

원자력발전소의 발전기차단기 설계요건 검토

지문구, 한성흠
한국전력공사 전력연구원

Design requirements for Generator Circuit Breaker

Mun-Goo Chi, Sung-Heum Han
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Main functions of Generator Circuit Breaker(GCB) is cut the generator off from the main transformers and the aux. transformers when plant trip or startup. In this paper, the design requirements for GCB of nuclear power plant is examined. NRC presented the area of review, acceptance criteria and review procedures of GCB in the SRP(Standard Review Plan). In Korea, APR1400 adapted the GCB in main power system.

1. 서 론

발전기의 단위출력이 실제 및 기기 제작기술의 진진으로 꾸준히 대형화함에 따라 발전기를 전력계통에 연결하는 방식도 변화하게 되었다. 1960년대 후반에 개발된 대형발전기용 발전기차단기(Generator Circuit Breaker)로 발전소 기동 및 정지 운전을 보다 단순화시킬 수 있게되어 대용량 발전소 주전원계통 설계에 GCB를 채용하기에 이르렀다. 미국 원자력규제위원회(NRC)는 GCB를 채택한 원자력 발전소 전력계통이 만족시켜야 할 설계지침과 GCB의 성능요건을 발전소 건설/운전 인허가 문서에 대한 NRC Staff의 검토기준인 SRP (Standard Review Plan)에 제시하고 있다. 국내의 경우에도 원자력발전소 표준설계 개발사업을 통해 GCB의 채택을 공식화하고 이를 한국표준원전의 주전원계통에 채용하게 되었다. 본 논문에서는 GCB 인허가 검토 지침을 제시하고, 이에대한 차세대원전(APR1400) 전력계통의 적용성을 검토 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 원자력발전소 발전기차단기의 기능

발전기 차단기가 적용된 계통구성 방식에서 안전 1급 모선은 비안전 1급 부하와 동일하게 소내 보조변압기를 통하여 전원을 공급받게 되는데 주발전기가 계통과 동기되기 전의 정지 또는 기동운전 모드에서는 발전기 차단기를 개방시켜 송전계통으로부터 주변압기와 소내 보조변압기를 통하여 정상 소외전력을 공급받게 되고 주발전기가 기동되어 발전기 차단기를 통해 송전계통과 연결되면 발전기에서 생산된 전력을 소내 보조변압기를 통하여 공급받는다. 이때 계통의 동요나 고장으로 인하여 주발전기가 송전계통과 분리되더라도 터빈 발전기 계통이 소내 내부하로 Runback하여 냉각재 펌프, CEDM M-G Set를 비롯한 모든 안전 1급/비안전 1급 부하에 정상전원을 공급하게 되므로 소내부하 운전을 위한 NSSS 설계요건을 만족하게 된다. 따라서 주 발전기의 트립이 요구되지 않는 송전 계통이나 옥외 변전소에서의 사고시에는 옥외 변전소의 차단기만을 개방시켜서 발전기에서 생산된 전력을 소내 전력계통에 공급함으로써 외부요인으로 인하여 발전소가 정지되는 요소를 줄여 발전소의 운전 신뢰성을 향상시킬 수 있으며 고장요인이 제거되면 신속하게 발전소를 송전계통에 운전 복귀시킴으로써 발전소 이용률을 높게 된다.

2.2 발전기차단기의 종류

2.2.1 저압차단기

발전소의 주전원 계통에 있어서 발전기 차단기의 적용은 발전소의 소외전력 수전 및 소내전력 공급 방식에 많은 영향을 미치게 된다. 그림(1)과 같이 과거 발전기 출력이 작고 고장전류가 그리 크지 않았을 때에는 주변압기와 발전기 사이에 차단기를 설치하여 동기 및 고장전류를 차단하였다. 그러나 발전기 출력과 계통용량이 증가됨에 따라, 그림(2)와 같이 유니트 계통구성을 기본으로 발전기의 개폐동작은 주변압기 고압측에 있는 고압 차단기에 의해 이루어 졌다. 그 이유는 발전기의 단자전압을 증가시키는데는 한계가 있어서, 발전소의 정격출력 전류 및 이에 따른 고장전류가 상당히 높기 때문에 그러한 정격의 차단기를 상분리모선(IPB-Isolated Phase Bus)상에 설치할 수 없게 되었다. 이러한 계통의 소외전력은 2대의 기동변압기중 1대를 통하여 수전함으로써 정지 및 기동시 소외전력을 사용할 수 있다.

