

원자력발전소 변압기 연결 선로 결상 검출 시스템

Open-Phase Condition Detecting System for Transformer Connected Power Line in Nuclear Power Plant

하 체 웅* · 이 도 환*
(Che-Wung Ha · Do-Hwan Lee)

Abstract - On January 30, 2012 an auxiliary component of Byron Unit 2 was tripped on bus under voltage. The cause of the event was the failure of the C-phase insulator track for the Unit 2 station auxiliary transformer(SAT) revenue metering transformer. In addition to this event, other events have occurred at other plants resulting in an open-phase condition.[1] Therefore, Nuclear Regulatory Commission(NRC) has requested that not only nuclear power plant(NPP) operating company but also its Design Certification(DC) applicant have to prepare open-phase detecting system in their operating plants and design document.

In this paper, various open-phase conditions are simulated in NPP using Electromagnetic Transient Program(EMTP) and Atpdraw, and open-phase condition detecting system is proposed for Main Transformer(MT), Unit Auxiliary Transformer(UAT) and SAT connected power line in NPP.

Key Words : Open-phase Condition, Nuclear Power Plant, Electromagnetic Transient Program, Transformer

1. 서 론

최근 미국 원자력발전소에서는 발전소와 연결되어 있는 소외전원에서 1상이 상실되는 사건이 다수 발생하였다. 사건 발생이 즉시 파악되지 않는 경우도 있었으며, 발전소 대처가 적절하지 않은 경우도 있었다. 이에 따라 NRC에서는 원전 사업자에게 보완 대책을 요구하고 있으며 현재 국내에서 진행 중인 Advanced Power Reactor(APR) 1400 Nuclear Regulatory Commission(NRC) Design Certification(DC) 취득을 위한 Design Control Document(DCD)에도 변압기에 연결되어 있는 소외전원에서 결상이 발생한 경우 이를 검출 및 문제회선을 격리하여 계통을 보호하거나 경보를 운전원에게 전달할 수 있는 시스템을 구축하는 내용을 포함하라고 하고 있다. 이와 관련하여 현재 Duke Energy 및 Exelon 등 미국 원전 관련 회사와 Electric Power Research Institute(EPRI)등에서 대책을 검토하고 있는 중이다.

본 논문에서는 전 세계적으로 전력계통 과도해석 프로그램으로 신뢰성이 검증되어 있는 Electromagnetic Transient Program(EMTP) 및 Atpdraw 프로그램을 이용하여 원자력발전소 내 주, 보조 및 대기 변압기 연결 소외전원 선로에서의 결상이 발생했을 때의

현상과 이를 해결할 수 있는 시스템을 제시하였다. 이를 위하여 원자력발전소 내 중요한 설비인 발전기, 주, 보조, 대기변압기 및 전동기 부하를 모델링 하였고, 해외 사례처럼 변압기에서의 결상이 전동기 부하에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해외 원전 스위치야드 결상 사건 발생 및 주요 이슈

2.1 해외 사례

NRC Information Notice 2012-03에 보면 해외 원자력발전소 내 스위치 야드에서 결상 사례에 대해서 소개하고 있으며 개략적인 사건 개요는 다음과 같다.

- Byron Station, Unit 2 : 2012.1.30. 전출력 운전 중 6.9kV 모선 저전압에 의한 Reactor Coolant Pump(RCP) B, C 정지로 원자로가 정지되는 사건이 발생하였다. 원인은 그림 1과 같이 소외전원 C상 상실이었으며 RCP A, D도 전압 불평형으로 정지되어 모든 RCP가 정지되었다. 그림 2는 현장에 파손된 채 발견된 애자의 사진을 나타낸 것이다. 소외전원 1상 상실로 인한 A,B상 전압 불평형 상태에서 Engineered Safety Feature(ESF) 모선 A, B에 전압이 공급되고 있었으며, 원자로 정지 8분 후 소외전원 1상 상실을 알게 되었다. 이에 따라 해당 보조변압기를 차단함으로써 Emergency Diesel Generator(EDG)가 자동 기동되었다. 이해를 돕기 위해서 해당 발전소 단선도를 그림 3과 같이 나타내었다.

