Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 7 pp. 394-399, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.7.394
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

스코트 변압기 보호계전기 오동작 사례분석 및 개선방안 고찰

이종화, 노영환*
우송대학교 철도전기시스템학과

A Study on SCOTT Transformer Protection Relay Malfunction Case and Improvement Methodology

Jong-Hwa Lee, Young-Hwan Lho*
Department of Railroad Electrical System Engineering, Woosong University

요 약 본 국내 교류전철변전소에서는 주변압기 2차측의 위상각이 90°인 단상 전원을 얻도록 한 스코트 결선 변압기를 설치 운용 하고 있다. 변압기 보호계전기는 내부에서 고장이 발생하는 경우 변압기 전단에서 전력을 차단시키고 변압기 외부 계통의 사고나 일반차량 운행의 경우에는 동작하지 않아야 한다. 정확한 고장의 판단으로 오동작을 줄이는 것이 전력계통을 안정적으로 유지하고 신뢰성을 향상시키는 측면에서 매우 중요하다. 주 변압기 내부 고장 검출장치로는 브흐홀쯔계전기와 비율차동계전기를 설치하여 변압기를 보호하고 있지만 비율차동계전기의 오동작으로 인해 보호기능을 비활성화 시켜놓은 상태로 운용하는 사례가 있다. 본 논문에서는 스코트 변압기의 특성과 비율차동계전기의 특성을 제시하고 보호계전기의 오동작 사례를 분석하였다. 이를 위해 전력계통 해석프로그램을 이용하여 스코트 변압기에 사용되는 비율차동계전기를 모델링하고 A변전소의 Comtrade 파일로 저장된 고장파형을 입력데이터로 사용하여 동작여부를 판단하여 고조파 분석을 수행하였다. 또한, 고장파형 분석을 통해 오동작 사례에 대한 개선 방안을 도출하고자 한다.

Abstract In Korean AC power railway substations, SCOTT winding transformers are under operation to have a single phase power supply together with a phase angle of 90° on the secondary side of the main transformer. In the case of an internal fault of the transformer, the transformer protection relay should be cut off on the primary side, the transformer should be inoperative to the external fault of the transformer or to the normal train operation. Reducing the malfunction of the relay through an exact fault determination is very important for securing a stable power system and improving its reliability. The main transformers are protected using Buchholtz's relay and a differential relay as the internal fault detection devices, but there are some cases of the main transformer operation under the deactivation of this protection function due to a malfunction of the differential relay. In this paper, the characteristics of the SCOTT transformer and differential relay as well as the malfunctioning of the protection relays are presented. The modeling of the SCOTT transformer protection relay was accomplished by the power system analysis program and the Comtrade file from 'A substation', which was used as the input data for the fault wave, and the harmonics were analyzed to determine if the relay operates or not. In addition, an improvement plan for malfunctioning cases through wave form analysis is suggested.

Keywords : Buchholtz's relay, differential relay, malfunctioning, protection relay, railway substations, SCOTT

본 논문은 국토교통부 철도핵심부품장치 기술개발(2단계) 연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Young-Hwan Lho(Woosong Univ.)
Tel: +82-42-629-6731 email: yhlho@wsu.ac.kr
Received June 20, 2017 Revised July 6, 2017
Accepted July 7, 2017 Published July 31, 2017

1. 서 론

국내의 교류 전기철도 계통에서 사용하는 AT 급전방식은 한국전력공사에서 보내오는 154kV, 66kV의 전압을 스코트(Scott)변압기를 통해 강압하여 55kV인 M상과 T상으로 변압하고 단상 공급선로를 상, 하행선으로 구분하여 급전시킨다. 주변압기인 스코트변압기는 변성비가 다른 단상 변압기 2대를 접속하여 2차에 상차각이 90°인 2개의 단상 전원을 얻도록 한 변압기이며 국내 전기철도 변전소에서 사용되고 있다.

변압기 보호계전기는 내부에서 고장이 발생하는 경우 변압기 전단에서 전력을 차단시키고 변압기 외부 계통의 사고나 일반 차량 운행의 경우에는 동작하지 않아야 한다. 정확한 고장의 판단으로 오부동작을 줄이는 것이 전력계통을 안정적으로 유지하고 신뢰성을 향상시키는 측면에서 매우 중요하다. 변압기에 대한 주보호 계전기로는 비율차동계전기(ANSI 87T)가 사용된다. 국내 교류전기철도 변전소에서 운용 중인 스코트 변압기의 내부 고장 검출장치로 브흐홀쯔계전기와 비율차동계전기를 설치하여 보호하고 있지만 비율차동계전기의 오동작으로 인해 보호기능을 비활성화시켜놓은 상태로 운용하고 있다.