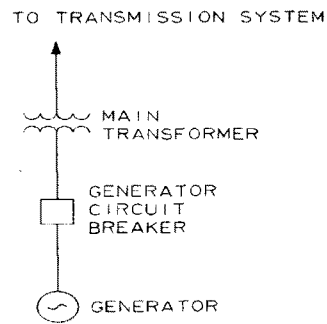
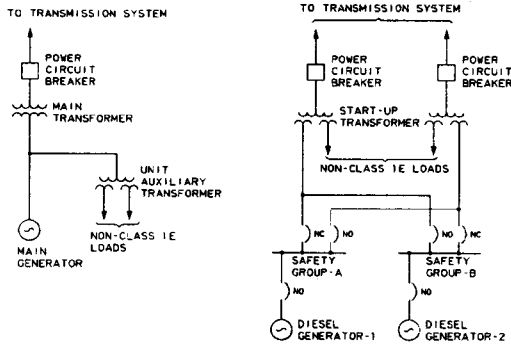
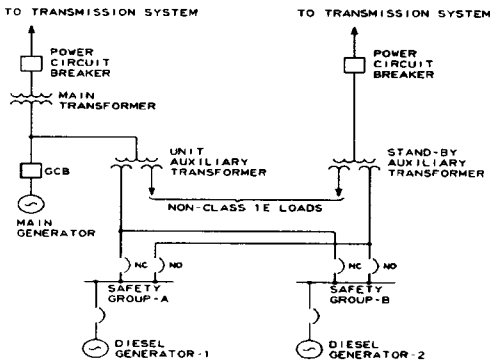


그림 (1) 초기 발전기 연결 방식

그러나 1960대말에는 대용량 발전기에 적용할 수 있는 고차단 전류용량의 차단기가 개발되어 그림 (3)과 같은 계통구성을 가능하게 함으로써 발전소 기동시에는 주변압기와 소내 보조변압기를 통하여 하나의 우선전력(정상 소외전원)을 수전하며, 주발전기가 기동되어 주변압기 저압측에 설치된 발전기 차단기를 통해 송전계통과 연결되면 발전기에서 생산된 전력을 소내 보조변압기를 통하여 소내 전력계통에 공급하고, 또한 대기변압기 한 대를 통하여 또 하나의 우선전력(예비 소외전원)이 확보되어 있다. 주변압기 저압측에 설치하는 고차단 전류용량의 발전기 차단기를 이용한 계통구성 방식은 주변압기측 고장시 고장지점에 대한 발전기로부터의 기여전류를 발전기 차단기가 즉시 차단하여 사고에 의한 주변압기 손상 및 사고확대를 방지할 수 있으나 주변압기 고장시에는 소내계통에 전원공급이 불가능하다.