† Corresponding Author : Licensing Team for APR1400 DC, Advanced Reactors Development Lab. KHNP Central Research Institute, Korea

E-mail:hachewung@khnp.co.kr

* Licensing Team for APR1400 DC, Advanced Reactors Development Lab. KHNP Central Research Institute, Korea

Received : August 19, 2014; Accepted : January 15, 2015

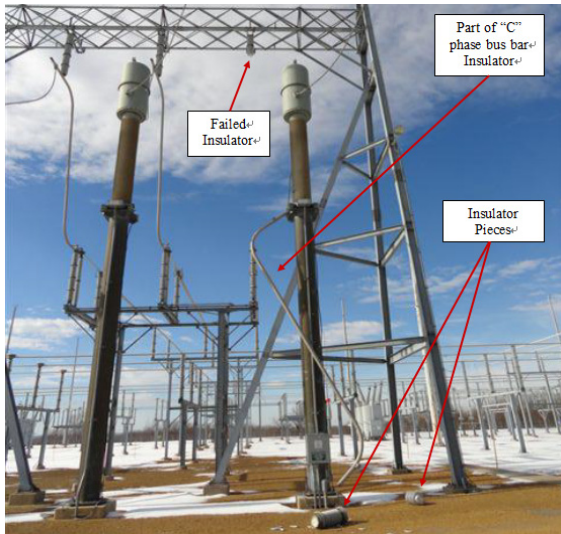


그림 1 Byron 발전소 스위치야드 결상 사건 발생 현장
Fig. 1 Loss of Phase Event at Byron Station



그림 2 파손된 애자
Fig. 2 Broken Insulator

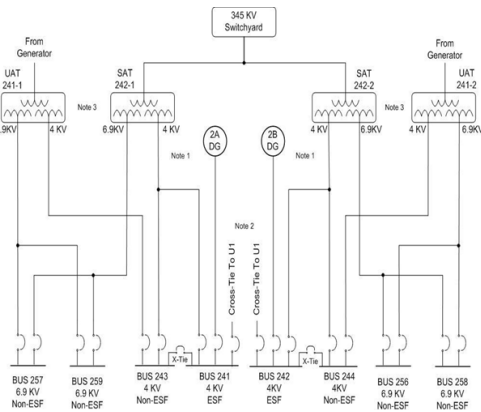


그림 3 Byron 발전소 내 주요 단선도
Fig. 3 Single Line Power Distribution Diagram

○ Beaver Vally Power Station, Unit 1 : 2007.11.27. 스위치야드 점검 중 138kV 회로 A Train에서 A상 절연체 손상이 발견되어 해당 트레인 운전불능이 선언되었다. 조사 결과 고장은 발견되기 26일 전에 발생 된 것으로 확인되었다.

○ James A. Fitz Patrick Nuclear Power and Nine Mile Point, Unit 1 : 2005.12.5. 115kV 소외전원 A상 상실이 발견되었으며, 조사 결과 21일 전에 고장이 이미 발생했던 것으로 확인되었다.
○ 이외에도 요 몇 년 사이에 6건의 변압기연결선로에서 결상 사고가 발생한 것으로 확인되었다.

