

# 원자력발전소 직류 전력계통의 충전기 신뢰도 향상방안 연구

임혁순 · 김두현<sup>\*</sup>

원자력발전기술원 · \*충북대학교 안전공학과  
(2009. 12. 31. 접수 / 2010. 3. 26. 채택)

## A Study on Battery Charger Reliability Improvement of Nuclear Power Plants DC Distribution System

Hyuk-Soon Lim · Doo-Hyun Kim<sup>\*</sup>

Reliability Engineering Team, Nuclear Engineering & Technology Institute

<sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received December 31, 2009 / Accepted March 26, 2010)

**Abstract :** The nuclear power Plant onsite AC electrical power sources are required to supply power to the engineering safety facility buses if the offsite power source is lost. Typically, Diesel Generators are used as the onsite power source. The 125 VAC buses are part of the onsite Class 1E AC and DC electrical power distribution system. The DC power distribution system ensure the availability of DC electrical power for system required to shutdown the reactor and maintain it in a safety condition after an anticipated operational occurrence or a postulated Design Base Accident. Recently, onsite DC power supply system trip occurs the loss of system function. To obtain the performance such as reliability and availability, we analyzed the cause of battery charger trip and described the improvement of DC power supply system reliability. Finally, we provide reliability performance criteria of charger in order to ensure the probabilistic goals for the safety of the nuclear power plants.

**Key Words :** battery charger, DC distribution system, nuclear power plants, breaker, reliability improvement

### 1. 서론

원자력발전소의 터빈발전기에서 생산된 전력은 송전망에 전력을 공급하고, 발전소 운전이 필요한 기기에 신뢰성 있는 직·교류 전력을 공급하도록 설계되어 있다. 또한, 전력공급계통은 발전소 운전 변수를 감시하는데 필요한 계측용 전력과 원자로 정지 및 공학적 안전설비 작동 논리 회로에 필요한 전력을 공급한다.

직류배전계통은 안전관련 125V 직류계통은 비접지 안전등급, 내진 범주 1급의 계통이다. 이 계통은 각각 4개의 원자로보호 계측 채널중 해당 채널에 연결되어 있는 4개의 독립적 하위계통(트레인 A,B,C,D)으로 구성되어 있다. 이 안전관련 직류계통은 각 디비전당 2개의 트레인으로 균을 이루면서 다중성을 이루고 있다. 트레인 A와 트레인 C는 디비전 1에, 트레인 B와 트레인 D는 디비전 2에 속한다.

각 직류 하위계통은 납축전지, 충전기(Battery Charger), 직류제어센터로 구성되어 있다. 각 직류제어센터는 발전소 조건에 따라 각각의 축전지/충전기에서 전력을 공급 받는다. 각 하위계통의 충전기는 해당 트레인으로 480V 로드센터 교류전력을 공급 받는다<sup>1)</sup>.

최근 원자력발전소의 안전등급 축전지, 충전기 출력차단기의 비정상적인 직류계통 중 취약분야로 도출된 충전기의 기능고장 및 Trip이 발생되어 충전기 고장에 의한 발전소 불시정지사례가 발생하였다. 본 연구에서는 전자계 해석을 통한 차단기 동작원리 분석, 충전기의 출력차단기 고장원인분석, 트립 신호 유발 가능성 검토 및 개선방안을 제시하여 안전성 확보에 기여하고자 한다.

### 2. 원자력발전소 소내전력 계통

원자력발전소의 소내전력계통은 안전관련 설비에 전원을 공급여부에 따라 안전관련 전력공급계통

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
dhk@chungbuk.ac.kr

(Class 1E)과 비 안전관련 전력공급계통(Non Class 1E)으로 구분된다. 안전관련 전력계통은 냉각재 상실사고와 같은 가상사고 조건에서 발전소를 안전하게 정지시키고 안전정지상태로 유지하는데 필요한 공학적 안전설비에 전력을 공급한다. 안전등급 전기계통은 IEEE Std.308-1978에 따라 안전계통의 동시사고를 방지하기 위해 다중성과 물리적 및 전기적 독립성을 충분히 갖도록 설계되어 있다. 안전등급 전력공급계통은 4.16kV, 480V AC, 120V AC, 125V DC 공급 등 전원별로 여러 계통이 있지만 이 중에서도 4.16kV 전력공급계통은 원자력발전소의 사고시 안전정지와 원자로냉각을 유지하는 비상냉각수공급계통 등 공학적 안전설비에 전력을 공급하는 계통으로써 특히 중요한 전력공급계통이다.