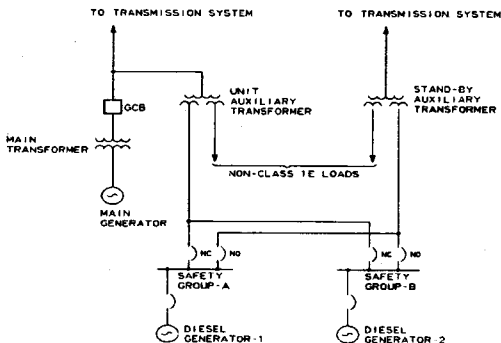
그림(2) 유닛 계통 구성 방식



그림(3) 발전기 차단기 연결 방식

2.2.2 고압측 차단기

발전기 차단기를 주변압기 고압측에 설치하여 발전기 출력의 개폐동작을 주변압기의 고압측에 있는 고압 차단기로 하는 방식은 그림(4)와 같이 소내 보조변압기를 주변압기 고압측으로 연결함으로써, 발전소 기동시 하나의 우선전력(정상 소외전원)을 직접 소내 보조변압기를 통해 수전하고, 주발전기가 기동되어 주변압기 고압측에 설치된 발전기 차단기를 통해 송전 계통과 연결되면, 발전기에서 생산된 전력을 주변압기를 거친 소내 보조변압기를 통하여 소내 전력계통에 공급하고, 또한 대기변압기 한 대를 통하여 또 하나의 우선전력(예비소외전원)을 수전하는 계통구성 방식으로 되어있다. 주변압기 저압측에 설치된 발전기 차단기가 고차단 전류용량을 요구하는 반면, 주변압기 고압측에 설치된 발전기 차단기는 변전소에서 사용하고 있는 초고압 차단기와 같은 차단전류 용량만을 필요로 한다.



그림(4) 고압측 발전기 차단기를 채택한 방식

2.3 원자력발전소 GCB의 설계요건

본 검토에서는 인허가 기관이 소외전력계통을 검토함에 있어 그 구성기기인 발전기 차단기에 대해 NRC Standard Review Plan (NUREG-0800) Section 8.2(Offsite power system)에서 요구하고 있는 설계 및 성능 주안점을 제시하고자 한다.

2.3.1 SRP, Section 8.2 : 소외전력계통

- (1) NRC Staff의 검토분야 [I. Areas of Review 중 1항]
 - ㉗ 주발전기 차단기의 제어 및 전력공급(main generator disconnect, and the disconnect control system and power supply)
 - ㉘ 주발전기의 회로차단기 및 부하 차단스위치에 대한 검토(generator circuit breakers/load break switches)
- (2) NRC Staff의 설계 허용기준[II. Acceptance Criteria 중 2-v항]

발전기의 회로차단기 및 부하차단기의 타당성과 관련하여 SRP 8.2절, 부록1의 지침에 대한 준수가능성(capability to meet the guidelines of Appendix A to SRP Section 8.2 as related to acceptability of generator circuit breakers and generator load break switches)

- (3) NRC Staff의 검토절차[III. Review Procedures 중 1-d항]

GDC 17의 요건이 충족됨을 보장하기 위해 취해지는 검토중 발전기 차단기 또는 부하 차단스위치와 관련된 사항은 다음과 같다.

- ㉙ 냉각재 상실사고시에 두 회로중 적어도 하나가 수초 이내에 안전관련 장비에 전력을 공급할 수 있는지를 조사한다. GDC 17은 두 회로 그 자체가 냉각재 상실사고에 대비해 단일고장을 입증할 것을 요구하고 있지는 않다. 그러나 각 회로는 핵연료 설계한계(fuel design limits) 및 원자로 냉각재 압력경계의 설계조건이 초과되지 않도록 충분한 시간 이내에 이용 가능해야 한다. 따라서 교류전력 상실시에 발전소가 안전한 상태로 놓일 수 있는 기간이 각 단일 고장사고의 경우 소외 송전망에서 소내 Class 1E 배전모선까지 교류전력을 재복구하는데 소요되는 시간보다 긴지를 평가한다.

- ㉚ 스위치야드 회로차단기의 제어방식은 교류전력이 다중 선로중 어느 하나를 통해 Class 1E 모선에 공급될 수 있도록 어떤 인입 송전선로, 스위치야드 모선 혹은 소내 안전관련 배전모선의 진입선로가 격리되도록 이루어져야 한다. 이는 다중 직류축전지 설비에 의해 작동되는 다중 차단기 트립 및 투입장치로서 이루어져야 한다. 압축기내의 고압공기 혹은 스프링 탄력이 교류전력과 무관하게 차단기를 개방 및 투입하는데 사용되어야 한다.

- ㉛ 주발전기의 승압변압기를 통한 역가압(Backfeed) 선로를 이용한 경우 검토자는 우선적으로 그 선로가 긴급 혹은 지연 접근회로에 대한 GDC 17의 요건을 만족하도록 요구되는가를 확인해야 한다. 만약 역가압 선로가 지연접근만을 위한 것이라면 동일한 결정이 이루어져야 한다. 즉 원자로가 안전한 상태로 놓이도록 하기 위해 그 선로를 이용 가능하게 하는데 충분한 시간이 필요하다(송전망 자체만 이용가능하고 긴급 접근회로와 소내 전원이 이용 불가능으로 가정). 만약 역가압 선로가 긴급접근만을 위해 요구되거나, 발전기의 회로차단기 혹은 발전기의 부하차단스위치를 이용한다면 Staff은 본 SRP Section 8.2 Appendix A의 지침을 이용해야 한다.

