

## 원자력발전소 발전기 차단기의 적용 및 운전방식

이종철

정우성

한국전력기술주식회사

### Application of Generator Circuit Breaker and Operation of Electrical Power System in Nuclear Power Generating Stations

J. C. Lee

W. S. Jeong

Korea Power Engineering Company, Inc.

**Abstract** - This paper introduces aspects of electrical power system with regard to the application of generator circuit breaker(GCB) in nuclear power generating stations. Technical analyses are performed for the two(2) alternatives, one(1) stand-by auxiliary transformer(SAT) vs two(2) SAT's, on system configuration in case that one(1) GCB is used. The results show that one(1) SAT system may not be justified when larger auxiliary loads are required to increase plant availability. This paper also presents the feasibility on reliability, operability and maintainability for adopting GCB.

### 1. 서론

차단기 제작 및 대용량 단락시험 기술의 발달에 따른 차단용량 250kA 이상의 대용량 발전기 차단기(이하 GCB)의 개발로 70년대 말부터 1000MW급 이상의 대용량 원자력 발전소에도 GCB가 적용되기 시작하였다. 최근 원자력발전소의 전력계통에는 GCB의 적용이 증가하는 추세이며, 웅진원자력 3,4호기에도 국내 최초로 GCB를 적용하였다. GCB의 적용은 소내부하운전을 가능하게 하며 주변압기 및 소내 보조변압기 사고발생시는 물론 발전기 사고시에도 사고설비로 공급되는 고장진류를 신속하게 차단함으로써 사고화재의 방지 및 보수시간 단축을 기할 수 있고 발전소 기동 및 정지시 소내보선절환이 필요없는 등의 장점이 있는 반면 발전소 기동 또는 정지시 GCB 개방상태에서의 주변압기측의 지락사고 겹출을 위해 계기용 빙압기 및 재전기등이 추가로 요구되며 소내 전력계통 구성방식에 따라 초기투자비가 다소 증가할 수 도 있다.

본 논문에서는 원자력발전소의 소내 교류전력계통 구성방식 및 운전방식과 GCB 적용시의 계통구성방식별 기술성, 신뢰성 및 경제성 검토내용을 소개한다.

### 2. 원자력발전소 소내 교류전력계통 구성 및 운전방식

#### 2.1 소내 교류전력계통 구성방식

원자력발전소의 전력계통은 원자로의 안전성지 및 유사시 방사능의 과다한 누출방지에 필수적인 안전급(Class 1E)과 비안전급(Non-Class 1E)으로 구분된다. 규제요건(10CFR App.A Criterion 17)에 의하면 전원공급과 신뢰도를 높이기 위하여 송전계통으로부터 안전급 소내보선까지의 전기계통은 물리적으로 독립된 2개 회로로 구성하도록 되어 있다. 따라서 GCB를 적용하지 않은 경우의 소내 교류전력계통은 [그림 1]과 같이 2대의 기동변압기가 필요하나 GCB를 적용할 경우에는 주변압기와 소내 보조변압기를 통하여 안전급 보선

에 이르는 1개 회로가 구성되므로 소내부하의 크기 및 모선구성방식에 따라 소내 대기변압기를 1대로 선정할 수도 있다([그림 2]).

#### 2.2 소내 교류전력계통 운전방식

##### 1) GCB를 적용하지 않은 경우([그림 1])

안전급 소내보선은 어떠한 운전조건에서도 항상 기동변압기에서 전력을 공급받게 되므로 보선절환이 필요하지 않다. 비안전급 보선은 발전소 기동시에는 기동변압기로부터 전력을 공급받고 발전기가 계통병입되어 정상운전에 이르면 소내 보조변압기측으로 전원을 수동전환하여 발전기 출력의 일부를 사용하게 된다. 정상운전중 원자로 냉각제 상신사고나 터빈-발전기의 기계적, 전기적 사고 또는 주변압기, 소내보조변압기 등의 고장으로 인한 터빈-발전기의 정지시에는 비안전급 보선의 진원이 기동변압기측으로 자동절환되어 전체 소내부하에 대한 전원공급이 가능하다. 소외전원의 원전상설사고시에는 안전급 보선의 부하가 발전기로부터 전력을 공급받지 못하므로 비상디젤발전기로부터 전원공급을 받아야 한다.