안전등급 4.16kV와 관련된 전력공급계통은 외부로부터 345kV 전원을 수전 받아 4.16 kV로 변환시키는 기동용변압기 계통, 안전관련 설비에 전원을 공급하는 4.16kV 공급계통, 소외전원상실시 안전관련 모선에 비상전원을 공급하는 비상디젤발전기계통과 비상디젤발전기의 전압을 제어하고 4.16kV 모선에 연계하는 비상디젤발전기 전기계통으로 구성되어 있으며, 이 중 안전등급 4.16kV 계통은 전기적 및 물리적으로 독립된 2개의 모선으로, 안전관련 4.16kV 부하 및 480V AC Load Center에 전원을 공급하며 이 계통은 단일기기의 고장이 발생해도 전력공급계통 전체의 기능이 상실되지 않도록 구성되어 있다. Class1E 전력공급계통의 단선도는 Fig. 1과 같으며, 정상운전 중에는 스위치야드의 345kV 기동용 변압기를 통해 외부전원을 수전하고, 외부 전력 또는 기동용 변압기가 상실된 경우에는 비상디젤발전기가 기동하여 전원을 공급하도록 되어 있다. 충전기 (Battery Charger)는 교류입력을 직류로 변환하는 순변환기(Converter) 기능을 수행한다. 480V LC로부터 교류를 받아 사이리스터 정류회로를 거쳐 직류로 변환하여 125V DC 모선을 가압하여 발전소 직류부하에 전원을 공급하고 있다.

비 1E급 직류계통은 각 호기당 2 개의 250V 직류전력계통, 2 개의 125V 직류전력계통 및 2개 호기를 위한 공용 설비로 3개의 125V 직류전력계통으로 구성되어 있다. 3개의 공용 직류계통중 1개는 폐기물 건물용으로 사용되고, 나머지 2개는 변전소용으로 사용된다. 각 250V 직류전력계통은 1대의 축전지, 충전기와 직류 제어반으로 구성되고, 또한 125V 직류전력계통도 축전지, 충전기와 직류 제어반이 하나의 계통으로 구성된다. 호기당 2대의 스

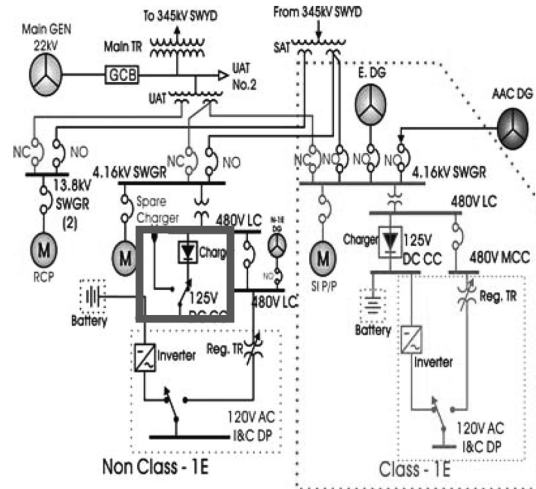


Fig. 1. Simplified Power System in Nuclear Power Generation.

링(Swing) 충전기가 설치되어 기존 충전기의 고장 수리나 점검시에 대체 사용된다<sup>2,3)</sup>.

### 3. 충전기 고장원인분석 및 신뢰도 향상방안

본 연구에서는 충전기에 대하여 전자계 해석을 통한 차단기 동작원리 분석, 관련 시스템으로부터 Trip 신호 유발가능성 분석 및 충전기의 신뢰도 향상방안에 대하여 연구를 수행하였다<sup>4)</sup>.

#### 3.1. 전자계 해석을 통한 충전기 차단기 동작 원리분석

본 연구에서 비안전등급 충전기 차단기 동작원리 분석을 위해 전자계 해석 프로그램인 맥스웰(3D)을 이용한 MCCB 전자계 모델링을 수립하고 시뮬레이션을 통해 인가전류 크기에 따른 힘의 발생정도를 분석하였다. Fig. 2는 전류 1500 A 인가 시에 동작하는 스위치에 관한 Z-direction Force를 구하기 위한 전자기 정특성 해석으로, Coil에 인가된 전류에 따른 힘의 크기에 대한 특성변화를 보여주고 있다. Coil의 양단에는 Aluminium이 Connection 되어 있고, 위, 아래로 두 개의 Steel이 위치하고 있다. Coil에 이상(異常) 과전류가 인가되면 high magnetic permeability를 갖는 두 개의 steels(steel 1, steel 2)를 통과하는 flux의 양이 증가하여 Ampere's Force law( $F = \int_l \vec{I} \times \vec{B}$ )에 의해 힘이 발생된다. 이 힘이 스프링의 탄성을 넘어 설 경우, 차단기를 동작시킨다(여기서, F는 Z-direction force이고  $\vec{B}$ 는 flux density임).

