

154kV 전력용 변압기의 온도분포에 관한 연구

(The Study on the Temperature Distribution for 154kV Power Transformers)

우정욱* · 구교선 · 곽주식 · 김경탁 · 권동진**

(Jung-Wook Woo · Kyo-Sun Koo · Joo-Sik Kwak · Kyung-Tak Kim · Dong-Jin Kweon)

Abstract

The temperature of power transformers is very important factor for power system operation in substation because load capacity and limited lifetime of power transformers are determined by winding temperature. Also, The temperature of power transformers varies with the structure, capacity, operation condition and manufacturers. Thus, it is necessary for temperature distribution to be exactly investigated because of efficient load management and prediction of limited lifetime. Nevertheless, there was no case of analysis as well as measurement of the temperature of power transformers. In this paper, we manufactured the 154kV standard power transformer for the test. And we measured the temperature by the heat run test and analyzed the temperature distribution of transformer.

Key Words : Power Transofrmer, Temperature, Temperature Distribution, Optical Fiber Sensor, Heat Run Test

1. 서 론

전력용 변압기는 변전소내의 설비중 가장 중요한 설비로, 전력설비의 안정적인 운영을 위해 변압기의 효과적인 운영 및 수명관리가 기본이 된다.

그림 1과 같이 1960년대 이전부터 설치된 변압기를 시작으로, 최근 전력산업이 성숙됨에 따라 1970년대 이후에는 그 설치대수가 급격히 증가하여, 현재 약 5,000여대의 전력용 변압기가 설치되어 운전

중이다[1]. 일본의 변압기 기준인 JEC 2200에서는 변압기의 수명을 약 30년으로 보고 있어, 한계수명에 근접할 경우 절연물의 열화에 의한 사고위험성이 증가한다[2].

국내에도 사용년수가 30년에 근접한 변압기가 증가함에 따라 절연사고의 위험성이 높아지고 있다. 변압기 절연물의 열화는 변압기 운전온도와 밀접한 관계가 있으며[3], 변압기의 온도는 부하에 따라 달라진다. 따라서 부하별로 변압기 온도변화의 정보가 변압기의 잔존수명을 예측할 수 있는 기본 자료가 된다.

그러나 현재 전력용 변압기의 온도를 확인할 수 있는 방법은 아날로그 권선온도계를 통해 확인하는 방법이 유일하며, 이들에 대한 데이터도 체계적으로 관리되지 않고 있다. 특히 권선온도계가 지시하는

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

** 교신저자 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-5892, Fax : 042-865-5809

E-mail : jwoo@kepri.re.kr

접수일자 : 2011년 6월 23일

1차심사 : 2011년 6월 25일

심사완료 : 2011년 8월 10일

온도는 아날로그로 표시되어 그 분해능이 떨어지며, 변압기 손실분에 비례하는 전류를 흘려 온도를 예측하는 방법으로 실제 온도와는 오차가 존재한다. 따라서 부하별 온도데이터의 확보가 변압기의 수명관리 측면에서 중요하며, 현재 온도측정 시스템을 수명예측에 직접적으로 연결시키기는 어려우며, 더군다나 현재까지 국내에서는 부하에 따라, 변압기 내부 각 부분에서의 온도변화를 실제로 측정할 사례는 없었다[4].

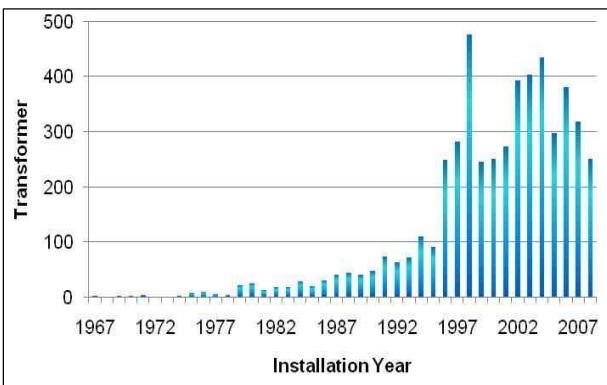


그림 1. 전력용 변압기의 년도별 설치수량
Fig. 1. The number of installed power transformers per year

본 논문에서는 154kV 전력용 변압기 내부의 온도를 직접 측정하고 분석한 결과에 대해서 기술하였다. 변압기 내부의 온도분포를 직접 측정하기 위하여 시험용 변압기를 제작하고[4], 온도측정용 센서를 내부에 삽입하였으며, 정격용량의 30~120[%]까지 5단계로 온도상승시험을 실시하여 측정된 온도값과 그 결과에 대해 분석하였다.

