

변압기 지역 코로나 전자파 간섭에 의한 계측제어설비 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of I&C Systems by EMI Generating from Corona Discharge at Transformer Area

민 문 기* · 이 재 기* · 박 진 엽* · 김 희 제†
(Moon-Gi Min · Jae-Ki Lee · Jin-Yeub Park · Hee-Je Kim)

Abstract - The Electromagnetic Interference(EMI) generating from corona discharge of transformer area can interference the digital Instrument and Control(I&C) systems located nearby transformers. When the potential gradient of the electric field around the conductor is high enough to form a conductive region but not high enough to cause electrical breakdown to nearby objects, the EMI of corona discharge emits with the conducted and radiated noise and it interferences the signals of the I&C systems. Since digital I&C systems have an efficiency and competitive price, the analog I&C systems have been upgraded and displaced with the digital I&C systems but which have less EMI Immunity. There was no assessment to I&C systems by EMI generating corona discharge nearby transformers. When the safety-related I&C systems are installed in plants, the verification of equipment EMI should be done not in site-specific test but in test facilities. There are the need to do the site-specific EMI evaluation of corona discharge nearby transformers. This paper assesses the margin between plant emission limits and the highest composite plant emission of corona. When the non safety-related I&C systems are placed in transformer area, it suggests the appropriate radiated susceptibility level to EMI of corona discharge.

Key Words : Corona discharge, Electromagnetic interference, EMI, EMC, EMS

1. 서 론

산업 플랜트 변압기 지역의 애자에서 발생하는 코로나 전자파는 변압기 지역의 계측제어설비 뿐만 아니라 플랜트 건물내부의 안전관련 계측제어설비에 전자파간섭(EMI)을 일으킬 가능성이 있다. 코로나 전자파는 송전선 주변의 전위가 공기의 절연내력을 초과하여 공기의 절연성이 부분적으로 파괴될 때 전도성전자파와 방사성전자파로 발생하며, 디지털 제어시스템의 신호를 왜곡시켜 플랜트의 중요 제어 시스템에 오 신호를 제공할 수 있다. 산업 플랜트에서 계측 제어시스템은 경제성과 효율성이 좋은 디지털 계측제어시스템으로 설치되거나 교체되고 있고, 디지털 계측제어시스템은 아날로그 계측제어시스템대비 전자파에 취약하다. 변압기 지역에서 발생하는 코로나는 코로나 측정기로 코로나 발생 지점 확인, 열화상으로 온도 분포 측정, 코로나 소음의 크기를 측정하여 코로나를 감시하고 있으나, 플랜트의 안전운전에 영향을 미칠 수 있는 코로나 전자파에 의한 계측제어시스템의 영향평가는 수행하고 있지 않다. 계측제어설비에 대한 국내외 전자파환경(EMC) 평가는 산업현장에 설치된 상태로 시험

(Site-Specific Test)을 하지 않고, 산업현장에 설치 이전에 실험실에서 전자파간섭(EMI)시험과 전자파내성(EMS)시험으로 현장 설치시험을 대체하고 있어, 실제적인 전자파환경 평가가 필요하다. 본 연구에서는 변압기 지역에서 발생하는 코로나 전자파로 인한 변압기 지역 및 플랜트 건물내부의 계측제어설비에 대한 전도성 및 방사성전자파를 측정하여, 전자파의 방출크기를 안전관련 계측제어설비의 플랜트 방출 한계치 기준으로 여유도를 평가한다. 또한, 변압기 지역의 코로나 전자파에 대한 안전관련 계측제어설비의 전자파 내성시험치의 적정성과 비안전관련 계측제어설비의 전자파 내성시험치를 제시하고자 한다.

