Nuclear Power Plant Performance", 2003