2.2 NRC 규제 현황

NRC는 소외전원 3상 중 1상 상실 감지 및 ESF 자동 대응 설계를 설명토록 각 발전소에 요구하였다.(NRC Bulletin 2012-01) 이에 대해 응답한 미국의 104개 원전 대부분은 소외전원 1상 상실 시 이를 감지하여 자동 대응하도록 설계되어 있지 않으나, 소외전원 완전 상실 시 ESF 모션을 차단하게 되어 있으므로 현 인허가 기준을 벗어나지 않는다고 답변하였다. NRC는 이에 대해 미국 원전의 소외전원 설계를 5개 유형으로 구분하고, 모든 유형에 대해 개선이 필요한 것으로 검토하였으며 다음과 같은 권고안을 제시하였다.[2]

- 소외전원 1상 상실을 감지할 수 있도록 설계 개선
- 발전소 정상 운전 중 최소 매주기 1회 ESF 모션에 공급되는 3상 소외전원의 가용성과 운전성을 감시하기 위한 절차서를 구비하고 점검해야 함

2.3 WANO 권고사항

World Association of Nuclear Operators(WANO) Lessons Learned을 통해서 발전소 관계자는 현재의 계통보호 시스템을 분석하여 소외전원 결상사건 발생 시 검출 및 계통 보호가 충분히 가능한지 검증이 필요하다고 하였고 만약 설계 결함이 발견되면 다음과 같은 조치가 필요하다고 하였다.[3]

- 소외전원 결상에 대해서 초기 조치가 필요한지 결정해야 함
- 발전소 운전자들에게 운전 중 결상 사건 발생 시 인지할 수 있도록 조치하고, 관련 절차를 발전소 운전자들에게 숙지시켜야 함
- 만약 결상 사건 발생 후 비상전원으로서의 자동절체가 실패했을 시 수동 절체 매뉴얼이 있는지 검증해야함

발전소 관계자는 장기적 시정조치를 통해 운전 중 소외전원 결상사건 발생 시 자동 검출 및 계통 보호가 가능하도록 해야 한다고 하였다.

3. 시뮬레이션 모델 및 모의 결과

3.1 EMTF 입력 모델

원자력발전소 내 변압기 연결 선로에서 결상이 발생했을 때 문제점과 그 대책을 마련하기 위하여 EMTF 및 Atpdraw 프로그

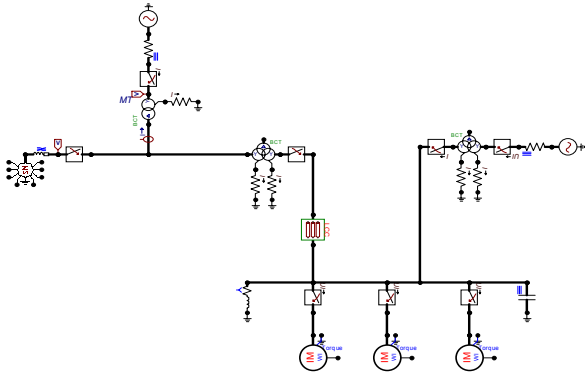


그림 4 EMTP를 이용한 원자력발전소 내 모의
Fig. 4 Simulation of Nuclear Power Plant using EMTP

램을 사용하여 가상의 원자력발전소를 모의 하였다. 즉, 발전기에 주변압기, 보조변압기 및 보조변압기가 연결되어 있고, 부하로는 3가지 종류의 유도 전동기를 모델링하였다. 따라서 그림 4와 같이 구축하고 각 변압기와 연결되어 있는 선로에서 결상이 발생했을 때의 전압과 전류 등을 비교 분석하였다. 참고로 발전기, 변압기, 전동기 등의 입력 자료는 현재 국내에서 운전하고 있는 발전소의 실제 데이터를 참고로 하였다.(표 1~7)

표 1 보조변압기 입력 데이터
Table 1 UAT Input Data

DATA	UNIT	VALUE	
Number of phase		3	
Number of windings		3	
Type of core		Other	
Test frequency	Hz	60	
L-L voltage	HV	22	
	LV	14.9	
	TV	4.47	
Power	HV	49	
	LV	32	
	TV	17	
connections	HV	Y	
	LV	Y	
	TV	D	
Open circuit (Positive sequence)	Volt	%	100
	Curr	%	0.13
	Loss	kW	37.983
Short circuit (Positive sequence)	Imp	%	8.77(HV-LV)
			29.12(HV-TV)
			39.54(LV-TV)
	Pow.	MVA	49(HV-LV)
			49(HV-TV)
	Loss	kW	51.989(HV-LV)
59.956(HV-TV)			
		0(LV-TV)	