본 논문에서는 스코트 변압기의 특성과 비율차동계전기의 특성을 제시하고 보호계전기의 오동작 사례를 분석하였다. 이를 위해 전력계통해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 스코트변압기에 사용되는 비율차동계전기를 모델링하고 A 변전소의 Comtrade 파일로 저장된 실제 고장 파형을 입력데이터로 사용하여 동작 여부를 판단, 고조파 분석 등을 수행하였다. 결론적으로 고장 파형 분석을 통해 오동작 사례에 대한 개선방안을 도출하고자 한다.

2. 본 론

2.1 스코트 변압기 및 보호계전기 특성

2.1.1 스코트 변압기 특성

국내 교류 전기철도 차량은 견인 용량(KTX 기준) 13,560 kW, 최고속도 300km/h로 매우 빠르게 이동하는 대용량 부하이다. 이러한 대용량 부하를 교류 3상 선로로 직접 전력을 공급할 경우, 선로에 차량 유무에 따라 선로간의 부하 불평형이 크게 발생한다. 이를 개선하기 위해 유럽국가들의 경우 단상 2권선 변압기를 사용하고 있고, 우리나라와 일본의 경우는 교류 3상을 1차 측으로 결선하고 2개의 단상(M상, T상)을 2차 측으로 결선하는 스코트 변압기를 사용하고 있다. 스코트 변압기의 결선 구조는 Fig. 1과 같으며 각각 상전류를 계산하면 식 (1),(2)와 같다[1].

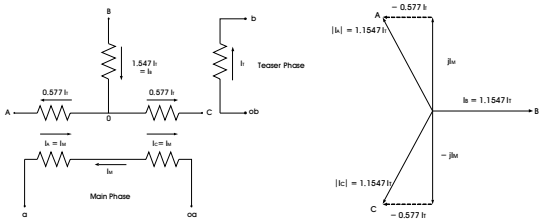

Fig. 1. Scott transformer connection and current phasor

$$I_{1M} = \frac{\left(I_A \times (\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2}) + I_C \times (\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2})\right)}{2} \quad (1)$$

$$I_{1T} = I_B \times (\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2}) \quad (2)$$

여기서,

I_{1M} : 스코트변압기 2차측 전류(I_M)에 맞게 환산한 1차측 전류(I_A, I_C을 이용하여 환산)

I_{1T} : 스코트변압기 2차측 전류(I_T)에 맞게 환산된 1차측 전류(I_B을 이용하여 환산)

N : 1차 권선 수 (또는 전압 154kV)

n : 2차 권선 수 (또는 전압 55kV)

2.1.2 비율차동계전기 특성

비율차동계전기는 변압기의 내부고장 검출용으로 정상적으로 운전 중인 변압기는 1차 전류에 변압기 권선비를 곱한 값이 변압기 2차 전류와 같아야 하며, 변압기 1차 및 2차 전류의 비(ratio)가 권선비와 다르면 변압기 내부 고장으로 판단하고 이들 변압기 1, 2차 전류의 합과 차의 기울기에 따라 동작여부를 결정하며 특성은 Fig. 2와 같다. 따라서 비율차동계전기는 상간의 단락 또는 지락 사고 등을 보호하나 과부하 상황에서는 동작하지 않는다.