2.3.2 Appendix A to SRP Section 8.2

발전기 차단기 및 부하차단 스위치에 대한 특정지침(Specific Guidelines)

- (1) 최대 고장전류 차단능력을 가진 장치, 즉 회로차단기만이 소내 교류전력계통을 소외전원으로 긴급 연결시키기 위해 소외 및 소내 교류전력계통으로부터 주발전기

를 격리시키는데 사용될 수 있다. 발전기 부하차단 스위치는 소의전원으로 지연 연결을 위한 목적으로 주발전기를 격리시키는 데만 사용될 수 있다.

(2) 발전기 차단기는 정상운전, 전력계통의 과도현상 및 대형고장시에도 소정의 기능을 수행할 수 있도록 설계되어야 하며 회로차단기의 성능을 확인하기 위한 시험이 수행되어야 한다. 최소한 다음의 시험 및 성능이 입증되어야 한다.

㉞ 절연시험 : 회로차단기는 적용 가능한 일련의 ANSI C37 표준(C37.04, C37.06, C37.09)의 요건 및 규격에 따라 절연강도 시험을 받아야 한다.

㉟ 부하전류의 개폐 : 한 대의 발전기 차단기만을 이용한 경우 차단기는 정상 전부하 연속 정격전류와 동일한 값으로 40회의 부하차단 시험을 받아야 한다. 두 대의 발전기 차단기를 병렬로 이용한 경우 차단기의 정상 전부하 연속 정격전류의 2배 전류로 40회의 부하차단 시험을 받아야 한다. 이 시험의 절차 및 허용기준은 ANSI C37.06과 C37.09에 근거하여야 한다.

㊱ 고장전류 차단능력 : 차단기는 최소한 일차 Arcing 접점의 분리 순간에 나타나는 최대 비대칭 및 대칭고장 전류를 차단할 수 있어야 한다. 이 전류는 발전기 차단기를 통해 흐를 수 있는 최대 고장전류를 야기시키는 지점에서 3상 단락이 발생되었다고 가정하여 계산한다. 차단기의 고장전류 차단능력(단락전류정격)은 ANSI C37.04와 C37.09에서 요구한 것과 유사한 일련의 시험을 통해 입증해야 한다. 이 시험은 투입/개방 동작을 포함해야 하며 차단기의 최소정격 공기압력 및 제어전압으로 수행해야 한다.

㊲ 회복전압 최대상승률 : 차단기의 회복전압 최대상승률은 차단기가 적용된 회로에서 차단기에 부과된 최대 회복상승률보다 적어서는 안 된다.

㊳ 단시간 전류공급능력 : 차단기는 일차 보호장치의 고장 가정하에서 선로의 고장이 진행되는 동안 고장전류를 흘릴 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 고장전류는 차단기의 가장 큰 발열(I^2t)을 야기시키는 지점에서 고장이 발생되었다고 가정하여 선정하여야 한다. 단시간 전류공급 능력은 전류공급 시험을 통해 입증되어야 한다.

㊴ 순시 전류공급능력 : 차단기는 계통에서 가장 최악의 3상 사고가 발생하였을 때 계산한 최대전류를 흘릴 수 있는 능력을 가져야 한다. 이 능력은 시험을 통해 입증되어야 한다.

㊵ 변압기 자화전류차단 : 발전소 주변압기 및 보조변압기의 무부하 자화전류에 대한 회로차단기의 차단이 지나치게 높은 써지전압을 발생시켜 연결모선과 변압기 절연을 손상시키지 않도록 한다. 이는 시험을 통해 입증되어야 한다.