표 2 대기변압기 입력 데이터
Table 2 SAT Input Data

DATA	UNIT	VALUE	
Number of phase		3	
Number of windings		3	
Type of core		Other	
Test frequency	Hz	60	
L-L voltage	HV	kV	345
	LV		13.8
	TV		4.16
Power	HV	MVA	50.4
	LV		38.7
	TV		21.3
connections	HV		Y
	LV		Y
	TV		D
Open circuit (Positive sequence)	Volt	%	100
	Curr	%	0.43
	Loss	kW	68.371
Short circuit (Positive sequence)	Imp	%	9.07(HV-LV)
			29.4(HV-TV)
			39.13(LV-TV)
	Pow.	MVA	45(HV-LV)
			45(HV-TV)
	Loss	kW	45(LV-TV)
43.2(HV-LV)			
		81.12(HV-TV)	
		170.542(LV-TV)	

표 3 주변압기 입력 데이터
Table 3 MT Input Data

DATA	UNIT	VALUE	
Number of phase		3	
Number of windings		2	
Type of core		Other	
Test frequency	Hz	60	
L-L voltage	HV	kV	345
	LV		23
Power	HV	MVA	353.3
	LV		353.3
connections	HV		Y
	LV		D
Open circuit (Positive sequence)	Volt	%	100
	Curr	%	0.12
	Loss	kW	132.359
Short circuit (Positive sequence)	Imp	%	15.86
	Pow.	MVA	353.3
	Loss	kW	2828

표 4 발전기 입력 데이터

Table 4 Generator Input Data

DATA	UNIT	VALUE	DATA	UNIT	VALUE
Volt	Volts	17062.7	Xd''	pu	0.374
Freq	Hz	60	Xq''	pu	0.374
Angle	Deg.	0	Tdo'	pu	7.5
Poles		4	Tqo'	pu	0.635
SMOVTRO		1	Tdo''	pu	0.041
SMOVTRQ		1	Tqo''	pu	0.05
RMVA	MVA	1284	Xo	pu	0.252
RkV	kV	22	RN	pu	0
AGLINE	Amps	1606	XN	pu	0
RA	pu	0.0624	XCAN	pu	0.15
XL	pu	0.15	HICO		7.636
Xd	pu	1.74	DSR		0
Xq	pu	1.64	DSD		0
Xd'	pu	0.436	FM		1
Xq'	pu	0.536	MECHUN		0

표 5 기동급수펌프 전동기 입력 데이터

Table 5 SFWP Motor Input Data

DATA	UNIT	VALUE
Frequency	Hz	60
Voltage L-L	kVrms	13.2
Power	hp	2100.5
Speed	rpm	3564
Power factor	cos	0.92
Efficiency	pu	0.95
Slip	%	1
Start curr.	pu	6.25
Start torque	pu	1
Load torque	pu	1
Max torque	pu	2.3
Cage factor		0

표 6 순환수 펌프 전동기 입력 데이터

Table 6 CWP Motor Input Data

DATA	UNIT	VALUE
Frequency	Hz	60
Voltage L-L	kVrms	13.2
Power	hp	1742.63
Speed	rpm	300
Power factor	cos	0.7
Efficiency	pu	0.95
Slip	%	1.33
Start curr.	pu	5.5
Start torque	pu	1
Load torque	pu	1
Max torque	pu	2.1
Cage factor		0

표 7 급수 펌프 전동기 입력 데이터

Table 7 FWP Motor Input Data

DATA	UNIT	VALUE
Frequency	Hz	60
Voltage L-L	kVrms	13.2
Power	hp	13500
Speed	rpm	1800
Power factor	cos	0.89
Efficiency	pu	0.96
Slip	%	0.005
Start curr.	pu	6.5
Start torque	pu	0.8
Load torque	pu	1
Max torque	pu	2.2
Cage factor		0

