플랜트 저널 제12권 제4호(2016) / pp. 37-43

1400MW급 경수로형 원자력발전소의 대용량 유도전동기 시동시 안전관련 모선 전압 변동

이청준*†, 김창국**, 노영석***, 주영환****
한국전력기술(주), 전기기술그룹(원자력)

Safety-Related Bus Voltage Variation during Large Induction Motor Start-up in 1400MW Light Water Reactor Type Nuclear Power Plant

Cheoung Joon Lee*†, Chang Kook Kim**, Young Seok Noh***, Young Hwan Joo****
KEPCO Engineering and Construction, Electrical Department (Nuclear)

(Received Oct. 1, 2016; Revised Nov. 2, 2016; Accepted Dec. 3, 2016)

ABSTRACT : Power system which provides electricity to the accident mitigation load for nuclear power plant should be verified to maintain the proper voltage level under the various loading and source conditions. For this purpose, it was needed to collect the voltage data of safety related buses during operation of the Reactor Coolant Pump(RCP) motor and Component Cooling Water Pump(CCWP) motor, respectively, under the certain loading condition of the plant. The data (such as, voltage, current, power factor) collected from actual measurement were used to modify the existing ETAP model and then the reanalysis was conducted to simulate the testing conditions. Through these actual measurement and analysis, it ensures that the existing electrical system analysis including assumptions and methods was conducted properly. Finally, the voltage of safety related buses was not dropped below the acceptable level, and the discrepancy between two results was within the limit.

초 록 : 원자력발전소의 사고 대처 부하에 전력을 공급하는 전원계통은 다양한 조건에서도 일정 전압이 유지됨을 분석을 통하여 입증한다. 이를 위하여 발전소를 일정부하 운전 상태로 유지하고, 대용량 전동기(원자로냉각재펌프(RCP), 기기냉각수펌프(CCWP))를 각각 기동하여 기동 전 · 후 안전관련 모선의 전압을 측정하였다. 현장 시험으로 확보된 자료(예, 전압, 전류, 역율 등)는 기존 전력계통해석 모델의 운전 조건으로 재입력하고 재분석을 수행하였다. 이는, 기존 전력계통분석에 사용된 분석기법과 가정들을 실질적인 측정과 결과 분석으로 입증하는 과정이다. 결국, 두 경우의 전압 강하는 발전소 안전에 중요한 기기의 전압이 허용전압 이하로 저하되지 않음과 두 값의 비교 결과가 요구되는 제한치 이내임을 검증한다.

Key words : APR1400(신형경수로 1,400), Undervoltage Relay(저전압계전기), 원자로냉각재펌프(RCP), 기기냉각수펌프(CCWP), Large Motor Starting Analysis(대용량 전동기 기동분석)

- 기호설명

MWe : 발전기 전기출력 단위
PU : 단위법 표기

† Corresponding author
trex@kepco-enc.com

1. 서 론

신형경수로1400(APR1400)인 신고리 원자력발전소 C, D호기는 발전기 출력 1,400MWe급이다. 이는 한국표준형 원자력발전소에(OPR1000)에 비해 전기출력은 40% 상승하였고, 원자로 관련 주기기의 설계수명은 60년으로 증가되어 건설을 완료하였으며, 현재 상업운전을 위한 기능시험을 수행하고 있다.

원자력발전소는 설계개념에 따라 "사고"를 가정하고, 이를 대비하기 위한 안전관련 설비가 마련되어 있으며, 전력계통도 이들 설비의 안전한 운영을 위한 지원설비로서 다양성, 독립성이 적용되어 설계가 수행된다. 원전의 전력계통은 크게 소외전력계통과 소내전력계통으로 나뉘는데, 소외전력계통은 송전망과 연결되고 그로부터 송 · 수전의 역할을 담당한다. 소내전력계통은 발전기에서 생산한 전력 또는 송전망으로부터 수전한 전력을 소내부하들의 전압으로 변성하는 변압기와 배전계통으로 구성된다. 아울러 안전관련 소내전력계통은 소외전원상실과 같은 비상시를 대비한 비상디젤발전기의 전력을 중요기기에 공급하는 역할도 수행한다.

