

변압기 보호용 비율차동계전기의 고조파 영향에 관한 연구

(A Study on the Harmonics Effect of Ratio Differential Relay for Transformer Protection)

김경철* · 황영록 · 고희 · 정동원 · 정해성 · 이동욱 · 정채호 · 이재윤**

(Kyung-Chul Kim · Young-Rok Hwang · Hun Kho · Dong-Won Jung · Hae-Sung Chung ·
Dong-Wook Lee · Chae-Ho Jeong · Jae-Yoon Lee)

Abstract

Power transformers are applied throughout the power system to connect systems of different voltage to one another. Since a ratio differential relay offers high sensitivity in detection of internal faults in power transformers, it is widely used in the main protection system. The use of nonlinear devices such as rectifiers and other devices utilizing solid state switching have been increased in industry during recent years. For nonlinear loads, the load current is not proportional to the instantaneous voltage. This situation creates harmonic distortion on the system. The harmonic could differential relay misoperation if not recognized. This paper aims at analyzing and probing into the influences of harmonics on a ratio differential relay for power transformer protection.

Key Words : Transformer Protection, Ratio Differential Relay, Harmonics, Inrush Xurrent

1. 서 론

변압기는 전력계통에서 전압 계급이 다른 시스템을 연결시키는데 널리 사용되고 있다. 변압기 보호용으로 사용되는 차동계전기는 변압기 내부의 사고에 민감하게 반응하므로 널리 쓰이고 있다. 그러나 변압기

가 투입될 때 돌입전류가 발생하는데, 돌입전류는 1차권선에만 발생하고 2차측에는 거의 영이 된다. 돌입전류의 고조파를 분석해 보면 제 2고조파가 가장 많이 포함된 고조파 전류이고, 이 때 생기는 차전류로 인해 차동계전기가 작동할 수 있다. 일반적으로 차동계전기는 돌입전류가 짧은 시간(0.5초 이내) 안에 발생하므로 동작 억제 기능을 갖추고 있고, 고조파 필터 기능을 갖춘 것도 있다[1-2].

정류기 부하와 같은 비선형 장비는 고조파 전류 발생원인이 된다. 차동계전기가 많은 고조파를 포함하는 환경에서 사용될 때는 오동작을 일으킬 원인이 될 수도 있다[3-4].

본 논문은 전력 변압기 보호용으로 널리 쓰이고 있는 비율차동계전기(Ratio Differential Relay)의 고조

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 석사과정
* Main author : Professor of Electrical Engineering
Department, Hongik University
** Corresponding author : Master's Course, Hongik
University
Tel : 044-860-2568, Fax : 044-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 18일
1차심사 : 2014년 3월 20일, 2차심사 : 2014년 3월 28일
심사완료 : 2014년 4월 11일

과 영향을 분석하고 모의하고자 한다.

2. 사례연구 시스템

사례연구 시스템은 한전 변전소에서 정류기 부하로 전력을 공급하는 구성이다.

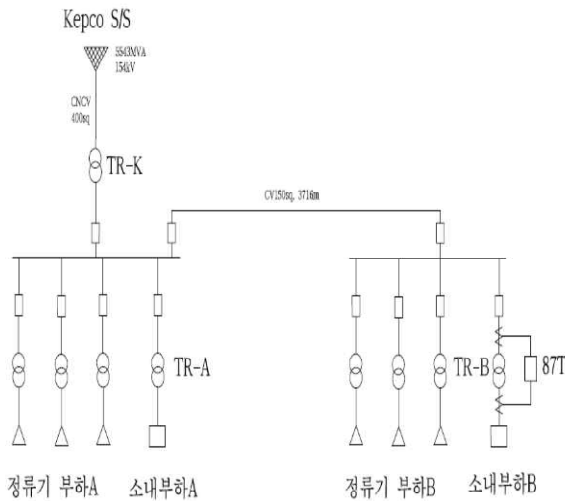


그림 1. 사례연구 시스템의 단선도
Fig. 1. Single line diagram of the case study system

한전 변전소는 단락용량이 5,543MVA, 공급전압은 154kV이다. 한전변압기는 45/60MVA, 154/22.9kV, %Z=10, X/R=30이다. 배전선로는 CNCV 400mm², 1,818m으로 임피던스는 0.0624+j0.136Ω/km이다. 부하간의 연결선로는 CV 150mm², 3,716m로 임피던스는 0.157+j0.154Ω/km이다. 부하변압기는 5,000kVA, 22.9/6.6kV %Z=5.61, X/R=12이다.