3.2 시뮬레이션 결과

그림 5와 같이 Y-Δ 형태로 연결된 변압기 선로 1차 측 A상에서 결상이 발생하였을 때 변압기의 결선이 V결선 형태로 되어 전압이 유지되기 때문에 변압기 2차 측에 전압강하가 크게 발생하지 않는다.(그림 6 참조) 그리고 IA=0이 되기 때문에 Y결선 변압기 중성선에는 IG=3IO=IB+IC가 흐르게 된다.(그림 8 참조)

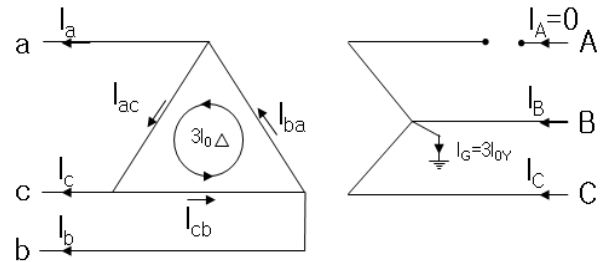


그림 5 Y-Δ 변압기 구성

Fig. 5 Y-Δ Transformer Configuration

본 논문에서는 지면상 대기변압기를 예로 시뮬레이션 결과 및 대책을 검토하였다. 그림 6은 대기변압기에 전동기가 연결되어 운전 중 0.5초 시점에서 결상이 발생했을 때 변압기 2차 측의 전압을 나타낸 것이다. 즉 정상상태 시에 C상 전압의 피크치가 11.267kV를 나타내고 있다가 결상이 발생했을 때 10.973kV로 낮아졌음을 알 수 있다.

특히 정상시에 대기변압기 2차 측이 개방되어 있기 때문에 무부하의 경우에는 11.267kV에서 11.220kV로 수십 V의 전압강하가 발생하게 된다. 하지만 그 수치변화가 너무 미미해서 두 경우 모두 부족전압 계전기로 결상이 발생했을 때 검출이 어렵다. 따라서 전압의 변화에 따른 검출보다는 변압기 1차 측에 봉싱형 변류기 등을 사용하여 전류의 변화를 검출하는 방법 등이 고려되

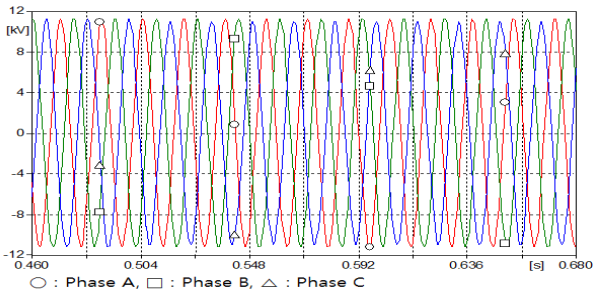


그림 6 대기변압기 1차 측 결상 발생 시 전압 파형
Fig. 6 Voltage Waveform of Standby Transformer upon Loss of Phase

고 있다.

대기변압기 2차 측이 연결되어 전동기에 흐르는 전류의 크기는 그림 7과 같이 111.93A에서 101.13A로 약 10% 낮아지고 그 외의 상은 더 크기가 커져 전류 불평형의 운전이 계속된다면 전동기 고장이 발생하여 최악의 경우 발전소 정지가 될 수도 있다. 하지만 대기변압기의 경우 변압기 2차 측 차단기가 개방이 되어 있는 도중에 1차 측 변압기 연결선로에서 결상이 발생하였을 경우 검출이 아예 불가능 하게 된다.