2. 측정 방법

2.1 측정기준 및 장비

전자파 환경측정은 미 원자력안전위원회(NRC)의 Reg. Guide 1.180 및 MIL-STD-461E의 측정기준에 따라 수행하였다[1][2]. 변압기 지역에서 발생하는 코로나 전자파로부터 발전소 제어, 접지 및 구동용 전원케이블을 통해 유입될 수 있는 전도성전자파를 측정하기 위해 저주파 전도성전자파(CE101, 30Hz~10kHz) 및 고주파 전도성전자파(CE102, 10kHz~2MHz)를 측정하였으며, 전자파가 공중을 통해 유입될 수 있는 방사성전자파를 측정하기 위해 자기장 방사성전자파(RE101, 30Hz~100kHz) 및 전기장 방사성전자파(RE102, 10kHz~1GHz)를 측정하였다. 측정 장비 목록 표 1의 측정 장비로 그

* Center of Electrical and I&C Engineering, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Pusan National University, Korea

E-mail : heeje@pusan.ac.kr

Received : November 12, 2013; Accepted : December 27, 2013

림 1과 같이 구성하여 전자파를 측정하였다[3][4].

표 1 전자파 측정 장비 목록

Table 1 List of EMI measuring equipments

Equipments	Frequency	Specification	Note
EMI Test Receiver	20 Hz ~ 26.5 GHz	LSA-265	commonly use
Current Probe	20 Hz ~ 1 Mhz	BCP-510	CE101
Current Probe	20 kHz ~ 100 Mhz	BCP-511	CE102
Loop Antenna	20 Hz ~ 2 Mhz	SAS-560	RE101
Monopole Antenna	9 kHz ~ 60 Mhz	SAS-550-1B	RE102
Bi-conical Antenna	20 Mhz ~ 330 Mhz	SAS-542	RE102
Log-Periodic Antenna	290 Mhz ~ 2 GHz	SAS-510-2	RE102
Horn Antenna	700 Mhz ~ 18 GHz	SAS-571	RE102

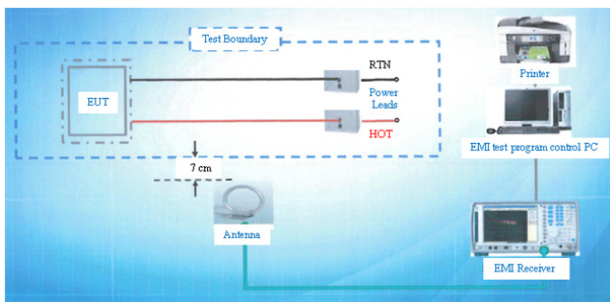
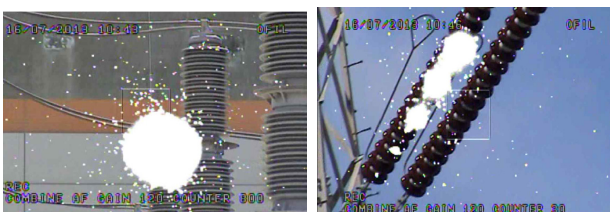


그림 1 자기장 방사성전자파(RE101) 측정의 장비 구성
Fig. 1 Test configuration for radiated EMI(RE101) measurement

2.2 측정지점

변압기 지역의 코로나 전자파에 의한 계측제어설비에 대한 영향을 평가하기 위하여, 코로나 발생이 많은 송전선로 송전탑의 현수 및 내장애자, 수전선로의 지지애자의 아래에서 측정시험을 수행하였다[5][6].



(a) 송전탑 내장애자 (a) Strain insulators
(b) 기동변압기 지지애자 (b) Station post insulators

그림 2 변압기 주변 코로나 발생 지점
Fig. 2 Corona generating spots nearby transformers

변압기 지역 코로나 전자파 간섭에 의한 계측제어설비 영향에 관한 연구

측정지점은 그림 2와 같이 코로나 측정기(Dayco II)를 사용하여 코로나 발생이 많은 애자 부위를 선정하였다. 발전소 건물내부 측정 지점은 터빈건물 상분리 모선 하부 및 스위치기어실에서 측정시험을 수행하였다.