소내전력계통은 원자로안전관련 여부에 따라 안전관련 전력계통(Class 1E 또는 1E)과 비안전관련 전력계통(Non-Class 1E 또는 N-1E)으로 구분하고, 다양한 운전조건에서 전력조류(Load Flow), 고장전류계산, 전동기기동분석, 등의 전력계통해석을 수행한다. 본 사례연구는 신고리 C호기 소내전력계통을 일정부하 운전 상태로 유지하고 비안전관련 대용량 유도전동기에 해당하는 원자로냉각재펌프(RCP; Reactor Coolant Pump)와 안전관련 대용량 유도전동기인 기기냉각수펌프(CCWP; Component Cooling Water Pump)를 각각 기동하여 각 경우에 대하여 안전관련 모선의 전압 변동을 기록하고, 현장의 시험조건을 전력계통해석 프로그램을 이용 재분석을 수행하고, 두 경우의 전압 강하가 발전소 안전에 중요한 기기의 허용전압 이하로 저하되지 않음과 두 값의 비교결과가 요구되는 제한치 이내임을 검증한다. 이는 기존 전력계통분석에 사용된 분석기법과 가정들을 실질적인 측정과 재분석을 통해 입증하는 과정이다.

2. 본 론

2.1 규제요건, 산업규격 및 표준

신고리 원자력발전소는 전기출력 1,400MWe 동일용량 2개 호기로 구성되고, 각 호기당 터빈/발전기계통의 보증된 출력은 1,455MWe으로 정격 운전된다. 발전소 건설 및 운영의 규제기준은 미국 원자력규제위원회의 규제지침서, Generic Letter, Bulletin 및 표준심사지침(NUREG-0800)을 준수하며, 설계는 과기부 고시 제 2000-17호 "전력산업기술기준의 원자로 실설 기술기준 적용에 관한 지침"과 제2002-21호 "원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정"에 따라 2001년 12월 31일 유효한 전력기술기준 2000년판을 적용하였고, 해외구매 품목은 전력산업기술기준의 참조기준을 적용하여 건설하였다.

2.2 소내전력계통

발전소 소내전력계통은 주발전기, 발전기차단기, 주변압기, 소내보조변압기(UAT), 대기보조변압기(SAT), 안전관련 비상디젤발전기(Class-1E), 대체교류발전기(AAC DG), 비안전관련 디젤발전기, 축전지 등의 전원 장치와 13.8kV, 4.16kV 및 480V의 교류배전계통, 직류 및 계측제어전원계통으로 구성된다.

정상운전조건하에서 발전소 보조전력은 주발전기, 상분리모선, 발전기차단기 및 소내보조변압기를 통하여 공급

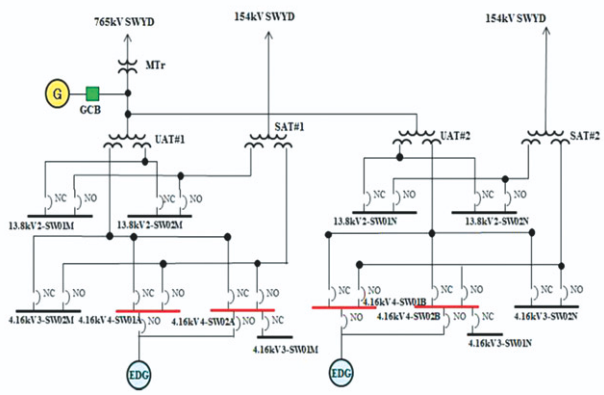


Fig. 1 Simplified One Line Diagram for Medium voltage and Power Source [1]

Table 1 Estimated Onsite Power System Loading During Normal Plant Operation

구 분	유효용량 (MW)	무효용량 (Mvar)	비 고
총부하량	91.9	62.0	≈110MVA
계열 1	48.1	31.9	
계열 2	43.8	30.1	