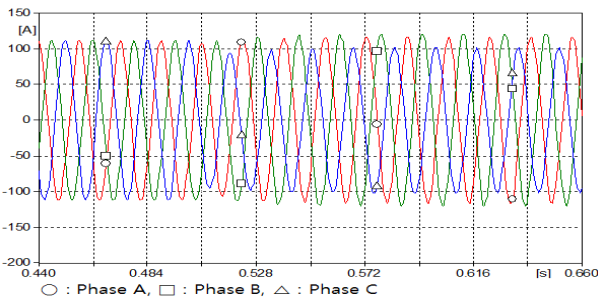
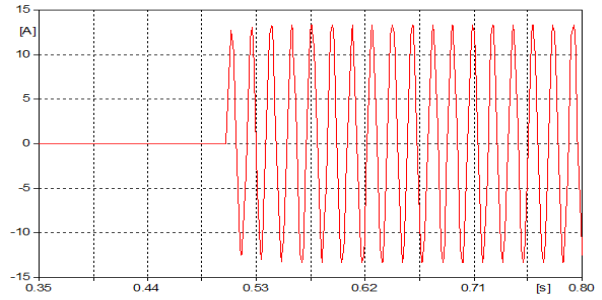


그림 7 전동기에 흐르는 불평형 전류 파형
Fig. 7 Waveform of Unbalanced Current to Motor

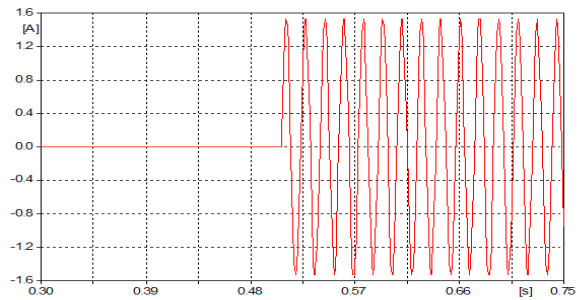
4. 원자력발전소 변압기 연결 선로 결상 검출 시스템

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 미국에서는 다양한 발전 회사들이 결상 검출 시스템을 구축하려 하고 있고, 관련 연구도 진행 중에 있다. 하지만 현재까지 적절한 대책이 제시되지 않고 있다. 본 논문에서는 현재의 시스템을 크게 변경시키지 않으면서 변압기 연결 선로에서 결상이 발생 했을 때 검출이 용이하고, 특히 대기변압기처럼 변압기 2차 측이 개방되어 있는 경우에도 1차 측 연결 선로 결상 검출이 가능하도록 하기 위해서 변압기 Y 결선 중성선에 로고스키 코일로 된 변류기를 연결하여 영상 전류 검출을 통해서 선로를 차단하거나 운전원들에게 연락하여 적절한 조치가 이루어지도록 하는 방법을 제시하였다.

대기 변압기의 경우 그림 8 a)에서 보듯이 부하 연결 시 결상



a) 대기변압기 부하 연결 시



b) 대기변압기 무부하 시

그림 8 결상 발생 시 대기변압기 중성선에 흐르는 전류 파형
Fig. 8 Waveform of Current Flowing in the Neutral Line of Standby Transformer upon Loss of Phase

이 발생 했을 때 수~수십 A의 영상전류가 흐르고, 무부하인 경우에도 그림 8 b)에서 보듯이 수십mA~수A의 전류가 흘러 현재 설치되어 있는 지락과전류검출용 변류기와는 별도로 로고스키 코일 변류기를 사용하여 특정 대역에 흐르는 영상전류 검출이 가능하고, 특히 로고스키 코일은 공심형이기 때문에 지락 등 과전류에 의한 열폭주의 우려가 없다.