2.3 측정 판단기준

전자파영향 측정판단기준은 미 원자력안전위원회의 Reg. Guide 1.180, Rev. 1에서 제시하는 개별기기의 Emissions & Susceptibility의 ‘Operating Envelopes’으로, 전도성 및 방사성 전자파에 대한 주파수별 방출한계치 및 내성한계치를 나타낸 그래프이다[그림 3]. 미국 원자력안전위원회에 의해 인증된 미국전력연구원(EPR)의 TR-102323 Rev.1 7장(Plant and Equipment Emissions Limit)에 의하면 안전관련 계측제어 설비의 플랜트 방출한계치(Plant Emissions Limit, Allowable Plant Level)는 개별기기 내성한계치(Equipment Susceptibility Limit)보다 8dB 이상의 여유도(Margin)를 보유할 것을 권고한다[7][8].

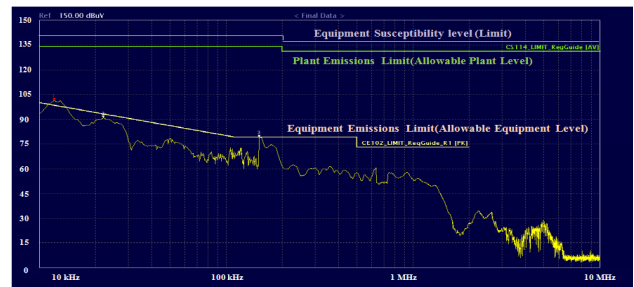


그림 3 개별기기에 대한 내성 및 방출 기준
Fig. 3 Operating envelopes of emission and susceptibility on equipments

3. 결과 및 고찰

3.1 전자파 측정결과

3.1.1 전도성전자파

변압기 지역 및 발전소 건물내부의 케이블에서 전도성 전자파를 측정된 결과, Reg. Guide 1.180, Rev.1의 개별기기 방출한계치(Equipment Emissions Limit) 및 플랜트 방출한계치(Plant Emission Limit)이하로 그림 4와 같이 측정되었고, 주파수 60Hz 대역에서 최고 54dBμA가 측정되었다.

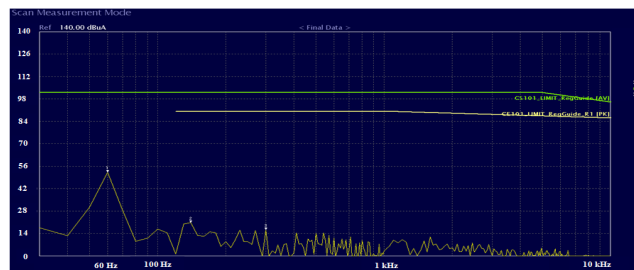


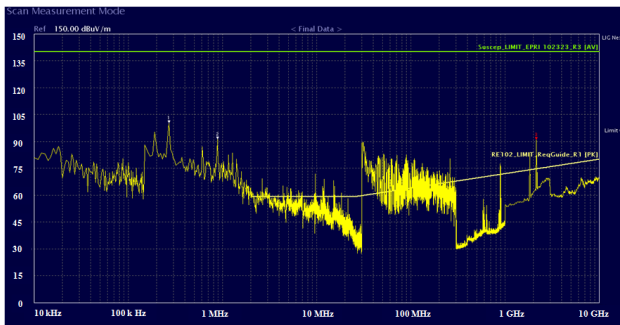
그림 4 전도성전자파 측정 결과
Fig. 4 Measurement result of conducted EMI

3.1.2 방사성전자파

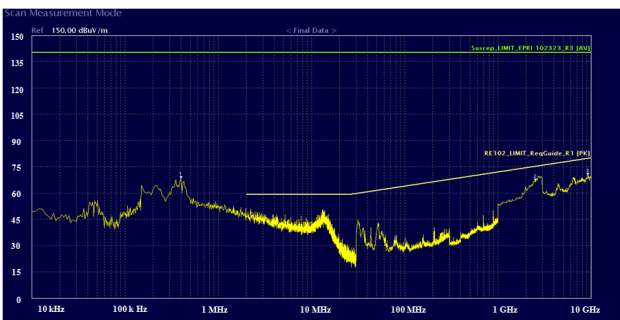
변압기 지역 및 발전소 건물내부의 자기장 방사성전자파(RE101)를 측정된 결과, Reg. Guide 1.180, Rev.1의 개별기기 방출한계치 및 플랜트 방출한계치 이하로 측정되었다. 변압기 지역 및 발전소 건물내부의 전기장 방사성전자파(RE102)를 측정된 결과, 개별기기 방출한계치는 초과했으나 플랜트 방출한계치 이하로 측정되었다[그림 5].