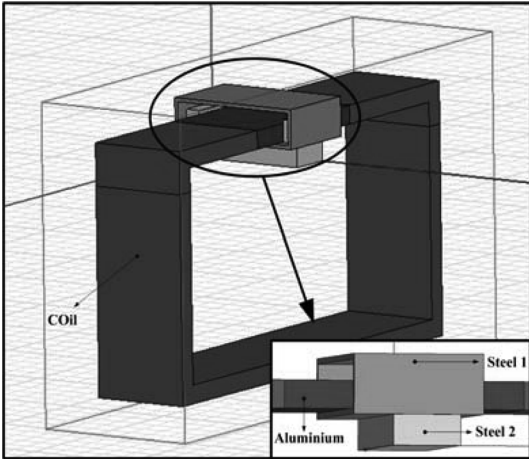


Fig. 2. Schematic diagram of Over Current Breaker.

Fig. 3은 해석 모델에 작용하는 힘의 방향을 간략화 된 차단기 모형의 측면도이다. Steel 1이 받는 힘의 크기에 대한 해석을 수행하였다.

전자기 해석은 DC 500~2000[A]까지 인가전류를 달리하여 그에 따라 aluminium과 steel 사이에 작용하는 힘을 알아보았다. 작용하는 힘의 크기를 알아보기 위하여 Z-direction으로 움직임이 가능한 Aluminium을 Force analysis object로 설정하였다.

전류 인가에 따른 Steel 영역에서의 자계분포에 대해 알아보기 위하여 두개의 steel 영역에 대한 Mag B vector의 분포 해석을 하였다. Fig. 4에서 전류는 -X축 방향에서 X축 방향으로 인가되었으며

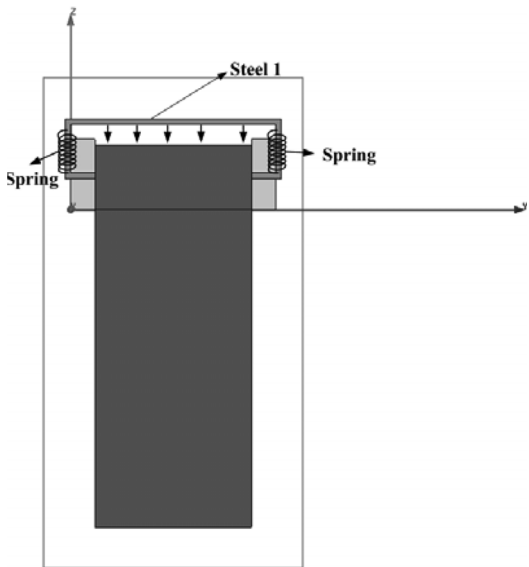


Fig. 3. Force direction after Over Current Breaker Operation.

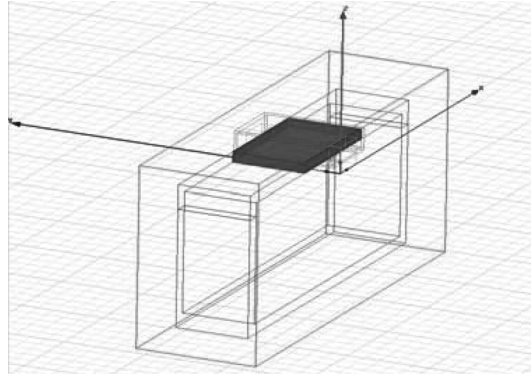


Fig. 4. Force Analysis Modeling Selection.

steel 영역에서 자속은 반시계 방향의 path를 따라 이동( $\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$ )한다. 이 자계의 방향과 전류의 인가 방향이 curl에 의해서 힘의 방향을 결정한다 ( $F = \int_l d\vec{l} \times \vec{B}$ ). 분석결과 Fig. 5와 같이 DC 500~3,000A의 전류 인가에 따른 Z-Direction 작용 힘으로 Z-Direction으로 작용하는 힘은 전류의 크기에 비례한 것으로 분석되었다.