##### 2) GCB를 적용한 경우([그림 2])

GCB를 적용한 경우는 안전급, 비안전급 보선 모두가 소내 보조변압기를 통하여 전력을 공급받을 수 있도록 계통이 구성된다. 발전소 기동 및 정지시에는 GCB를 개방시켜 주변압기와 소내 보조변압기를 통하여 전력을 공급받고, 발전기가 계통에 병입된 후의 정상운전중 원자로 냉각제 상신사고나 터빈-발전기의 기계적, 전기적 사고에 의한 터빈-발전기 정지시에는 GCB를 개방시켜 송전계통으로부터 주변압기와 소내 보조변압기를 통하여 전력을 계속 공급받게 된다. 주변압기이나 소내 보조변압기의 고장시에는 소내 대기변압기로 전원을 질환하게 되며, 소외전원의 원전상설사고시에는 소내부하가 모두 발전기로부터 전력을 공급받을 수 있으므로 핵증기공급계통 및 터빈-발전기계통이 소내부하운전요건에 적합한 경우 소내부하운전이 가능하다.

### 3. GCB 적용시의 소내 교류전력계통의 기술성 검토

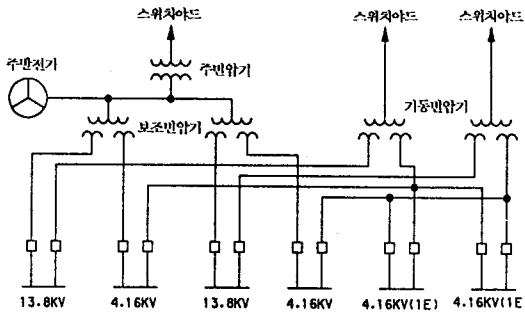
#### 3.1 검토기준

소내 대기변압기를 2대로 선정하였을 경우와 1대로 선정하였을 경우에 대하여 정상출력운전, 발전소 기동운전, 원자로 냉각제 상신사고운전 및 고온대기운전의 4가지 경우에 대하여 기술적 검토를 수행하며 검토기준은 다음과 같다.

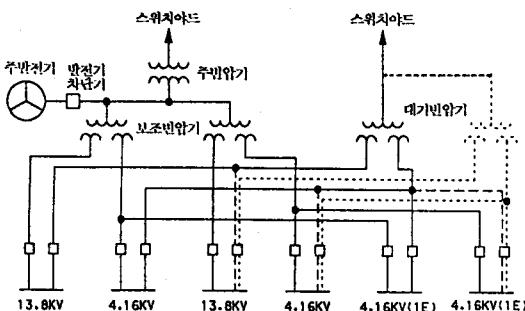
##### 1) 검토요건

o 정상출력운전 및 고온대기운전시에 비상디젤발전기의 병렬운전시험이 가능해야 함.

o 모든 운전조건에서 각 보선의 고장진류는 차단기의 단락용



[그림 1] GCB를 적용하지 않은 경우의 소내 교류전력계통



..... 소내 대기변압기 2대 적용시 추가 회로

--- 소내 대기변압기 2대 적용시 삭제 회로

[그림 2] GCB가 적용될 경우의 소내 교류전력계통

량을 초과하지 않아야 함.

- o 모든 운전조건(전동기 기동시 제외)에서 각 모선의 전압은 정격전압의 90~110% 범위로 유지되어야 함.
- o 전동기 기동시 전동기의 전압은 정격전압의 80%(안전급 전동기의 경우는 75%) 이상으로 유지되어야 함.
- o 모든 운전조건에서 각 모선의 부하량은 각 기기의 용량을 초과하지 않아야 함.

### 3.2 진토내용

#### 1) 소내부하 데이터

1000MW급 발전소를 기준으로 하여 본 검토에 사용되는 운전 조건별 소내부하는 [표 1]과 같은 것으로 한다.