받고(Fig. 1 참조), 기동과 운전정지 동안에는 발전기차단기를 개방하고, 소외로부터 주변압기, 소내보조변압기(우선전력공급원-1)를 통해 공급받는다. 주변압기와 소내보조변압기 구간의 고장 시에는 대기보조변압기(우선전력공급원-2)를 통해 전력을 공급받는다. 소외전원이 모두 이용불가능한 경우를 대비하여 발전소 안전정지부하에 전력을 공급하는 비상디젤발전기가 있으며, 비상디젤발전기 이용불능에 대비한 대체교류발전기가 구비되어 있다. 정상운전동안 소내전력계통의 운전부하용량과 소내변압기 특성은 Table 1, 2와 같다.

안전관련 모선(Fig. 1 붉은 색 표기 모선)에는 전압저하와 전압상실 상태의 감시 및 보호체계가 구비되어 있으며, 이들 보호 방식은 KEPIC ENB 5000과 Branch Technical Position(BTP) PSB-1 "Adequacy of Station Electric Distribution System Voltages"의 권고를 따르며, 저전압 설정치와 시지연 선정은 모든 소내배전계통에서 안전관련 부하의 전압요건을 분석하여 결정된다. 전압상실을 감지하는 1단계 저전압계전기와 전압저하를 감지하는 2단계 저전압계전기는 각 모선별로 4개씩 설치되어 기기제어계통 내 2/4 동시 논리로 입력되어 비상디젤발전기를 기동시키고 순차적 부하투입이 시작된다.

Table 3 Electrical Specification for RCPM and CCWPM

구 분	RCPM	CCWPM	비 고
정격용량	13,500HP (10,068kW)	1,408HP (1,050kW)	
정격전압	13.2kV	4kV	
정격전류	527A	185.5A	
역율	87%	84%	
효율	96%	95%	
기동시간	12.5초	3초	
기동전류	6.5PU	6.5PU	

Table 2 Onsite Transformer Characteristics (UAT and SAT)

구 분	UAT	SAT
형식	3상, 3권선	3상, 3권선
결선	△-Y-Y	Y-△-Y-Y
전압	24/14.49/4.37 kV	154/13.8/4.16kV
OLTC	(+8)~기준~(-8)	(+8)~기준~(-8)
용량*	58.0MVA	56.0MVA
임피던스	Z_{HX} 11.5% Z_{HY} 31% Z_{XY} 42.5%	Z_{HX} 11.0% Z_{HY} 31.5% Z_{XY} 42.5%

* ONAN, 55℃온도상승 기준 용량.

본 연구와 관련한 전압저하도 4개의 저전압계전기, 2/4 동시 논리와 시지연(4분)은 연결된 안전급 부하가 손상 받지 않도록 제한하며, 저전압계전기의 정정은 옥외변전소 최소 전압으로 안전급 부하를 적절하게 동작시키는 최소 전압 이상의 크기로 설정한다. 아울러 전압분석은 BTP PSB-1에 따라 수행되고, 그 결과는 동 기준 4절에 기술된 시험에 의하여 검증하도록 하고 있다.