### 3.2. 시스템으로부터 Trip 유발가능성 분석

부하측으로 부터의 Trip 유발 가능성 검토를 수행하였다. 대부분의 부하가 Static 부하(정적부하)이며 발전소 정상 운전중 부하변동 가능성이 없는 것으로 분석되었다. TBN Turning Gear 등의 Dynamic 부하는 TBN 정지/기동시에만 부하변동 가능하며 관련 부하의 기동 또는 정지시 지락사고 발생 등으로 인한 과전류 유입 가능성이 있으나, 현재 발생하고 있는 Trip은 발전소 정상 운전중에 발생하

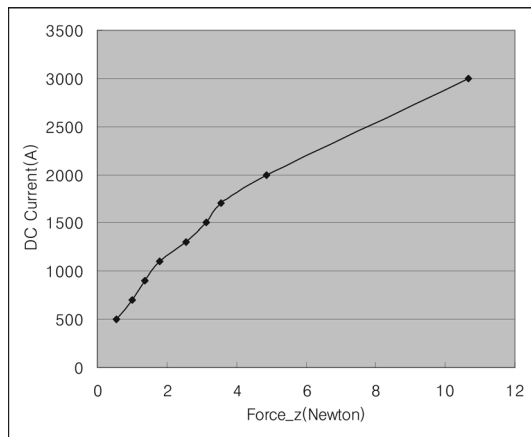


Fig. 5. Z-direction force Following current.

고 있으므로 이로 인한 과전류 유입 가능성은 희박한 것으로 판단된다. 또한, DC 125V BUS 지락 발생에 의한 과전류 유발 가능성을 검토하였다. M/N계열 모두 지락 모니터링 시스템에 검출된 정보 등의 내용이 없는 점으로 미루어 DC 모선의 순간적인 접지에 의한 Trip 가능성은 적은 것으로 분석되었다.

### 3.3. 충전기/인버터 결함 가능성 분석

#### 가. 충전기 출력측(DC 차단기 전단) 전류 파형 측정

측정장비(테베트론 DEWE-5000-PNK)의 트리거 포인트를 1,000A로 설정 후 트리거 된 상기의 데이터를 분석한 결과 Table 1과 같이 전류의 크기는 최대 5,000A가 넘게 측정되었으나 차단기 동작에 필요한 지속 시간이 매우 짧은 관계로 상기의 트리거된 전류신호에 의해서는 차단기가 동작할 수 없는 것으로 분석되었다. 차단기 시험결과 차단기가 Trip되기 위해서는 1,400~3,600A 사이의 전류가 200~13msec 동안 차단기에 유입되어야 Trip되는 것으로 분석되었다.

#### 나. 충전기 정류기 입력 및 출력 전류 파형 분석

측정파형 크기 분석결과 Fig. 7과 같이 트리거 순간 전류 크기는 5,174A(정상 부하전류(200A)의 약 25배), 과도전류 지속시간 0.22ms, 출력전압 : 125V 이었다. 측정파형 형태 분석결과 R상의 정류기 입

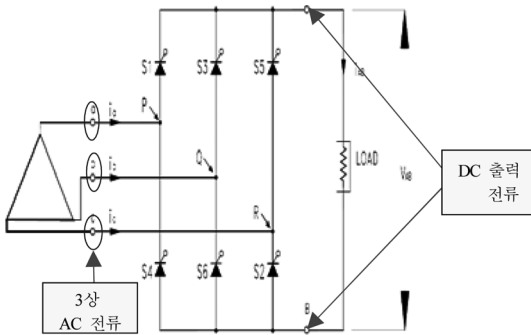


Fig. 6. Schematic diagram of 3 Phase frequency Control Circuit.

Table 1. Analysis result of triggered current

트리거데이터	전압(V)	전류(A)	dt(지속시간)
2008.04.03	125.7	1080	0.28ms
2008.05.07	125.8	2836	0.20ms
2008.05.21	125.8	4569	0.37ms
2008.06.27	125.8	5174	0.22ms



Fig. 7. Result of Charger rectifier Wave analysis.

력전류에 고조파 성분이 많이 포함되어 있다. 고조파의 발생원인은 충전기 및 인버터의 스위칭 동작에 의한 것으로 판단된다. 정류기 위상각 제어 기능의 순간적 제어불량으로 상간 단락현상이 발생하고 있는 것으로 보이며, 이러한 과도현상이 13ms 이상 지속시 충전기 차단기를 Trip시킬 수 있다고 분석되었다.