[표 1] 운전조건별 소내부하량

구 分	소 내 부 하 량 (MW + jMVAr)	
	13.8kV 측	4.16kV 측
정상출력운전	59.9 + j34.9	27.7 + j14.7
발전소 기동운전	60.8 + j34.0	30.3 + j15.7
원자로냉각제상설사고	60.5 + j35.1	31.1 + j16.5
고온대기운전	38.3 + j22.4	28.0 + j14.7

#### 2) 전원 및 변압기 테이터

소내 보조변압기 및 소내 대기변압기의 임피던스는 비상디젤발전기의 병렬운전 시험중 단락사고 발생시 고장전류의 크기가 각 모선 차단기의 차단용량(13.8kV:37kA, 4.16kV:41kA)을 초과하지 않도록 선정되었으며 [표 2]에 각 전원 및 변압기의 데이터를 나타내었다.

[표 2] 전원 및 변압기 테이터

구 分	소내대기변압기 1대의 경우	소내대기변압기 2대의 경우
송전계통	최대고장용량 : 25,000MVA 계통전압 : 345kV ± 5%	좌 동
발전기	용량 : 1,219,000kVA 운전전압 : 22kV ± 5% 역률 : 0.9 초기과도리액턴스 : 0.295pu	좌 동
주변압기	용량 : 1060MVA 전압 : 20.9~34.5kV 임피던스 : 16%	좌 동
소내보조 변압기	2 대 용량 : H-48.0/64.0MVA OA/FA X-32.0/42.7MVA(13.8kV) Y-16.0/21.3MVA(4.16kV) 임피던스 : % Zhx- 8.75 @48MVA % Zhy-30.25 @48MVA % Zxy-39.00 @48MVA	좌 동
소내대기 변압기	용량 : H-80.0/106.7MVA OA/FA 55 C 89.6/119.5MVA OA/FA 65 C X-53.0/70.9MVA OA/FA 55 C 59.4/79.1MVA OA/FA 65 C Y-27.0/36.0MVA OA/FA 55 C 30.2/40.3MVA OA/FA 65 C 임피던스 : % Zhx-21 @80MVA % Zhy-66 @80MVA % Zxy-87 @80MVA	용량 : H-44.0/58.7MVA OA/FA 55 C X-29.0/38.7MVA OA/FA 55 C Y-15.0/20.0MVA OA/FA 55 C 임피던스 : % Zhx-9.25 @44MVA % Zhy-30.00 @44MVA % Zxy-39.25 @44MVA

### 3.3 검토결과

각 구성안별 기술적 검토결과를 [표 3] 및 [표 4]에 나타내었다 (최악상태만 표시). 2개인 모두 조건이 동일한 소내 보조변압기로부터 소내부하에 전력공급시(정상출력 운전중 비상디젤발전기 시험운전, 발전소 기동운전, 원자로 냉각제 상설사고 운전)에는 단락전류, 운전전압 및 전동기 기동전압이 모두 운전요건을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 소내 대기변압기에서 전력이 공급되는 상태에서의 원자로 냉각제 상설사고나 고온 대기운전 조건에서는, 소내 대기변압기를 2대로 선정한 경우 모든 운전요건을 만족하나, 소내대기변압기를 1대로 선정한 경우 4.16kV 모선에서의 운전전압과 전동기 기동전압 모두가 운전요건을 만족하지 못하며 13.8kV 모선의 경우도 원자로 냉각제 상설사고시 전동기 기동전압이 운전요건을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 참조된 바와 같은 크기의 소내부하에 대하여는 소내 대기변압기를 2대로 선정하는 것이 적절하다.

### 4. GCB 적용시의 전원공급 신뢰성, 경제성, 운전성 및 유지보수성

#### 4.1 전원공급 신뢰성

GCB 적용시 소내 안전급 모선에 대한 전원은 발전기, 주변압기-소내보조변압기, 소내대기변압기, 비상디젤발전기 등의 4개가 확보되므로 GCB를 적용하지 않은 경우의 3개 전원(기동변압기 2대, 비상디젤발전기)에 비하여 1개 전원이 더 확보되므로 안전급 모선에 대한 전원공급 신뢰도가 높아진다. 한편, NUREG 800, Standard Review Plan, Section 8.2에서는 GCB를 적용하는 경우 소내 안전급 모선의 소외전력 이용율이 GCB를 적용하지 않을 경우 보다 낮아지지 않도록 요구하고 있다. 안전급 모선의 이용불능도를 계산해 본 결과 GCB를 적용한 경우가 적용하지 않을 경우 보다 정상출력운전조건에서 약 9 배 정도 낮은 것으로 나타났으며 발전소 기동운전 조건에서는 거의 비슷한 것으로 나타났다([표 5]).