변압기 지역의 전기장 방사성전자파는 주파수 대역 100MHz~300MHz에서 85dB μ V/m 이하이고, 400MHz에서 45dB μ V/m이며, 1MHz에서 최고 103dB μ V/m로 측정되었다. 변압기 지역에서 전기장 방사성전자파는 주파수 대역 5MHz~500MHz에서 개별기기 방출한계치는 초과했으나 플랜트 방출한계치 이하로 나타났다.

발전소 건물내부 옥내 스위치기어실에서 전기장 방사성전자파 크기는 주파수 대역 10MHz~400MHz에서 50dB μ V/m 이하이고, 400MHz에서 42dB μ V/m이고, 1MHz에서 최고 68dB μ V/m로 측정되었다. 옥내 스위치기어실에서 전기장 방사성전자파는 주파수 대역 10kHz~10MHz에서 변압기 지역의 전기장 방사성전자파보다 13dB μ V/m 이상 낮으며, 주파수 대역 30MHz~300MHz에서는 37dB μ V/m 이상 낮았다.



(a) 기동변압기 지역 방사성전자파 측정
(a) Measurement result at start transformer



(b) 옥내 스위치기어실 방사성전자파 측정
(b) Measurement result at switchgear room in building

그림 5 전기장 방사성전자파 측정(RE102)
Fig. 5 Measurement results of radiated EMI(RE102)

3.2 전자파 영향평가

코로나 방전은 전선의 표면에서 전위경도가 직류 30[kV/cm],

교류 21[kV/cm]를 초과할 때 교류전압의 반과마다 간헐적으로 발생되며, 이때 코로나 전자파는 주파수 대역 10kHz~300MHz에서 발생된다. 코로나 전자파는 케이블을 통한 전도성전자파와 공중을 통한 방사성전자파로 예측제어설비 등에 악영향을 줄 수 있으므로 전자파 여유도 평가를 했다. 전자파 영향평가는 전자파를 여러 지점에서 측정하여 그중에서 최고 측정치를 주파수별로 수준을 나타내었고, 이 최고합성 플랜트 방출수준(Highest Composite Plant Emission Level)을 플랜트 방출한계치 기준으로 여유도를 계산하였다.

변압기 지역 및 건물내부에서 저주파 전도성전자파(CE101), 고주파 전도성전자파(CE102), 자기장 방사성전자파(RE101)는 개별기기 방출한계치 및 플랜트 방출한계치 이하로써 예측제어설비에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 영향평가를 하지 않았다.

변압기 지역 및 건물내부에 방출되는 전기장 방사성전자파(RE102)는 개별기기 방출한계치를 초과하였으므로, 코로나 주파수 대역에서 플랜트 방출한계치를 평가기준으로 안전 여유도를 평가하였다[그림 6].

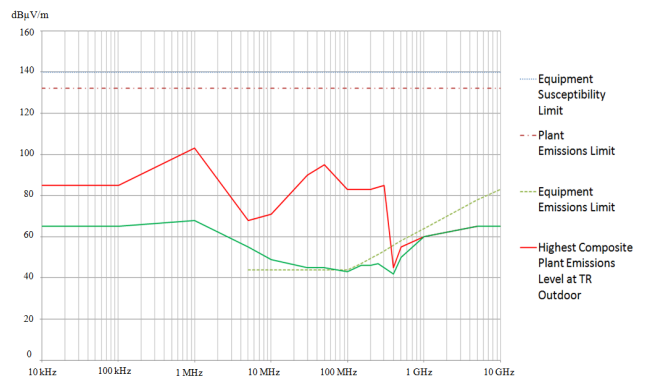


그림 6 코로나에서 방출되는 전기장 방사성전자파의 최고합성 플랜트 방출수준
Fig. 6 Highest Composite Plant Emission Level of radiated EMI from corona discharge