2. 시험용 변압기 제작

실제 운전중인 변압기와 동일한 조건에서의 온도분포를 확인하기 위하여, 국내에서 사용되고 있는 표준형 154/22.9kV, 15/20MVA 변압기를 그림 2와 같이 제작하고 각 부하별 온도를 측정하였다. 표 1은 사용된 광섬유 온도센서의 제원으로 온도 측정 범위는 20~275[°C]이다.



그림 2. 시험을 위해 제작된 변압기 및 센서
Fig. 2. Power transformer and sensor for test

표 1. 광섬유 센서의 제원
Table 1. Specification of optical fiber sensors

Classification	Specification
Operating Temp. Range	20~275[°C]
Response Time	0.2 Seconds
Fiber	SMF28-Compatible
Probe (Dia.×Length)	1.07×27.1[mm]
Fiber Bend radius	Over 17[mm]
Cable Type	0.9[mm] Fiberglass Braid

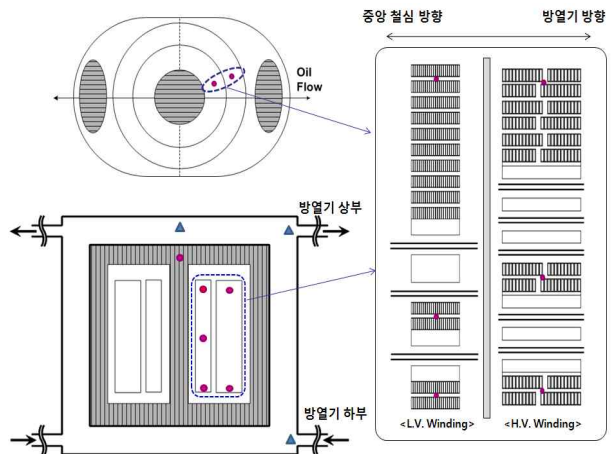


그림 3. 변압기내 센서 설치 위치
Fig. 3. The sensor locations in the power transformer

그림 3은 시험을 위해 제작된 154kV 변압기 내부의 온도센서 설치위치를 표시한 것이다. 온도센서(▲)는

3개의 서머커플러와 14개의 광섬유센서(●)를 설치하였다.

서머커플러는 방열기의 냉각성능을 파악하고 변압기 내부를 기준으로 인입 및 인출되는 지점에서의 온도를 확인하기 위해 인입구와 인출구에 각각 1개씩을 설치하고, 오일의 상부온도를 측정하기 위하여 변압기 상부에 1개를 설치하였다. 또한 본 시험에서는 권선에서의 온도분포를 확인하기 위하여 변압기의 상부, 중부, 하부로 나뉘어 14개소에 광섬유 온도센서를 배치하였다. 광섬유 온도센서는 저압권선에 7개, 고압권선에 6개를 설치하였다. 또한 철심의 발열을 확인하기 위하여 중앙철심 상부에 광섬유 온도센서를 삽입하였다.

3. 측정결과 및 고찰

일반적으로 변압기 제작 후 온도상승 시험을 수행하여 변압기의 건전성을 평가한다. 변압기의 온도상승을 시험하는 방법은 실부하법, 반환부하법, 단락법 등 크게 3가지로 구분할 수 있다[5].

실부하법은 변압기에 정격용량에 해당하는 실제 부하를 연결하여 온도상승시험을 하는 방법으로, 정확도는 우수하지만 대용량 전원설비가 필요하기 때문에 전력용 변압기와 같이 대용량 설비의 시험은 어렵다.

반환부하법은 특성이 같은 변압기의 고압측은 고압측끼리, 저압측은 저압측끼리 연결하여, 정격전압을 인가하고 회로 중간에 동손 전류를 공급할 수 있도록 회로를 구성하는 방법으로, 시험하고자 하는 변압기와 특성이 같은 변압기가 있어야 한다.

단락법은 주로 공장에서 검수시험을 목적으로 사용하고 있으며, 권선을 단락시켜 변압기 전손실(무부하손과 부하손)에 해당하는 전류를 흘려 오일온도 상승을 시험하고, 정격전류를 흘려 권선 온도상승을 시험하는 방법을 사용한다. 간단히 시험이 가능하여 대용량 변압기 시험으로 가장 일반적으로 사용된다.

본 시험에서는 단락법을 이용한 온도상승시험을 실시하였다. 주변온도 20[°C]에서 전류를 인가하기 시작하여 정격용량의 30[%]에서 120[%]까지 부하를 변화시켰을 때의 온도를 측정하였다. 오일온도 상승은 변

압기 상부에 설치된 서머커플러를 이용하여 상부오일 온도를 측정하고, 데이터 로거로 기록하였다.