비율차동계전기는 차전류(I_D)와 억제전류(I_R)의 특성을 고려하여 Single slope, dual slope, variable slope

등 다양한 방식의 비율차동기법을 활용할 수 있으며, 억제전류 연산방식도 $I_R = k|I_1 + I_2|, I_R = k(|I_1| + |I_2|)$, $I_R = \max(|I_1|, |I_2|)$ 등 다양한 식을 사용한다[2]

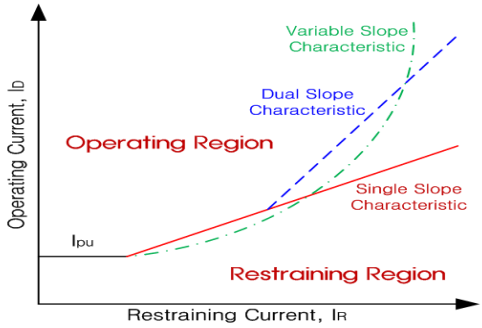

Fig. 2. Typical options for the characteristics of percentage differential relays

국내 교류전기철도 변전소에서 사용하는 스코트 변압기용 비율차동계전기는 독일 Siemens(社) 7UT6 모델과 프랑스 ICE(社)의 NPDT모델을 사용하고 있으며 특성은 Fig. 3과 같다[1]. 스코트변압기는 단상 변압기 2대를 T결선한 것이므로 단상 변압기인 M상과 T상을 각각의 단상 비율차동계전기를 사용하여 보호하여야 한다. 국내 고속선 교류철도변전소에서 사용 중인 비율차동계전기는 Dual slope characteristic 방식을 채용하고 있고 특성 및 차전류(I_D), 억제전류(I_R)는 식(3), (4)와 같다[3].

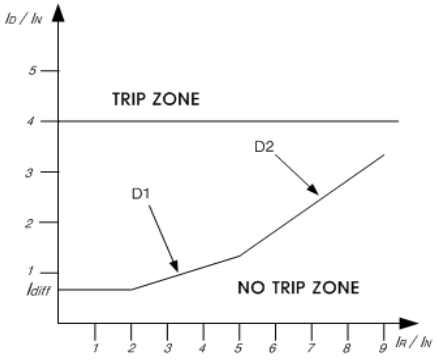

Fig. 3. The characteristics of percentage differential relays(NPDT)

M상 변압기 : $I_D = I_{1M} - I_M$,

$$I_R = (I_{1M} + I_M)/2 \quad (3)$$

T상 변압기 : $I_D = I_{1T} - I_T$,

$$I_R = (I_{1T} + I_T)/2 \quad (4)$$

여기서, I_{diff} : 차전류, I_{bias} : 억제전류

I_M : 스코트변압기 2차측에서 계측된 M상 전류

I_T : 스코트변압기 2차측에서 계측된 T상 전류

비율차동계전기를 설정하기 위해 기울기(slope 1, 2), 최소동작전류, 돌입전류에 의한 2고조파 5고조파 Blocking 등의 설정 요소가 있다. Slope 1 설정은 CT전류 부정합률(5%), 변압기 탭절환 오차(8~10%), CT 및 계전기 오차(10%), 마진(10%)을 고려하여 33~35%로 하고 Slope 2 설정은 $I_D/I_R \times 100$ 으로 한다. 최소동작전류는 식(5)와 같은 방법으로 설정한다[3].

$$I_{\pi ckup} = (0.5 \times Slope + P) \times I_n \quad (5)$$

여기서, I_n : 변류기 2차 정격전류[A],

P : 변압기의 무부하손(I_n의 10%)

2.2 변압기 돌입전류 특성

변압기가 전력계통에 투입되는 순간에는 변압기의 용량에 따라 다르나 과도적으로 정격 전류의 수배 ~ 수십배까지의 순간적인 자화전류의 초기 돌입현상으로 인해 Surge 형태의 변압기 돌입전류가 발생한다. 변압기에 인가되는 전압이 급격하게 변화할 경우 전압에 의해 발생하는 자속과 변압기 철심의 B-H 곡선에 의해 돌입전류의 크기 ($\hat{i}(n)$)와 지속시간(τ)이 (6), (7)과 같이 결정된다[4].

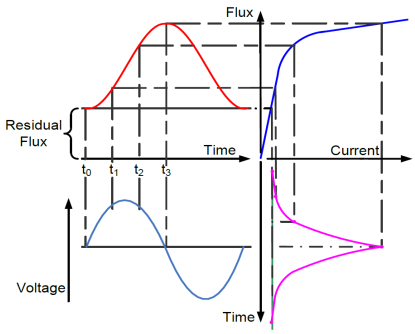

Fig. 4. Magnetizing voltage, core flux, and magnetizing current relationship in a transformer[5]

$$\hat{i}(n) = \frac{\sqrt{2}\,U}{\sqrt{R_W^2 + \omega^2 L_{air-core}^2}} \left(\frac{2B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) e^{-\frac{t_n}{\tau}} \tag{6}$$

$$\tau = \frac{2L_{air-core}}{R_W} \tag{7}$$

여기서, U : 변압기 상전압, R_W : 권선 저항, $L_{air-core}$: 공심 인덕턴스, B_N : 철심의 정격자속밀도, B_R : 철심의 잔류자속밀도, B_S : 철심의 포화자속밀도, t_n: 시간변수, τ : 감쇄시정수