사례연구로 소내부하 B에 설치된 비율차동계전기가 있다.

3. 변압기 보호용 비율차동계전기

비율차동계전기는 기호를 나타내면 87T이다. 변압기 보호용 87T는 다음과 같이 설치하며 보호구간에서 일어나는 고장에 한해서 해당 차단기를 Off 하여 고장을 선택 차단하는 임무를 가진다[5].

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 정상 상태 또는 외부 고장의 경우에는 동작코일에 전류가 흐르지 않으므로 계전기는 동작하지 않는다. 이론적으로는 이러한 동작이 이상적이지만 변압기의 1차와 2차에 사용된 변류기(Current Transformer)의 특성에 따라 Ratio 오차에 따른 차전류가 동작코일로 유입하여 예기치 못한 오동작이 발생할 가능성이 있다. 특히 보호 범위 외부에서 발생한 단락과 같은 대전류가 흐르는 고장이 발생할 경우 약간의 CT 특성차에 의해서도 큰 오차전류가 동작코일에 흘러 계전기를 동작시킬 수 있다. 이를 보완하기 위해 아날로그형 비율차동계전기는 동작코일 및 억제코일로 구성된다.

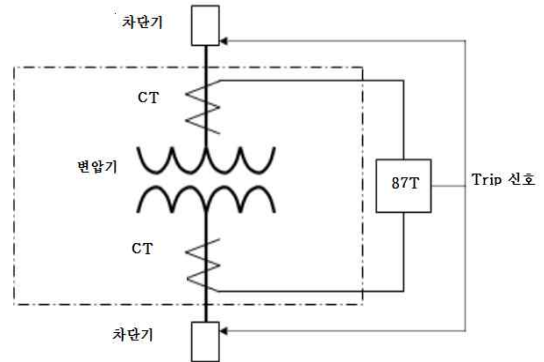


그림 2. 87T의 동작원리
Fig. 2. Operational principle of 87T

4. 비율차동계전기 시험

87T계전기시험은 정류기용 변압기의 투입시간과 계전기의 Block time을 변경시켜 다양한 조건으로 계전기의 Trip 여부를 확인하고, 정류기 부하 및 변압기 부하에 흐르는 고조파 전류를 측정하였다.

시험중 대부분 Trip이 발생하지 않았지만, 4번의 계전기 Trip이 있었다. 요약하면 표 1과 같다.

정류기용 변압기 투입 시 발생하는 고조파 전류는 한전측과 급전소 부하용 변압기로 유입되는 것으로 측정되었다. 특히 정류기부하로 인한 제2고조파 함유율이 많았다.

그림 3은 특성 시험 시 측정된 정류기용 변압기 선

로에 발생하는 고조파 전류를 나타낸다. 편의상 Trip이 된 사례연구 시험중 첫 번째(No.1) 경우만 나타내었다. 데이터에서 알 수 있듯이 고조파 전류는 정류기용 변압기의 투입위상에 따라 그 크기 및 유지시간이 일정치 않음을 확인 되었다.

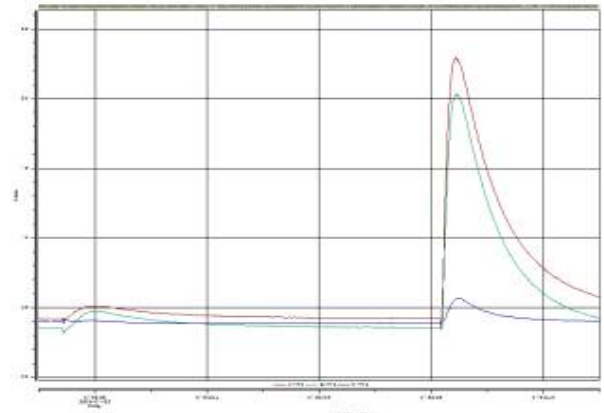
그림 3에서 X축은 시간(sec)을 나타내고, Y축은 총 고조파 전류(A), 제 2고조파 함유량(%), THD 및 제 2고조파 전류(A)로 표 2와 같다.