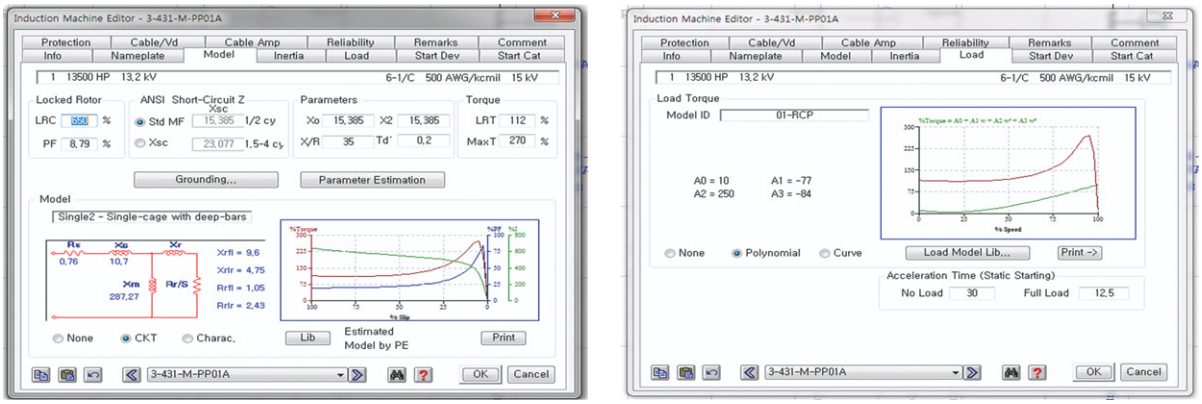
2.3 소내전력계통해석

소내전력계통의 구성 요소는 발전기, 변압기, 모선, 차단기, 케이블과 각 종 전동기를 포함한 수천 개의 부하들로 이루어진 대규모 계통이며, 발전소 운전 상태에 따라 정상운전, 발전소 기동, 발전기 정지 후 냉각재상실사고, 고온대기, 소외전원상실 및 교류전원완전상실 조건 별 전원의 배열 상태를 고려하여 보수적으로 평가된 9가지 경우에 대하여 ETAP 해석프로그램을 이용하여 전력계통해석(예, 전력조류, 고장전류계산, 전동기기동, 등)을 수행한다.

소내전력계통해석의 목적은 이를 통하여 개별 모선과 케이블들의 정상과 고장 시 허용용량이 초과되지 않음과, 각 모선의 전압이 허용범위를 유지하는지 확인하는 것이다. 아울러, 2단계 저전압계전기의 정정기준이 되는 안전관련 최저 전압모선들을 판별 한다.

2.3.1 대용량 전동기 모델링

원자력발전소의 부하 특성 상 대용량전동기 기동 분석은 비안전관련 모선의 단일 최대용량인 원자로냉각재펌프를



(a) Motor Modeling

(b) Load Modeling

Fig. 2 Modeling for Reactor Coolant Pump Motor (a) Motor Modeling (b) Load Modeling

대상으로 수행되나, 본 시험에서는 안전관련 모선의 최대 용량인 기기냉각수펌프도 대상으로 포함하였으며 각 전동기의 특성은 Table 3과 같다.

국내 원자력발전소의 전동기는 직입기동방식을 채택하고 있어, 전동기 기동 시 정격전류 대비 6~8배의 기동전류가 유입된다. 이에 대용량 전동기 기동 중 해당 모선과 연계된 저압 모선의 전압과 안전관련 모선의 전압이 감소하므로 이의 적절성 평가를 위하여 전동기기동 분석을 필수적으로 수행한다. ETAP을 이용한 전동기 모델링은 Fig. 2와 같다.

2.3.2 대용량 전동기 기동분석 결과

원자로냉각재펌프 기동분석은 다양한 전원과 최소 전압조건으로 가장 보수적일 결과가 도출되도록 전동기 기동분석이 수행된다. 아래에 소개한 분석은 실증 시험과 유사하게 발전기차단기는 개방하고 소외전원(765kV)으로부터 주변압기와 소내보조변압기를 통하여 전원을 공급받고, 부하 상태는 발전소 기동조건(Table 4 참조)으로 모사한 결과이며, 전동기 기동 중 안전관련 최저전압 모선의 전압 변동 결과는 Table 5와 같다.

2.4 대용량 전동기기동 실증 시험과 분석

안전성분석보고서 인가 사항에 따라 전압분석에 사용된 분석 기법과 가정들을 실질적인 측정을 통해 입증하기 위하여 부하조건과 측정변수, 개소가 포함된 절차서를 작성하였고, 이에 따라 실증 시험을 수행하였다. 또한, 기존 ETAP 프로그램 모델을 실증 시험 조건과 동일한 상태로 운전 조건을 수정한 재분석 결과가 규제기준이 제시한 제한치 이내임을 입증하여야 한다.