전기장 방사성전자파 평가기준은 미 원자력안전위원회에서 미국전력연구원 TR-102323 Rev.1의 요구를 반영해서 개별기기 내성한계치 140dB μ V/m에서 예측 불확도 등을 고려한 8dB 낮은 플랜트 방출한계치 132dB μ V/m로 했다. 변압기 지역 코로나에서 방출되는 전기장 방사성전자파의 최고합성 플랜트방출수준을 플랜트 방출한계치로 평가한 결과, 주파수 전대역에서 29dB μ V/m(28배)이상의 안전 여유도를 가졌다. 건물내부에서 방출되는 전기장 방사성전자파의 최고합성 플랜트방출수준을 플랜트 방출한계치로 평가한 결과, 주파수 전대역에서 64dB μ V/m(1548배)이상의 안전 여유도를 가졌다. 5MHz~300MHz에서 77dB μ V/m(7079배)이상의 안전 여유도를 가졌다[표 2].

건물내부의 전기장 방사성전자파는 주파수 대역 10kHz~300MHz에서 변압기 지역의 전기장 방사성전자파보다 최소 13dB μ V/m(4.5배)이상 감소했다. 변압기 지역 코로나에서 방출되는 최고의 전기장 방사성전자파 수준은 103dB μ V/m로

표 2 변압기 지역 및 건물내부에서 전기장 방사성전자파(RE102) 안전 여유도

Table 2 Margin of radiated EMI(RE102) between transformer area and switchgear room

Frequency (Hz)	변압기지역 최고합성플랜트 방출수준(②)	건물내부 최고합성플랜트 방출수준(③)	개별기기 내성한계치& 내성시험치	플랜트 허용한계치(①)	플랜트방출한계치와 변압기지역 최고 합성플랜트 방출 수준의 여유도 (①-②)	플랜트방출한계치와 건물내부 최고 합성플랜트 방출 수준의 여유도 (①-③)	개별기기 방출한계치
100KHz	85	65	140	132	47	67	-
1MHz	103	68	140	132	29	64	-
5MHz	68	55	140	132	64	77	44
10MHz	71	49	140	132	61	83	44
30MHz	90	45	140	132	42	87	44
50MHz	95	45	140	132	37	87	44
100MHz	83	43	140	132	49	89	44
150MHz	83	46	140	132	49	86	47
200MHz	83	46	140	132	49	86	50
250MHz	84	47	140	132	48	85	52
300MHz	85	45	140	132	47	87	53
400MHz	45	42	140	132	87	90	56
500MHz	55	50	140	132	77	82	58
1GHz	60	60	140	132	72	72	64
5GHz	65	65	140	132	67	67	78
10GHz	65	65	140	132	67	67	83

서 플랜트 방출한계치 132dB μ V/m 보다 29dB μ V/m의 여유가 있어 28배의 안전 여유도를 가지므로, 안전관련 계측제어설비에 적용되는 플랜트 방출한계치를 낮출 필요가 있다.

3.3 전자파 내성시험치 평가

안전관련 계측제어설비에서 방사성전자파 내성을 검증하는 내성시험(Radiated Susceptibility Test)은 개별기기 내성한계치와 동일한 140dB μ V/m로 전자파 내성시험 검증을 한다. 계측제어설비 전자파 내성시험치를 전기장의 크기로 변환하면 10V/m이다.

$$V_2 = 10^{\frac{dB}{20}} \times V_1(\text{기준전압}) = 10^{\frac{140}{20}} \times 1\mu V = 10 \text{ [V/m]}$$

변압기 지역 코로나 전자파에서 발생하는 최고합성플랜트 방출크기는 변압기 지역의 지면 1m 높이에서 1MHz 주파수 대역에서 103dB μ V/m로서 전기장의 크기는 0.14V/m이며, 안전관련 계측제어설비의 전자파 내성시험치 10V/m보다 71배의 안전 여유를 가진다. 안전관련 계측제어설비의 전자파 내성 시험치를 10V/m 보다 낮게 적용하기 위해서 계측제어설비의 설치 높이에 따라 유입되는 전기장 방사성전자파의 크기가 안전관련 계측제어설비 전자파 내성시험치보다 충분한 안전 여유도가 있음을 확인해야 한다.