이러한 변압기 돌입전류가 발생하면 보호계전기가 오동작하여 가압에 실패를 초래할 수 있으며 지속시간이 긴 돌입전류는 변압기의 소손을 발생시킬 수 있다. 따라서 변압기의 소손을 초래하지 않는 시간 내에서 돌입전류를 차단해야 하며, 그 외의 돌입전류에는 보호계전기가 동작하지 않도록 설정하는 것이 매우 중요하다. 또한 돌입전류는 2고조파, 5고조파의 함유율이 높은 특성을 이용하여 보호계전기 설정에 고조파 Blocking 기능으로 돌입전류에 의한 비율차동계전기의 오동작을 방지할 수 있다.

2.3 변압기 보호계전기 오동작 사례 분석

2016년 1월과 5월에 국내 A 변전소에서 유사한 시간대에 변압기 보호계전기가 동작하였다.

Table 1. malfunction cases of transformer protection relay in A Substation

Practical cases		Date/time	Status
A Substation	Case 1	2016.01.11, AM 04:26	87T Trip
	Case 2	2016.05.02, AM 04:05	87T Trip

먼저 보호계전기가 동작한 시간을 고려할 때 변압기가 계통에 투입되어 가압하는 시간대임을 알 수 있고, 변압기 투입시 돌입전류에 의해 오동작한 것으로 추측할 수 있다. 이를 검증하기 위해 전력계통해석프로그램(PSCAD/EMTDC)을 이용하여 해당 고장 파형을 분석, 고장 트립 유무 확인, 고조파 해석을 통해 분석을 하였다.

먼저 보호계전기가 저장하고 있는 고장파형을 COMTRADE 형식으로 변환하여 Fig. 5와 같이 PSCAD/ EMTDC 내의 File Reader library로 재생하였다. COMTRADE 파일에는 보호계전기 동작 전후의 스코트 변압기 1차측 전류(3상)와 2차측 전류(M상, T상)의 데이터가 포함되어 있다. Fig. 5는 File Reader를 적용한 것을 나타내며, Fig. 6은 COMTRADE 파일을 read 하고 파형을 재생할 수 있다.

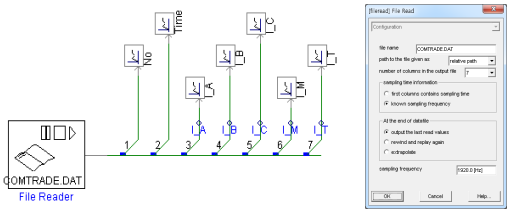

Fig. 5. File Reader module and data input window

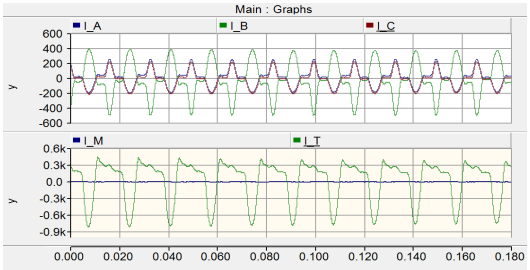

Fig. 6. Comtrade file play of case 1 using PSCAD

Fig. 6은 순서대로 스코트변압기 1차측 A, B, C 3상 전류와 2차측 M, T상 전류를 나타낸다. 1차측 3상 전류 파형이 돌입전류의 형태를 띄고 있는 것을 확인할 수 있고, 2차측 M상 전류가 거의 흐르지 않는 것을 확인할 수 있다. 1차 측 및 2차 측 전류가 비율차동계전기를 동작시키는지의 여부를 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 스코트 변압기에 사용되는 비율차동계전기 모델링을 수행하였다.