표 1. 비율차동계전기 시험

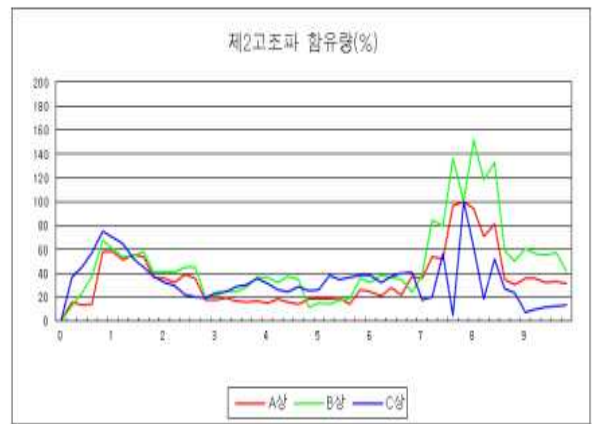
Table 1. Tests of the 87T

NO	투입간격 (sec)	Block time (sec)	변압기 투입순서	측정 최대 전류(A)		계전기 동작 여부
				R상	S상	
1	6	0.2	정류기 1, 2호	R상	2.3	○
				S상	2.0	
				T상	0.6	
2	3	0.3	정류기 1, 2호	R상	2.3	○
				S상	2.0	
				T상	0.6	
3	3	0.3	정류기 1, 3호	R상	2.2	○
				S상	0.5	
				T상	2.5	
4	3	0.1	정류기 2, 3호	R상	1.3	○
				S상	1.4	
				T상	0.9	

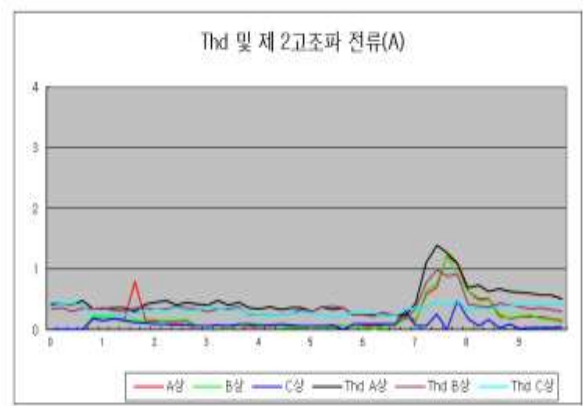
여러 가지 경우의 투입조건 및 Block time에서 전력 분석을 한 결과 변압기의 투입간격이 3초에서는 계전기의 억제시간이 너무 짧아 Block 해제된 이후에도 차 전류가 정정치를 초과하여 Trip이 된 것으로 판단된다. 소내부하가 거의 없는 상태에서의 분석결과 비율차동계전기는 동작억제시간(5sec) 이후에 정류기용 변압기에서 발생하는 고조파 전류가 1A이상이 소내부하용 변압기로 유입되면 Trip되는 것으로 확인되었다. 변압기 투입시간을 6초로 변경하고 Block time 5초로 설정된 후에도 첫 번째 투입된 정류기용 변압기의 돌입전류가 발생하는 0.5초 이상 지연된 시점에서 부하용 변압기에 고조파를 함유한 유입전류가 발생하여 계전기 Block이 설정되고, 계전기 및 차단기 투입



(a) 총 고조파 전류 (A)



(b) 제2고조파 함유량 (%)



(c) THD(%) 및 제 2고조파 전류 (A)

그림 3. 87T 시험 (NO.1)

Fig. 3. 87T test (NO.1)