Table 4 Loading Condition before Motor Starting

구 분	유효용량 (MW)	무효용량 (Mvar)	비 고
총부하량	74.3	48.6	≈88.7MVA
계열 1	35.9	23.1	
계열 2	38.4	25.5	

Table 5 Voltage of the Lowest Safety Related Buses Distinguished during Motor Starting

모 선	기준전압	분석전압	허용기준
4.16kV-02A	4,160V	4,043V (97.2%)	3,120V (75%)
480V-LC02A	480V	452V (94.3%)	360V (75%)
480V-MC06A	480V	440V (91.8%)	360V (75%)

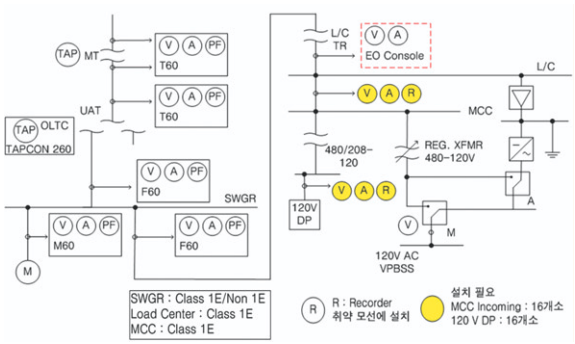


Fig. 3 Simplified Diagram for Actual Measurement Parameter and Location

2.4.1 실증 시험

실증시험의 목적은 소내부하 30% 이상에서 전압분석에 사용될 발전소 운전 상태 변수(변압기 탭 위치/전압/전류/역율, 고압모선별 전압/전류/역율, 안전급 저압 모선별 전압/전류 등)를 측정하고 자료 확보를 목표로 한다.

발전소 부하 30% 이상 운전 조건은 정상운전 중 소내부하 110MVA 기준으로 약 33MVA 이상에 해당하며, 주제어실 지시계로 이를 확인하고, 전동기 기동 전,후 Fig. 3의 주요 측정 위치별 변수를 측정하도록 하였다. 아울러 대용량 전동기 기동 중 최저 전압 모선으로 분류된 안전관련 모선의 전압을 측정하였다.

시험 전 발전소 운전 현황과 전압은 Table 6, 7과 같다. MCC의 전압이 더 높게 측정된 사유는 분석과 달리 동시 측정이 불가능하고, 발전소 운전 조건이 약간 변동된 것으로 추정된다.

동일 모선(13.8kV-1M)의 다른 원자로냉각재펌프가 운전 중인 상태에서 제2의 원자로냉각재펌프 전동기 기동 후

Table 6 Test Conditions before Motor Starting

모선		실측		역율	비고 (전동기)
계열	모선	전압 (kV)	전류 (A)		
1	13.8kV-01M	13.5	450	0.85	RCP
	13.8kV-02M	13.6	315	0.77	Chiller
	4.16kV-02M	4.14	192	0.94	TGBCCW
	4.16kV-01A	4.13	168	0.87	ESWP
	4.16kV-02A	4.13	258	0.88	CCWP
	4.16kV-01M	4.14	44	0.85	Chilled PP
2	13.8kV-01N	13.5	13	0.96	L/C
	13.8kV-02N	13.5	500	0.69	CWP
	4.16kV-02N	4.14	192	0.94	TGBCCW
	4.16kV-01B	4.06	488	0.87	ESW CCW CCP SIP
	4.16kV-02B	4.06	259	0.90	CCW
	4.16kV-01N	4.06	55	0.88	Chiller

Table 7 Actual Bus Voltage Level Before Motor Starting

모선	기준전압	측정전압	허용기준
소외전압	765kV	765kV (100%)	-
4.16kV-02A	4,160V	4,143V (99.6%)	3,744V (90%)
480V-LC02A	480V	477V (99.4%)	432V (90%)
480V-MC06A	480V	480V (100%)	432V (90%)

Table 8 Voltage of the Lowest Safety Related Buses after RCP Motor Starting

모선	기준전압	측정전압	허용기준
4.16kV-02A	4,160V	4,124V (99.1%)	3,744V (90%)
480V-LC02A	480V	462V (96.3%)	432V (90%)
480V-MC06A	480V	457V (95.2%)	432V (90%)

Table 9 Voltage of the Lowest Safety Related Buses after CCWP Motor Starting

모선	기준전압	측정전압	허용기준
4.16kV-02A	4,160V	4,167V (100.2%)	3,744V (90%)
480V-LC02A	480V	483V (100.6%)	432V (90%)
480-MC06A	480V	480V (100%)	432V (90%)

최전 전압 모선의 측정결과는 Table 8과 같다.