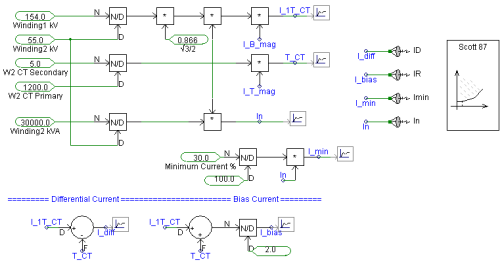

Fig. 7. Scott Transformer percent differential relay modeling using PSCAD

스코트변압기 2차측 T상 전류는 1차측 B상 전류와 대응하므로 B상 전류를 이용하여 차전류를 2차측 기준으로 변환하여 연산하도록 하였으며, 설정 값들은 실제 A 변전소의 비율차동계전기 설정 값과 동일하게 설정하였다.

Table 2. setting values for substation protection relay

Parameter	Setting Values
Normal low threshold: Idiff>	0.3 In
Start of zone 2 Itrav1	0.6 In
Slope Zone2	25 %
Start of zone 3 Itrav2	5.6 In
Slope Zone3	40 %
Instantaneous high threshold: Idiff>>	0.8 In
Trip time delay	3 ms
Magnetising inrush current Restraint (H2), Maximum time of Inrush (current) restraint	15%, 1000 ms
Enable overfluxing	Non use

Fig. 8은 차전류 및 억제전류의 궤적(적색곡선)이 보호계전기 동작영역에 들어오는 것을 보여준다.

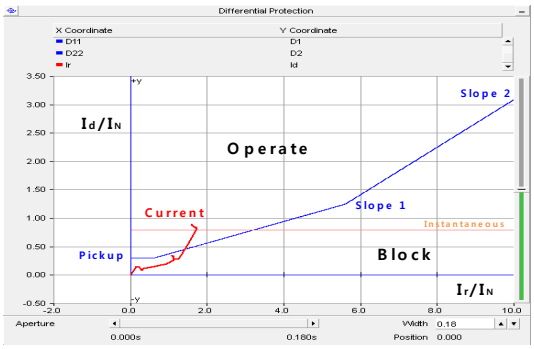

Fig. 8. differential relay operation graph

보호계전기의 동작이 변압기 고장이 아닌 경우에 동작한 오동작으로 판단되어 오동작 원인을 찾기 위해 FFT library를 활용하여 전류 파형들의 고조파 분석을 수행하였다. 보호계전기가 차전류 및 억제전류를 연산하기 위해 사용하는 전류 값은 기본파 전류 값이므로 먼저 기본파 전류 값을 추출하였다. Fig. 9는 FFT를 통해 추출된 기본파의 크기를 나타내며 B상의 전류가 A 및 C상의 전류보다 약 2배가 큰 것과 M상 전류는 거의 0에 가까운 것을 확인할 수 있다.

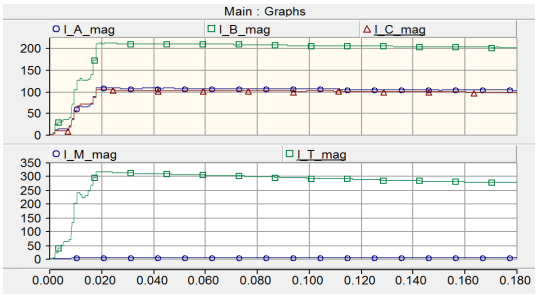

Fig. 9. fundamental current primary three phase and secondary two phase

Fig. 10과 Fig. 11은 2차측 T상 전류의 고조파를 나타낸다. 고조파는 7고조파까지 추출하였으며, 기본파부터 7고조파까지 확인할 수 있다. 기본파를 기준으로 2고조파가 67.82%로 가장 많은 함유율을 나타냈고 다음으로 3고조파가 35.70%를 나타 냈다.

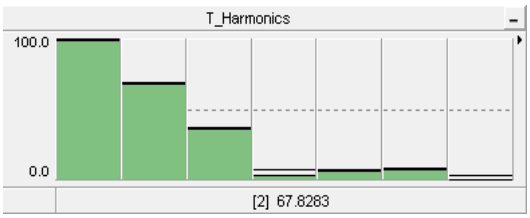

Fig. 10. Harmonics of secondary T phase current

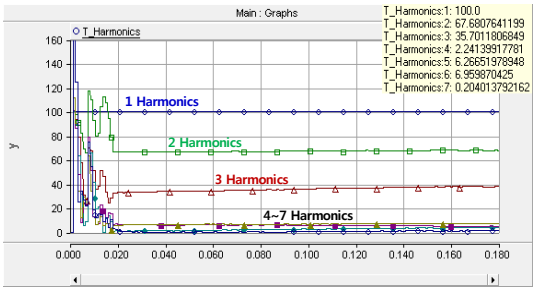

Fig. 11. Harmonics of secondary T phase current

2고조파 함유율이 매우 높은 것은 변압기 돌입전류로 인한 것임을 유추할 수 있고, 지속시간도 1,000 ms를 초과하는 것을 알 수 있다.