[표 3] 소내 대기변압기 2대 적용시의 기술적 검토결과

구 분	단락전류(차단기 정격에 대한 비, %, Int/Mom)	운 전 친 압 (모신 정격전압에 대한 비, %)	전동기기동전압 (전동기정격전압 에 대한 비, %)
정상출력운전중 비상다 체발전기 병렬운전시험	13.8kV 모신 : 90.3/73.5	13.8kV 모신 : 101.8	13.8kV 모신 : 88.5
	4.16kV 모신 : 87.9/87.3	4.16kV 모신 : 101.8	4.16kV 모신 : 95.6
	13.8kV 모신 : 89.2/72.5	13.8kV 모신 : 98.3	13.8kV 모신 : 82.6
발전소 기동운전	4.16kV 모신 : 73.9/71.5	4.16kV 모신 : 97.2	4.16kV 모신 : 94.2
	13.8kV 모신 : 89.0/72.3	13.8kV 모신 : 97.6	13.8kV 모신 : 83.1
	4.16kV 모신 : 76.0/74.3	4.16kV 모신 : 96.4	4.16kV 모신 : 93.4
냉각재상실사고(소내보 조변압기 운전)	13.8kV 모신 : 91.1/74.1	13.8kV 모신 : 99.0	13.8kV 모신 : 84.8
	4.16kV 모신 : 77.7/76.9	4.16kV 모신 : 96.2	4.16kV 모신 : 94.2
	13.8kV 모신 : 81.5/63.1	13.8kV 모신 : 101.9	13.8kV 모신 : 93.2
고온대기운전(소내대기 변압기 운전)중 비상다 체발전기 병렬운전시험	4.16kV 모신 : 93.7/88.6	4.16kV 모신 : 97.6	4.16kV 모신 : 93.8

[표 4] 소내 대기변압기 1대 적용시의 기술적 검토결과

구 분	단락전류(차단기 정격에 대한 비, %, Int/Mom)	운 전 친 압 (모신 정격전압에 대한 비, %)	전동기기동전압 (전동기정격전압 에 대한 비, %)
정상출력운전중 비상다 체발전기 병렬운전시험	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일
	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일
	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일
냉각재상실사고(소내보 조변압기 운전)	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일	[표 3]과 동일
	13.8kV 모신 : 99.7/86.2	13.8kV 모신 : 91.2	13.8kV 모신 : 74.5
	4.16kV 모신 : 78.1/91.8	4.16kV 모신 : 78.1	4.16kV 모신 : 73.0
고온대기운전(소내대기 변압기 운전)중 비상다 체발전기 병렬운전시험	13.8kV 모신 : 83.4/69.0	13.8kV 모신 : 97.4	13.8kV 모신 : 87.0
	4.16kV 모신 : 91.3/99.3	4.16kV 모신 : 83.6	4.16kV 모신 : 77.1

[표 5] 각 구성방식별 안전급 모션 이용불능도

구성방식	이 용 불 능 도	
	정상출력운전시	기동운전시
그림 1	$4.53 \times 10^{-5}$	$4.53 \times 10^{-5}$
그림 2	$5.31 \times 10^{-6}$	$4.57 \times 10^{-5}$

주) 1. 이용불능도 평가는 발전기차단기율 적용함으로써 변경되는 부분에 한함.  
2. 각 기기별 고장율은 IEEE 500 및 IEEE 493을 기준으로 하였음.

## 4.2 경제성

GCB 적용시의 경제성은 초기투자비, 발전소 이용률 향상에 따른 발전대체비, 기기의 수명인정에 따른 이들, 전력 손실비 등을 종합적으로 고려하여 검토해야 한다. 초기투자비의 검토시에는 단순히 소내 대기변압기의 용량 또는 수량 차이에 따른 비용차이 뿐만 아니라 GIS Bay 수 및 주변압기와 GIS간의 연계선로 물량의 감소등에 의한 공사비 절감을 고려해야 한다. 2기의 발전소가 스위치아드를 공용할 경우 GCB 적용시의 초기투자비를 계약적으로 검토하면 [표 6]과 같다. 초기투자비는 GCB를 적용할 경우 약 5억원 정도 더 높게 나타났으나, 이러한 초기투자비 차이는 앞에서 인급한 장점 및 신뢰도 향상에 따른 발전대체비를 고려하면 충분히 보상될 수 있다.