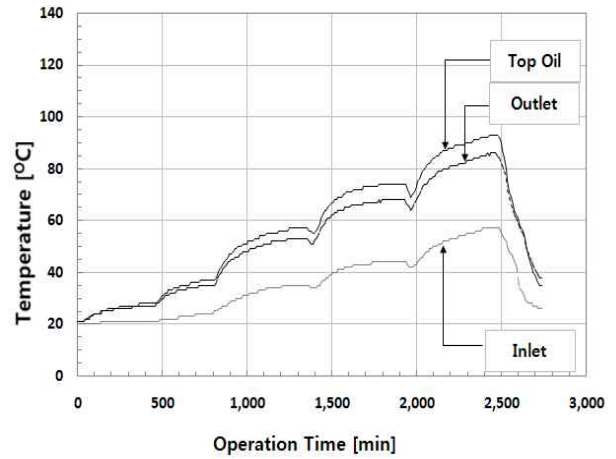


그림 4. 온도상승시험에 따른 오일 온도
Fig. 4. The oil temperature by heat run test

그림 4는 변압기 내부로 오일이 인입되고 인출되는 지점과 변압기 상부에 설치된 서머커플러에 의해 측정된 오일의 온도분포이다.

100[%] 부하일 때를 기준으로, 변압기 내부에서 오일의 온도가 상승되어 방열기쪽으로 인출되어 나가는 지점에서의 온도는 69[°C]로, 방열기를 거쳐서 다시 변압기로 들어오는 온도가 46[°C]로, 방열기에서는 약 23[°C]의 방열효과가 있음을 확인하였다. 변압기 상부에서 측정된 온도는, 역시 100[%] 부하의 경우 약 69[°C]로, 온도상승치가 49[°C]로써 기준치인 60[°C]를 만족하고 있다.

그림 5는 단락법을 이용한 온도상승시험을 실시하고 각 권선에 설치된 센서에서 측정된 권선온도이다. 주변온도 20[°C]에서 전류를 인가하기 시작하여 정격용량의 30[%]에서 120[%]까지 부하를 변화시켰을 때의 온도변화 그래프이다.

그림에서 저압 권선의 상부를 제외한 다른 부위에서는 동일한 부하가 지속되면 온도가 포화된 상태로 지속되지 않고 약간씩 증가하는 경향이 있는 반면, 상대적으로 온도가 높은 저압 권선의 상부에서는 동일 부하에서 온도의 증가는 거의 나타나지 않고 있다. 또한 저압권선의 상부에서 부하가 100[%] 이상인 경우 다

른 곳에 비해서 부분적으로 온도의 변화가 상대적으로 많았다.

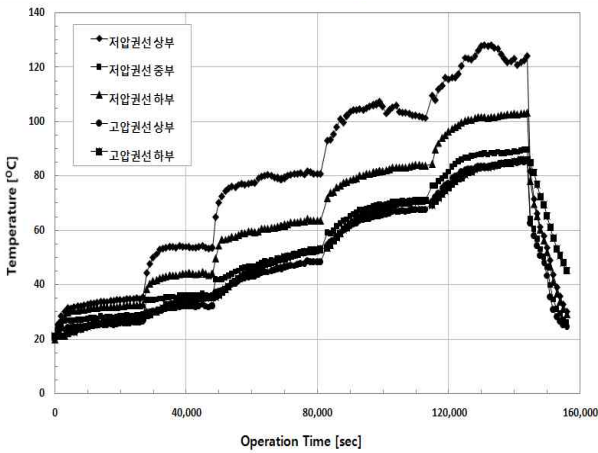


그림 5. 온도상승시험에 따른 권선의 온도
Fig. 5. The winding temperature by heat run test

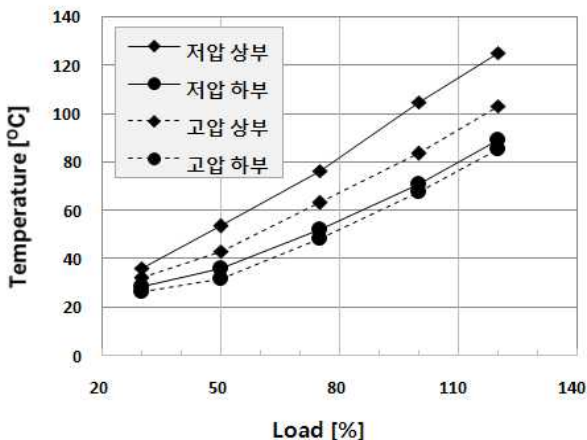


그림 6. 부하에 따른 권선의 온도
Fig. 6. The winding temperature per loads

그림 6은 동일한 데이터를 이용하여 각 위치에서 부하별 측정된 온도의 대표값을 그림으로 표시한 것이다. 실선은 저압권선의 상부 및 하부온도를, 점선은 고압권선의 상부 및 하부의 온도를 나타낸 것이다.