A변전소에서 발생한 두 가지 경우의 오동작 이력이 거의 유사하게 나타났으며, 이는 변압기 돌입 전류로 인한 것임을 확인하였다. 이러한 오동작을 방지하기 위해 기존의 2고조파 전류의 억제 값을 보다 더 높게 설정하고, 지속시간 1,000ms를 2,000ms로 설정 변경하여 운용

할 경우 다수의 오동작을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 스코트 변압기가 소손되지 않는 시간 내에 차단하기 위해 변압기의 내력과 돌입전류 크기 및 지속시간의 상관관계에 대해 추가적으로 검토해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내 A 변전소의 실제 사고 데이터를 이용하여 비율차동계전기 동작 사례를 분석하였다. 이를 위해 먼저 스코트변압기의 전류 분포, 비율차동계전기의 특성 및 변압기 돌입전류 특성에 대해 제시하고, PSCAD/EMTDC의 File read library, FFT library를 활용하여 고장 전류 데이터를 분석하였으며 스코트변압기 비율차동계전기도 모델링하여 동작여부를 재확인하였다. 동작 사례의 전류 데이터 분석 결과 전류 데이터에 2고조파의 함유율이 높은 것으로 나타났고 이는 변압기 내부사고로 인한 전류가 아닌 변압기 가압시 발생하는 돌입전류로 인한 오동작임을 확인하였다. 이를 개선하기 위해 변압기 보호계전기 설정 값 중 2고조파 억제값을 기존 보다 높게 설정하고, 지속시간도 2,000ms로 길게 설정하여 오동작 사례의 빈도수가 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] Jung Chul Kim, “Analysis on feeding system and Understanding on the electrical characteristics of the korean railway”, Gidari, pp. 18, 2008.

[2] IEEE Std C37.91, 『IEEE Guide for Protecting Power Transformer』, pp. 19, 2008.

[3] ICE, “DIGITAL MULTI-FUNCTION RELAY DIFFERENTIAL PROTECTION FOR TRANSFORMERS NPDT USER’S GUIDE”, pp. 11, 2009.

[4] CIGRE Working Group C4.307, “Tranformer Energization in Power System : A Study Guide”, 2014.

[5] Steven Hodder, Bogdan Kasztenny, Normann Fischer, and Yu Xia, “Low Second-Harmonic Content in Transformer Inrush Currents – Analysis and Practical Solutions for Protection Security”, 67th Annual Conference for Protective Relay Engineer, 2014.
DOI: https://doi.org/10.1109/CPRE.2014.6799037

[6] Kyoung-Ho Kim, Jong-Hweon Lee, Kyeong-Yeol Kim, “The method of the regenerating COMTRADE data using PSCAD”, Conference for The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 584-585, 2014.

[7] Chul-Won Park, “Power Transformer Modeling and Transient Analysis using PSCAD”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers vol. 65P, no. 2, pp. 122-129, 2016.
DOI: https://doi.org/10.5370/KIEEP.2016.65.2.122

이 종 화(Jong-Hwa Lee) **[정회원]**

- 1995년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (학사)
- 2013년 2월 : 우송대학교 대학원 철도전기시스템학과(석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 우송대학교 대학원 철도전기시스템학과(박사과정)
- 1988년 2월 ~ 현재 : 한국철도공사 부장

<관심분야>
전기철도, 정보통신, 신호제어

노 영 환(Young-Hwan Lho) **[정회원]**

- 1982년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (학사)
- 1988년 2월 : University of New Mexico 전기공학과(전기공학석사)
- 1993년 2월 : Texas A&M University 전기공학과(전기공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도전기시스템학과 교수

<관심분야>
회로설계, 적응제어, 신호처리