전기장 방사성전자파 측정은 변압기 지역에서 지상에서 1m의 높이에서 측정하였으나, 현장의 계측제어설비는 여러 높이에 설치되어 코로나 발생원에서 계측제어설비까지의

거리에 따라 전자파의 영향은 다르다. 계측제어설비의 설치 높이에 따른 전기장 방사성전자파의 크기를 수신 안테나에 유입되는 전기장 방사성전자파의 크기로 계산할 수 있다. 수신 안테나에 유입되는 전자파의 크기는 E_0 이고, 전자파 발생원에서 전자파 측정 안테나까지 거리는 R 이고, 전자파 발생원과 피해기인 계측제어설비까지 거리는 d 이다. 변압기 지역 코로나 방전에서 발생하는 전자파의 크기는 거리의 제곱에 반비례하여 감소하므로 전자파 발생원에서 거리 d 위치에서의 전자파의 크기 E_d 는 식(1)로 주어진다.

$$E_d = E_0 + 20\log\left(\frac{R}{d}\right) \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \tag{1}$$

변압기 지역 지면 8m 높이의 애자에서 코로나 방전으로 수신 안테나에 유입되는 최고 전기장 방사성전자파의 크기는 주파수 대역 1MHz에서 지면 1m 높이의 계측제어설비에 0.14V이고, 지면 5m 높이의 계측제어설비에 유입되는 전자파의 크기는 0.99V이다. 변압기 지역의 안전관련 계측제어설비는 전자파 내성시험치 10V/m로 전자파 내성시험을 검증하므로 변압기 지역의 안전관련 계측제어설비는 코로나 방전에 따른 전자파간섭에 충분한 여유가 있어 안전관련 계측제어설비의 전자파 내성시험치를 낮출 필요가 있다.

안전관련 계측제어설비에서 전자파 내성시험은 필수요건이지만 비안전관련 계측제어설비에서 전자파 내성시험은 선택사항이다. 변압기 지역의 비안전관련 계측제어설비 내성시험치는 별도로 없고 안전관련 계측제어설비 내성시험치 (10V/m)로 내성시험을 한다. 그래서 변압기 지역에서 비안전

관련 계측제어설비의 내성시험치를 제시하고자 한다. 비안전 관련 계측제어설비의 내성시험치 V_{rs} 는 비안전관련 계측제어 설비의 설치높이, 전자파 발생원의 높이, 계측의 불확도 등을 고려하여 8dB(2.5배)의 여유도를 포함한 식(2)로 계산한다.

$$V_{rs} = 10^{\left(\frac{E_s + \text{여유도 (8dB)} + 20 \log\left(\frac{R}{d}\right)}{20} \right)} \times V_1 \text{ [V/m]} \quad (2)$$

변압기 지역 지면 8m 높이의 애자에서 코로나 방전이 발생하고 비안전관련 계측제어설비가 변압기 지역 지면 2m의 높이에 설치된다면 내성시험치 V_{rs} 는 식(2)에 의해 0.51V/m이 되고, 이 값을 변압기 지역 지면 2m의 높이의 비안전관련 계측제어설비에 대한 전자파의 내성시험치로 시험하면 비안전관련 계측제어설비의 전자파 내성을 검증할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문은 발전소 변압기 지역의 코로나 방전에서 발생하는 전자파가 계측제어설비에 미치는 영향을 평가하기 위해 코로나 방전에서 발생하는 전자파를 측정하였다. 현재, 국내외적으로 전자파간섭에 의해 플랜트 불시정지 등 고장 사례가 보고되고 있으나, 변압기 지역에서 발생하는 전자파에 의한 계측제어설비의 전자파 적합성 평가는 이루어지지 않고 있어, 운전 중인 발전소의 변압기 지역 코로나 방전에서 방출되는 전자파에 대한 계측제어설비의 전자파환경을 평가하였다.