따라서, 대기변압기 2차 측 차단기가 개방 되어있는 기간 동안에 로고스키 코일에 흐르는 전류 값이 설정치 이상이 일정 시간

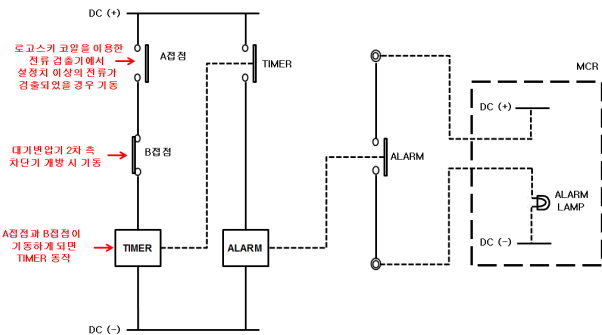


그림 9 대기변압기용 결상 검출시스템 논리회로
Fig. 9 Logic of Open-Phase Detection System for Standby Transformer

동안 지속 되었을 때 Main Control Room(MCR)에 알람을 전송하여 원자력발전소 운전원이 적절한 조치를 취할 수 있도록 하고, 대기변압기 2차 측 차단기가 폐로 되었을 때는 로코스키 코일을 이용한 전류 측정 장치는 동작을 하지 않도록 할 수도 있고(그림 9 참조), 주변압기, 보조변압기 포함하여 대기변압기 2차 측 개방 여부와 상관없이 영상전류를 측정 하여 그 값이 설정치 이상이 되었을 때 MCR에 알람을 전송하거나 계통을 분리함으로써 원자력발전소 변압기 연결 선로에서 결상이 발생 했을 때 검출이 가능할 것으로 판단된다. 단 이때 1선 지락 고장과의 구분을 위해서 변압기 1차 측 전압은 변동이 검출이 안되는 조건이 같이 고려되어야 할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 EMTP 및 Atpdraw 프로그램을 이용하여서 현재의 시스템에서 검출이 어려운 원자력발전소 내 주, 보조변압기 뿐만 아니라 대기 변압기 연결 소외전원 선로에서의 결상이 발생 했을 때의 현상과 이를 해결할 수 있는 시스템을 제시하였다.

즉 변압기 연결 선로에서 결상이 발생 했을 때 검출이 용이하고, 특히 대기변압기처럼 변압기 2차 측이 개방되어 있는 경우에도 1차 측 연결 선로 결상 검출이 가능하도록 하기 위해서 변압기 Y결선 측 중성선에 로고스키 코일로 된 변류기를 연결하여 영상 전류 검출을 통해서 선로를 차단하거나 운전원들에게 연락하여 적절한 조치가 이루어지도록 하는 방법을 제시하였다.

따라서 국내외 원전의 결상 대책 수립 및 NRC DC 취득을 위한 APR1400 DCD에 시스템 구성 기술 시 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] R. Arritt, et., "Development and Analysis fo an Open-Phase Detection Scheme", EPRI, 2012.9.
- [2] Bulletin 2012-01, "Design Vulnerability in Electric Power System", NRC, 2012.7.
- [3] Significant Event Report 2012-2, "Delayed Automatic Actuation of Safety Equipment on Loss of Offsite Power Due to Design Vulnerability", WANO, 2012.6.
- [4] Amir Norouzi, "Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm", MIPSYCON, 2013.11.
- [5] Dong-Yeol Shin, Donghyun Yun, HanJu Cha, "Problem Analysis by Iron Core Structure of the Transformer on Asymmetric Three Phase Lines and Prevention Measures", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 10, pp. 1536~1541
- [6] Laszlo Prikler, Hans Krisian Hoidalen, "ATPDRAW Users' Manual", SNITEF, 2002.8.
- [7] M. Horning, J. Kelly, S. Myers, R. Stebbins,

"Transformer Maintenance Guide", SDMyers, 2004.

- [8] Bong-Hee Kim, "Power System Analysis and Coordination of Industrial Power System", KIDARI, 2010.4.

저 자 소 개



하 체 응(Che-Wung Ha)

1973년 4월 8일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2005 LG전선(주) 전력연구소. 2005~현재 한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원



이 도 환(Do-Hwan Lee)

1966년 3월 30일생. 1988년 연세대 공대 기계공학과 졸업. 1995년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1996~2011년 한국전력공사 전력연구원. 2011~현재 한국수력원자력(주) 중앙연구원 책임연구원