동일한 조건에서 안전관련 모선의 기기냉각수펌프 추가 기동 후 최저 전압 모선의 전압은 Table 9와 같이 적정하게 유지 되었다.

전동기 기동 중 전압강하 기록 자료는 판독성이 부족하여 변동 폭을 확인할 수 없었지만, 대용량 전동기 기동 중 고압 안전관련 모선과 비안전관련 모선의 저전압 경보는 발생하지 않았다. 단, 원자로냉각재펌프가 연결된 저압 모선의 부하에서 저전압(설정치 90%, 시지연 10초) 경보가 발생하였다.

2.4.2 실증 시험 결과 분석

전동기기동 실증 시험과정에서 확보된 부하 운전 자료와 소외 전압을 기존 ETAP 모델의 운전조건을 조정하여 실증 시험과 동일한 절차에 따라 전동기 기동분석을 수행하였다. 시험 조건은 Table 10, 11과 같으며 분석 결과는 측정전압과 분석전압의 차가 식 [1]을 만족하여야 한다.

$$\text{허용전압차}(\%) = \left(\frac{\text{측정전압}}{\text{분석전압}} - 1 \right) \times 100 \rangle -3\% \qquad (1)$$

원자로냉각재펌프 전동기를 기동 후 전압분석결과는 Table 12와 같으며, 기동 시 분석 전압추이는 Fig. 4와 같이 원자로냉각재펌프 전동기 단자전압이 정격전압의 86.9% 까지 강하하는 것으로 분석되었다(Fig. 4 참조). 그러나 전력계통의 구성 상 안전관련 최저 모선 전압은 크게 변동이 없음을 확인하였다.

동일한 조건에서 기기냉각수펌프 전동기를 기동하였으며, Table 13과 같이 기동 후 전압은 적절하게 회복되었으나, 기동 중 저압모선 전압이 93.2%까지 강하하였다(Fig. 5 참조). 이는 원자로냉각재펌프 전동기와 달리 안전모선에서 직결된 전동기임을 고려할 때 예상된 결과이며, 기동 시 안전모선의 전압 강하는 전동기 기동 완료 후 적정한 수준으로 회복됨을 확인하였다.

3. 결 론

대용량 유도전동기 기동 중 안전관련 고압/저압 모선의 전압 변동에 대한 현장실증과 이를 재분석한 결과, 전동기 기동완료 후 전압이 적정하게 회복되었음과 이 상태가 유지됨을 확인하였다. 또한, 두 경우의 전압차가 규제기준에서 제시한 기준을 만족하는 것으로 평가되었다. 이를 통하

Table 10 Simulated Operating Loads based on Actual Measurement Before Motor Starting

구 분	용 량 (MW)	무효전력 (Mvar)	역 율 (%)
시험 전 총 운전부하	39.9	27.7	82.1
안전관련 운전부하	7.2	4.1	86.4
비안전관련 운전부하	32.7	23.6	81.1

Table 11 Voltage of the Lowest Safety Related Buses Before Motor Starting

모 선	측정전압	분석전압	전압차
4.16kV-02A	4,143V (99.6%)	4,127V (99.2%)	0.4%
480V-LC02A	477V (99.4%)	470V (97.9%)	1.5%
480V-MC06A	480V (100%)	469V (97.7%)	2.3%