변압기 지역 코로나 방전에서 발생하는 전자파의 방출크기는 안전관련 계측제어설비의 플랜트 방출한계치보다 과도한 여유가 있으므로, 안전관련 계측제어설비의 전자기파 내성 한계치를 낮출 필요가 있다. 변압기 지역 비안전관련 계측제어설비의 방사성전자파 내성시험치는 안전관련 계측제어설비의 방사성전자파 내성시험치를 사용하며 별도의 내성 시험치가 없다. 그래서 전자파 측정결과, 여유도, 전자파 발생원의 높이, 비안전관련 계측제어설비의 설치높이 등을 고려하여 비안전관련 계측제어설비의 전자파 내성시험치를 제시하였다.

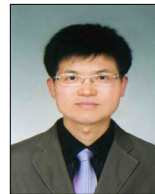
산업 플랜트의 계측제어설비에 전자파에 상대적으로 취약한 디지털회로가 널리 적용되고 있는 시점에서, 본 논문에서 제안한 전자파 발생지역에서 계측제어설비의 전자파환경 여유도 평가, 비안전관련 계측제어설비의 내성시험치 제시는 전자파간섭을 사전에 예방하고, 신뢰도 증대 및 안정적인 운영에 기여할 수 있을 것이다.

References

[1] URG, Regulatory Guide 1.180, "Guidelines for evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control System," Revision 1, pp.7-30, October 2003.
 [2] MIL-STD-461E, "Requirements for the control of Electromagnetic Interference characteristics of Subsystems and Equipment," pp.25-94, August 1999.

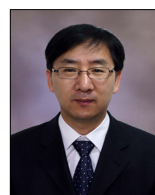
[3] K. Barry and P. Keeber, "Technical Guidance for Achieving Higher Levels of Electromagnetic Compatibility for Advanced Nuclear Power Plants," EPRI TR-1021092, pp.157-163, December 2010.
 [4] J. Naser and P. Keebler, "Minimizing the Risk of Electromagnetic Interference in Modifying Power Plants and Mixed Control Equipment," EPRI TR-1016729, pp.113-131, December 2008.
 [5] Kil-Mok Shong and Young-Seok Kim, "An Analysis of UV Behavior and Shape of Detection Images Due to Corona Discharge of Insulators at 22.9kV," KIEE autumn conf., pp.215-218, 2009.
 [6] Man-Sik Pang, Jae-Hyeong Choi, Woo-Jin Kim, Young-Seok Kim, and Sang-Hyun Kim, "The Analysis of Corona Discharge of Surface Flashover Model for Aging Diagnosis of Power Facility," KIEE vol. 24, No. 4, pp.314-318, April 2011.
 [7] J. Shank and R.W. James, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants," EPRI TR-102323 Revision 1, pp.29-63, January 1997.
 [8] J. Shank and R. Torok, "Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants," EPRI TR-102323 Revision 3, pp.50-51, 151 November 2004.

저 자 소 개



민 문 기 (閔 文 基)

1971년 12월 6일생. 1997년 경상대학교 전기공학과 졸업. 2012년 부산대학교 전자전기공학과 박사수료. 산업계측제어기술사. 건축전기기술사. 1997년~2005년 LG전자 선임연구원. 2006년~2010년 화력발전소 근무. 2011년~현재 한국수력원자력 선임전문원
 Tel : 042-870-5611
 E-mail : macgaiver@khnp.co.kr



이 재 기 (李 載 琦)

1963년 10월 11일생. 1994년 부산공업대학교 전기공학 졸업. 1982년~2007년 원자력발전소 근무. 2008년~현재 한국수력원자력 책임전문원
 Tel : 042-870-5610
 E-mail : jaekilee@khnp.co.kr



박진엽 (朴珍燁)

1967년 10월 21일생. 2002년 울산대학교
산업대학원 메카트로닉스 석사졸업. 발송
배전기술사. 1984년~2007년 원자력발전
소 근무. 2008년~현재 한국수력원자력
책임전문원

Tel : 042-870-5652

E-mail : parkjinyb@khnp.co.kr



김희제 (金熙濟)

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교
공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산
대학교 대학원 전기공학과 석사졸업.
1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과
박사졸업. 현재 부산대학교 전기공학과
교수 재직중