㊶ 열적능력 : 차단기의 열적능력은 그 차단기의 연속정격전류에서 수행한 시험을 통해 입증되어야 한다. 시험은 ANSI C37.04, C37.09에서 언급하고있는 요건과 정격에 따른다. 차단기를 병렬로 이용하는 경우 연속정격전류가 2배까지 증가할 때 차단기내에서 열에 가장 민감한 부품의 최대허용온도에 도달하는 시간을 결정하기 위한 시험을 실시한다.

㊷ 기계적 동작시험 : 차단기의 기계적 신뢰도와 수명에 대한 합리적인 표시를 마련하기 위해 무부하에서 충분한 횟수의 기계적인 동작시험을 수행하여야 한다. 이같이 입증된 수명은 발전소 예상수명기간에 적절해야 한다.

(3) 발전기 차단기를 이용한 설계의 소내부하에 대한 소의전력의 이용율이 발전소 부하에 소의전력을 공급하기 위해 별도의 소의전력용 변압기를 채용한 설계보다 낮아서는 안 된다. 이 경우 발전기 차단기와 스위치야드 고압차단기간의 트립선택은 비정상 사고시 발전소 부하에 소의전력공급을 유지하기 위해 스위치야드내에 있는 차단기의 불필요한 트립이 없도록 보증해야 한다.

(4) 부하차단 스위치는 정상운전, 전력계통의 과도상태 및 대형 고장발생시에 그 소정의 기능을 수행하도록 설

계되어야 한다. 이 스위치는 위의 2).(다)항 "고장전류 차단능력"을 제외하고 발전기 차단기에 대한 위의 2)항의 지침에서 규정한 것과 동일한 능력을 가져야 한다. 부하차단 스위치의 대칭 차단능력은 적어도 발전기의 최대 침투부하 능력과 같아야 한다.

2.3.3 이행(Implementation)

이 지침(Appendix A to SRP Section 8.2)은 아래 사항에 따라 운전중인 발전소, 건설허가 및 운영허가의 검토시에 적용될 것이다.

(1) 2.3.2항의 특정지침 (1)~(4)까지를 운전중인 원자로에 대한 후속조치항목으로 적용하지는 않는다. 1983년 7월 이후에 GDC 17의 요건을 만족시키기 위해 발전기 차단기 혹은 부하차단 스위치를 설치한 운전중인 원자로의 경우는 이 부록의 특정지침 (1)~(4)까지를 만족시켜야 한다.

(2) 2.3.2항의 특정지침 (1)~(4)까지는 안전성 평가 보고서가 이미 발행되었으나 아직까지 전출력허가를 받지 못한 운영허가 신청서 검토에 이미 적용된 바 있다.

(3) 2.3.2항의 특정지침 (1)~(4)까지는 모든 현행 및 향후의 운영허가 및 건설허가 신청서검토에 적용된다.

3. 결 론

본 연구에서는 발전소 전력계통을 구성함에 있어 주전원계통 구성기인 발전기 차단기(GCB)의 인.허가 관련사항을 포함한 차세대원전(APR1400)의 설계요건을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- APR1400에 적용되는 GCB는 비안전급 전기기기(Non-Class 1E)로 분류되어 안전급 전기기기(Class 1E)에 요구되는 내진성능과 환경 품질요건을 따르지 않는다.

- NRC는 발전기차단기 또는 부하차단기가 설치되어 안전관련 모선에 대한 소의전원 우선전력공급이 주변압기의 역가압 회로를 통해 공급되는 설계가 GDC 17에서 정의 하고있는 우선전력 공급회로로 인정하고 있으며, APR-1400의 전력계통에도 이를 반영하여 설계한다.

- 발전기 차단기를 주전원계통설계에 적용할 시는 NUREG-0800(Standard Review Plan),Section 8.2, Appendix A의 특정지침(Specific Guideline)을 만족시켜야 하며 APR1400에도 이를 적용한다.

[참 고 문 헌]

- [1]NRC Standard Review Plan (NUREG-0800) Section 8.2 "Offsite power system"
- [2]NRC Standard Review Plan Section 8.2 Appendix A
- [3] 한기(주), 초고압 345kV 발전기차단기 설계적용검토보고서, 1997. 12.