Table 12 Voltage of the Lowest Safety Related Buses after RCP Motor Starting

모 선	측정전압	분석전압	전압차
4.16kV-02A	4,167V (100.1%)	4,124V (99.1%)	1.0%
480V-LC02A	483V (100.6%)	469V (97.7%)	2.9%
480V-MC06A	480V (100%)	466V (97.0%)	3.0%

Table 13 Voltage of the Lowest Safety Related Buses after CCWP Motor Starting

모 선	측정전압	분석전압	전압차
4.16kV-02A	4,124V (99.1%)	4,108V (98.7%)	0.4%
480V-LC02A	462V (96.2%)	467V (97.2%)	-1.0%
480V-MC06A	457V (95.2%)	467V (97.2%)	-2%

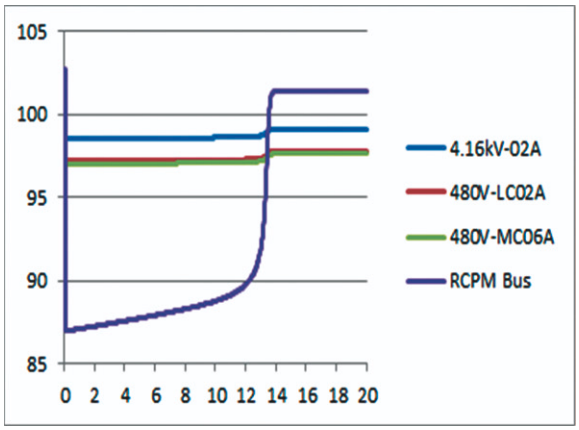


Fig. 4 Voltage Variation during RCP Motor Starting

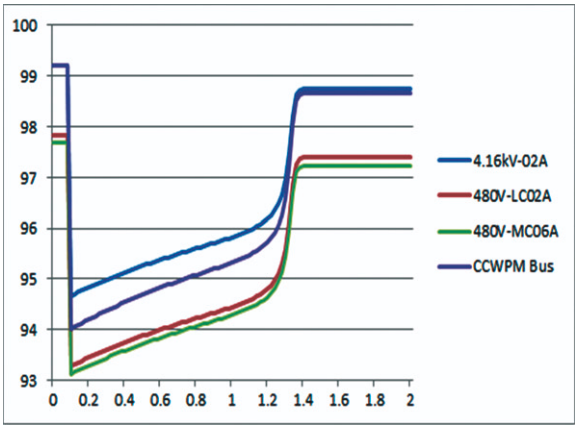


Fig. 5 Voltage Variation and CCWP Motor Starting

여 전력계통해석에 적용된 가정 사항들과 방법들이 적절하게 적용되었고 사고에 대비한 원자력발전소 전력계통의 설계와 안전한 운전에 대한 신뢰도를 확보할 수 있는 사례로 판단된다.

감사의 글

본 사례 연구는 한국수력원자력(주) 신고리 원자력발전소의 지원으로 이루어졌으며 참여하신 모든 분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Park Hyun Shin, Ju Woon Pyo, Lim Jang Hyun, Kim Moon Young, Kin In Yong, Janh Hong Seok, Kim Dae Sik, Lee Jae Do, Moon Su Cheol, Oh Sung Kyun, Lee Kil Soo, 2004, "Simulated analysis and Performance evaluation of power system at the beyond the design basis accident", KINS/RR-1122, KINS
2. "Study for Nuclear Safety Regulatory 2014-2015", KINS/RR-1123, Vol. 2, KINS, pp. 20.
3. US NRC, NUREG-0800, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plant", Chapter 8 Electrical System.
4. US NRC, NUREG-0800, Charter 8 Electrical System, Appendix A, Branch Technical Position PSB-1, "Adequacy of Station Electric Distribution System Voltages", Rev.0, 1981, pp. 8A-13~8A.16.
5. US NRC, NUREG-0800, Charter 8 Electrical System, Branch Technical Position(BTP) 8-6, "Adequacy of Station Electric Distribution System Voltages", Rev.3, 2007
6. IEEE Std. 399-1997, "IEEE Recommended Practice Industrial and Commercial Power System Analysis."