## 4.3 운전 및 유지보수성

GCB를 적용할 경우 발전소의 기동 및 정지시 모션질환이 불편

[표 6] 초기투자비 비교 (2기의 발전소 건설)

구 分	총 사 항 목 및 금 액
GCB를 설치한 경우	반전기차단기 15.2 억원/대 x 2대 = 30.4억원 345kV OF케이블* 400m x 3상 x 25만원/m x 2호기 = 6.0억원 소내보조변압기 0.5 억원/대 x 4대 = 2.0억원 무하행전환장치 0.05 억원/면 x 2면 = 0.1억원 GCB를 설치한 경우 450 만원/MVA x 6MVA x 4대 = 11.4억원 소내대기변압기 1,500 만원/MVA x 4MVA x 4대 = -2.4억원 용량감소 계 37.2억원
GCB를 설치하지 않은 경우	GIS HRay 증가 18.0 억원 x 1Bay = 18.0억원 345kV OF케이블* 400m x 6상 x 25만원/m x 2호기 = 12.0억원 케이블 렉터뱅크 400m x 35 만원/n x 2호기 = 2.1억원 용량증가 계 32.1억원

\* 주변압기와 GIS간의 연계선로

요. 하므로 소내 전력계통의 운전이 GCB를 적용하지 않을 경우 보다 간단해 진다.

최근의 원자력발전소 설계경향은 인간공학적인 측면을 고려할 뿐만 아니라 운전원의 주위환경 개선 측면에서 비안전급 소내부 하에도 소내대기변압기에서 전력을 공급할 수 있도록 설계하는 추세이며, 발전소 이용율 향상을 위한 정기보수점검(Overhaul) 기간의 단축을 위해 보수용 전원에 대한 높은 신뢰도가 요구되고 있어 비안전급 부하에도 소내대기변압기에서 전력을 공급할 수 있도록 설계하고 있다.

## 5. 결 론

원자력발전소에 GCB를 적용할 경우 소내 대기변압기의 수량은 소내부하 및 각 모션에 연결된 최대 전동기 용량에 따라 1대의 적용이 불가능할 수 도 있다. 최근에는 발전소 제기동 소요시간 및 보수점검기간을 단축시키기 위하여 비안전급 부하에 대해서도 높은 전원공급 신뢰도가 요구되고 있으므로 소내보조변압기 운전 불능시 소내부하전체를 소내대기변압기에서 전원공급할 수 있도록 소내대기변압기의 수량을 2대로 설계하는 방식이 채택되고 있다.

원자력발전소에 GCB의 적용은 GCB를 적용하지 않을 경우 보다 초기투자비증액에서 분리할 수 도 있으나 발전소 기동, 정지시 모션질환이 불필요하므로 운전이 간편하고, 안전급 소내부하에 대한 전원공급 신뢰도를 향상시키 원자력발전소의 안전성을 증대시켜 발전소의 이용율을 향상시킬 수 있다.

## 참 고 문 헌

- Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Vol.II, Chapter 11. Electric Power Systems, EPRI, 1992. 12
- CESSAR Design Certificate, Combustion Engineering, 1993
- 표준원전 설계요건 작성용역 보고서, 한국전력기술(주), 1989
- Generator Circuit Breaker Application Guide and System Solutions, ABB
- Modern Operation and Protection Philosophy for the Optimum Safety and Plant Availability with Implementation of Generator Circuit Breakers, L.Widenhorn, E.A. Ashia, 1987
- US NRC 10CFR50 Appendix A, General Design Criteria 17 : Electric Power Systems
- US NRC Reg.Guide 1.32 : Criteria for Safety- Related Electric Power for Nuclear Power Plants
- US NRC Reg.Guide 1.33 : Availability of Electric Power Sources