표 2. 87T 시험(NO.1)
Table 2. 87T test(NO.1)

제2고조파 함유량(%)			
시간(sec)	A상	B상	C상
0.2	0.6	0.56	0.7
0.4	16	12.4	36.2
0.6	13	23.7	45.4
0.8	14	37.7	57.6
1	58.5	67.5	75
1.2	58.3	60.3	70.3
1.4	51.3	53.6	65.4
1.6	55.6	54.3	52.4
1.8	53.4	58.5	45
2	36.5	40.7	37.9
2.2	35.4	41.2	32.5
2.4	32.4	41.3	29.8
2.6	39.3	45.4	22.1
2.8	35.4	44.9	20.2
3	17.8	20.1	19.4
4	16.8	36.8	35.6
5	18.3	11.7	25.5
p	26.6	36.2	38.4
7	37.1	24.5	41
8	81.9	22.9	51.4
9	30.7	50.6	23.8
10	31.3	41.5	13.5

시간(sec)	제2고조파 전류(A)			총 고조파 전류(A)		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
0.2	0.01	0.01	0.01	0.42	0.35	0.4
0.4	0.01	0.01	0.01	0.42	0.36	0.42
0.6	0.01	0.01	0.01	0.41	0.31	0.43
0.8	0.01	0.01	0.01	0.48	0.37	0.41
1	0.2	0.23	0.18	0.35	0.35	0.24
1.2	0.16	0.21	0.16	0.35	0.36	0.26
1.4	0.2	0.2	0.18	0.36	0.32	0.25
1.6	0.17	0.16	0.16	0.37	0.3	0.24
1.8	0.8	0.17	0.13	0.31	0.37	0.28

시간(sec)	제2고조파 전류(A)			총 고조파 전류(A)		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
2	0.15	0.14	0.11	0.42	0.37	0.31
2.2	0.16	0.13	0.1	0.45	0.34	0.34
2.4	0.14	0.15	0.09	0.48	0.35	0.32
2.6	0.12	0.15	0.08	0.41	0.38	0.36
2.8	0.14	0.17	0.08	0.46	0.37	0.31
3	0.07	0.06	0.06	0.42	0.35	0.33
4	0.06	0.09	0.09	0.36	0.25	0.26
5	0.06	0.03	0.07	0.37	0.33	0.28
6	0.06	0.08	0.1	0.25	0.24	0.29
7	0.25	0.19	0.32	0.25	0.19	0.33
8	1.09	0.91	0.48	1.1	0.92	0.48
9	0.19	0.2	0.09	0.63	0.41	0.4
10	0.15	0.12	0.05	0.51	0.3	0.41

시 지연시간이 길어질 경우, 두 번째 투입된 정류기용 변압기에 의한 소내부하용 변압기에 유입한 고조파 전류로 계전기는 차전류로 인식하여 Trip의 원인이 될 수 있다.

5. 고조파 시뮬레이션

고조파 시뮬레이션은 미국의 Operation Technology Inc.에서 개발한 ETAP(Electrical Transiant Analyzer Program)을 이용하였다[6].

5.1 간단한 등가회로를 이용한 고조파 해석

그림 1의 사례연구 시스템을 간단한 등가회로로 나타내면 그림 4와 같다[7].

여기서 I_H 는 정류기용 변압기의 고조파 유출 전류(A), I_{H1} 은 한전측 고조파 유입전류(A), I_{H2} 는 소내부하 변압기의 고조파 유입전류(A)이다. Z_{T1} 은 한전 변압기의 임피던스(pu), Z_{D1} 은 배전선로 임피던스(pu), Z_{D2} 는 연결선로 임피던스(pu), Z_{T2} 는 소내부하용 변압기의 임피던스(pu)이다.