### 3.4. 충전기/인버터 성능기준 설정 및 관리

기능분석 및 안전기능 선정은 계통설비의 성능을 감시하고 정비효과를 측정하기 위해서는 계통의 기능을 분석하여 그중에서 어느 기능을 관리 대상으로 할 것인가를 결정하는 것이다. 정비효과 감시 프로그램 수립을 위한 일반 지침인 NUMARC 93-01에 의하면 계통의 기능은 설계문서를 참조하여 분석하고, Table 2의 판단기준을 적용하여 관리대상 여부를 결정한다. 예를 들면, 분석된 기능이 설계기준 사고시 ‘원자로냉각재 압력경계 건전성유지’에 기여한다고 판단되면 성능기준을 세우는 대상으로 결정하는 것이다<sup>5)</sup>.

Table 2. Criteria of Safety Related or Non-Safety Related Function

계통 유형	판단 기준	판단 기준 정의
안전 관련 계통	SR1	원자로 냉각재 압력경계 건전성 유지기능
	SR2	원자로를 정지시키고 안전정지 상태 유지기능
	SR3	소의 방사능 누출을 유발할 수 있는 사고의 결과를 완화하거나 방지하는 기능
비안전 관련 계통	NSR1	안전성분석보고서에 기술된 사고나 과도상태를 완화시키는데 필요한 비 안전관련 기능
	NSR2	비상운전절차서에 사용되는 중요한 비 안전관련 기능
	NSR3	고장이 발생할 경우 안전관련 설비의 안전기능 수행을 저해하는 비 안전관련 기능
	NSR4	고장이 발생할 경우 원자로 불시정지나 안전계통의 동작을 초래하는 비 안전관련 기능

Table 3. Result of Changer Function Definition

기능명	안전기능	S R 1	S R 2	S R 3	N S R 1	N S R 2	N S R 3	N S R 4	관리대상	분석내용
비안전등급 충전기에서 125V/250V급 모션전원 공급 기능	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	배터리 충전기를 통하여 비안전등급모션에 전력공급기능

Table 4. Reliability Performance Criteria of Changer

기능명	기능고장 정의	RPC
비안전등급 125V/250V급 충전기 기능	비안전등급 모션에 전원을 공급할 수 없는 충전기의 모든 고장은 기능고장이다.	3회

상기 Table 2를 근거로 직류전원계통에 대한 기능을 검토하였으며 충전기에 대한 기능은 Table 3과 같이 비안전등급 충전기에서 125V/250V급 모션전원 공급 기능으로 분류되었다.

직류계통에 대한 정비규정 안전중요도 분석결과 안전등급 관련기능은 고안전중요도이며 비안전등급 관련기능은 저안전중요도로 분류되었다.

충전기에 대한 성능기준은 기기고장률을 사용하여 Table 4와 같이 계획예방정비 2주기(3년)당 3회로 설정하였으며, 3회 이상 기기고장발생시 예방정비활동 강화, 및 충전기 교체를 통하여 신뢰도를 향상 시켜야 한다<sup>6)</sup>.

#### 4. 결론

본 연구에서는 충전기 출력측 차단기의 간헐적 Trip 원인을 분석한 결과 차단기 자체의 결함은 발견할 수 없었으며, 인버터 및 부하 등의 관련 계통으로부터 차단기 트립 신호 유발 가능성도 매우 낮

은 것으로 분석되었다. 또한, 충전기 정류기 입/출력 파형을 분석한 결과 정류기 위상각 제어 불량으로 인한 순간적인 상간 단락현상이 빈번하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 순간적인 단락현상은 대부분 제어카드의 보호기능에 의해 정류기에 손상을 초래하지 않고 복구되나 제어회로가 감당할 수 없을 정도의 순간적인 서지 및 노이즈 유입시에는 차단기 트립을 유발할 수 있는 것으로 판단된다. 신뢰도 향상방안으로 충전기 및 인버터의 스위칭 노이즈 차단 필요하며 정류기 전·후단에 충전기 및 인버터의 스위칭 노이즈를 흡수/차단할 수 있는 바리스터 등의 Surge Absorber 회로 추가 설치한 것으로 필요한 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- 1) Korea Electric Power Corporation, "Reliability, Availability and Maintainability For KNGR", pp. 226 ~ 228, 1999.
- 2) 한국수력원자력(주), "영광1,2호기 계통교육교재 Rev 0", 2007. 1.
- 3) Risk-informed evaluation of extensions to AC electrical power system completion times, WCAP-15622.
- 4) 원자력발전기술원 기술교류활동보고서, "충전기 문제점 도출 및 설비 신뢰도 프로세스를 고려한 해결방안 제시", 2009.
- 5) Nuclear Management and Resources Council, NUMARC 93-01, Rev.3, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, Rev.2", 2000. 7.
- 6) EPRI Technical Bulletin 97-03-01 "Monitoring Reliability for Maintenance Rule", 1997. 3.