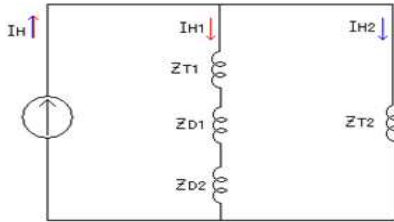


그림 4. 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit

수치를 대입하면 정류기 변압기 투입 시 발생하는 고조파 전류는 한전측과 부하용 변압기측으로 분류되며, 한전측으로 약 75%가 유입되고 부하용 변압기 측으로 약 25%가 유입됨을 알 수 있다.

5.2 ETAP을 이용한 고조파 해석

ETAP을 이용하여 간소화시킨 단선도(그림 5)에 정류기 부하 7,000kVA, 전류 699.2Arms, THD 70.61%를 적용하고자 한다.

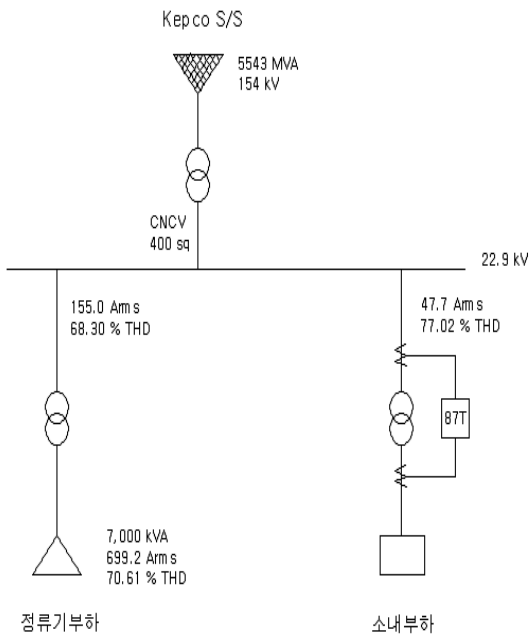


그림 5. 간소화시킨 단선도(동조필터 설치전)
Fig. 5. Simplified single line diagram (with the filter)

분석결과는 정류기 부하측으로 전류 155.0Arms, THD 68.3%가 유입되고, 소내부하측으로는 전류 47.7Arms, THD 77.02%가 유입되어 간단한 등가회로를 이용한 고조파 해석과 유사하였다.

5.3 동조필터 적용

그림 6은 고조파 저감기법으로 상용되고 있는 동조필터의 구성을 보여주고 있다.

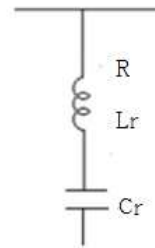


그림 6. 동조필터
Fig. 6. Resonance filter

동조필터는 리액터와(Lr)와 콘덴서(Cr)가 직렬로 연결되어 있다. 동조필터의 설계값은 부하에 따라 정해진다. 즉 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에 동조가 일어나도록 하면 된다.

$$h = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{LrCr}}$$

여기서 ω_0 는 시스템 각주파수로 377rad/s이다. 부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조필터의 임피던스는 저항이 작을 경우 거의 영이된다. 따라서 동조 주파수의 전류는 동조필터로 유입되는 원리이다. 고조파 전류 평가결과로 보면 제 2차 고조파 함유율이 높으므로 제2차 동조필터를 설계하여 설치전, 후의 고조파 평가를 하기로 한다.

그림 7은 그림 5에 동조필터 500kVAR을 적용한 ETAP 시뮬레이션 결과를 보여준다.

동조필터를 적용하면, 정류기 부하측으로 전류 115.1Arms, THD 68.30%가 유입되고, 소내부하측으로는 동조필터 설치 전(전류 47.7Arms, THD

77.02%)보다 적은 전류 34.3Arms, THD 29.66%가 유입되어 비율차동계전기는 Trip되지 않음을 확인할 수 있었다.

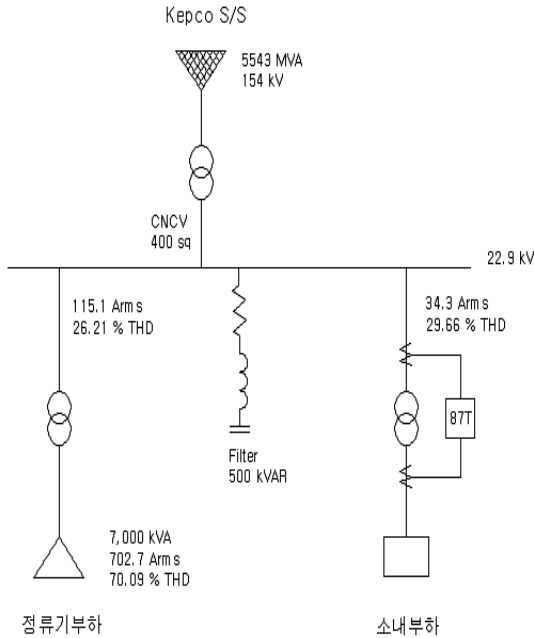


그림 7. 간소화시킨 단선도(동조필터 설치후)
Fig. 7. Simplified single line diagram (with the filter)

6. 결 론

변압기의 돌입전류는 0.5초 이내에만 발생하므로 비율차동계전기의 제 2고조파 동작 억제시간(Block time)을 0.5초 이상으로 하여야 한다.

정류기용 변압기 돌입전류(고조파)에 의한 비율차동 계전기의 오동작을 방지하기 위한 방안으로 첫째, 정류기용 변압기 투입간격(6초)을 고려하여 제 2고조파 동작 억제 시간을 3초로 하는 방안과 둘째, 정류기용 변압기 모선에 고조파필터를 설치하여 소내 부하용 변압기로 유입되는 고조파전류를 감소시키는 방안이 있다.

첫째 방안 적용 시 비율차동 계전기 제 2고조파 동작억제 시간이 첫 번째 투입된 변압기 돌입전류가 소멸된 상태에서 다시 적용되므로 제 2고조파에 의한 비

율차동 계전기 오동작을 방지할 수 있으며, 둘째 방안 적용 시에는 정류기 부하 변압기에서 소내부하용 변압기로 고조파전류가 유입되고 있으므로 변압기 모선에 고조파필터를 설치하여 유입되는 고조파전류를 감소시키면 계전기 오동작을 감소시킬 수 있다.

References

- [1] Randy Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection", IEEE Transactions on Industry Applications, July / August 2013.
- [2] IEEE Std 242-2001, "Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Buff Book.
- [3] Jin - Maun Ho and Tsung - Ling Tsou "The Effect Analysis and Simulation Test of Harmonics on Differential Protection of Scott Transformers", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference.
- [4] J.W. Ho and C. C. Liu, "The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer", 2001 CIRED Conference.
- [5] Zoran Gajic, "Use of Standard 87T Differential Protection For Special Three - Phase Power Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, July 2012. Electrical Power Energy Conference.
- [6] "Electrical Transient Analyzer Program", Operation Technology Inc.
- [7] Zhi - Guo Hao, and at al., "Study on the Transformer Protection Principle Based on the Equivalent Circuit Equation", 2005 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference.

◇ 저자소개 ◇



김경철(金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년 ~ 현재 홍익대학교 전기공학과 교수.



황영록(黃永祿)

1964년 2월 23일생. 1991년 인천대학교 전기공학과 졸업. 1991~1995년 한전 영광원자력본부Q.A. 1995~2000년 한국전기안전공사 기술부. 2000~2006년 서울 유일ENG 진단부. 현재 (주)한국전기기술투자대표이사. 건축전기설비기술사.



고 훈(高 勳)

1979년 11월 2일생. 2012년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2014년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



이동욱(李東昱)

1979년 1월 19일생. 2005년 울산대학교 전자공학과 졸업. 2012년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 삼성전자 전기안전 업무 수행중.



정동원(鄭東源)

1982년 12월 29일생. 2011년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



정채호(鄭采鎬)

1966년 9월 25일생. 1994년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2012년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



정해성(丁海成)

1981년 6월 24일. 2005년 국립천안공업대학 전기과 졸업. 2008년 국립환경대학교 전기공학과 편입. 2010년 국립환경대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 한국전력기술인협회 재직중.



이재윤(李在允)

1986년 1월 13일생. 2013년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.