하부에서는 최초 절연유가 유입되는 지점에서 그리 멀지 않은 곳이어서 저압권선과 고압권선의 온도가 거의 동일하며, 부하의 변동에 따라 온도 상승도 선형적으로 변동되고 있다. 상부에서도 하부에서와 같이

부하가 증가함에 따라 온도가 선형적으로 상승하고 있다. 상하부 모두 부하에 따른 온도변화가 선형적으로 변화함에 따라 현재 운영중인 온도 측정방법 및 평균권선온도 추정방법이 어느 정도 유효한 방법이라 생각된다. 하지만 고압권선과 저압권선간의 온도 크기값을 비교할 때 부하가 증가할수록 두 권선간의 온도차가 크고, 저압권선에서 온도가 더 높다.

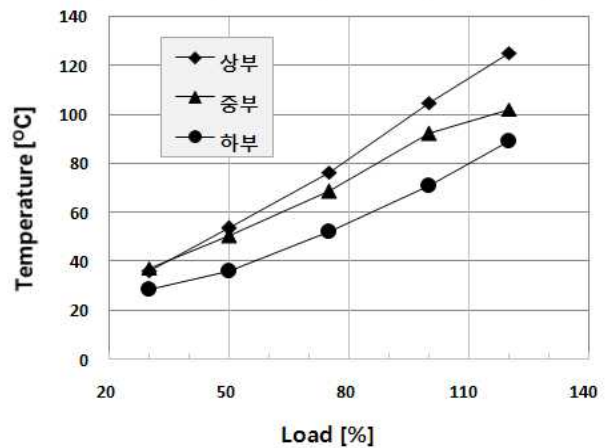


그림 7. 부하에 따른 저압권선의 온도분포
Fig. 7. The winding temperature of low voltage per loads

현재 평균권선온도의 측정은 저항측정 및 외삽법을 통해 권선온도를 추정하는 방법을 사용하고 있어, 추정치는 오차를 가질 수 밖에 없다. 따라서 본 논문에서 측정된 권선 상중하부의 온도 데이터와 외기온도, 부하정보 등을 종합하면 추정치의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

그림 7은 저압권선내에서 부하가 증가할 때 각 위치별 온도이다. 변압기 내부에서의 발열은 변압기 손실에 의해 발생되기 때문에 부하가 증가할수록 동손이 증가하여 변압기 내부의 발열은 증가한다. 변압기의 손실은 히스테리시스손, 와류손 등의 무부하손과 동손, 표류부하손 등의 부하손으로 나뉜다[6].

히스테리시스손은 철심의 비선형적 자기특성에 의해 교번자계에서 잔류자속으로 발생되며, 와류손은 철심 강판에 직각으로 자속이 쇄교하여 변화되어 기전력이 발생하고, 이에 따라 맴돌이 전류가 발생한다.

동손은 권선의 저항에 의해 발생하는 열이며, 와류 손은 직교하는 자계에 의해 병렬도체의 순환전류, 표류부하손은 금구, 외함, 냉각관 등에 쇄교하여 발생하는 순환전류에 의한 손실이다. 따라서 저압권선의 상부에서 온도의 상승이 두드러지는 현상은, 저압 및 고압부분에 동일한 권선을 사용하고 있고, 상중하 위치가 달라도 권선은 동일하기 때문에 부하손에 의한 영향보다, 와류손 등 철심에 의한 손실이 해당부위가 많기 때문이다.

지금까지 변압기의 온도는 저압 및 고압권선 구별 없이 평균권선온도를 산정하고 있다. 그러나 절연물은 온도가 높을수록 열화가 빨리 진행되는 특성이 있으므로, 변압기 내부에서 온도분포를 파악하고, 각 위치에서의 부하별 온도데이터를 확보할 수 있으면 특정부위의 열화 상태를 추정할 수 있는 기초자료로 사용가능하다.

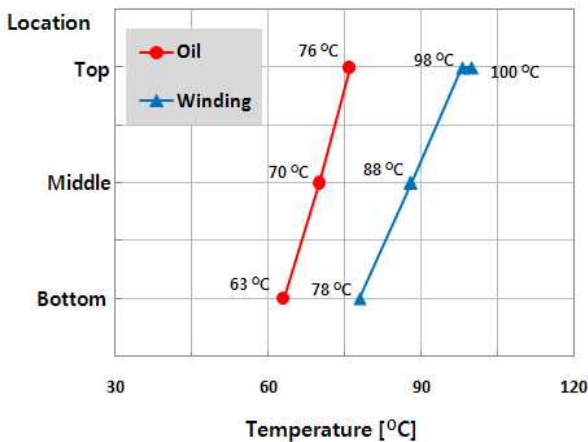


그림 8. 변압기 내부 온도분포 (설계치)
Fig. 8. The temperature distribution of the transformer(design)

그림 8은 변압기를 설계치를 근거로 변압기 내부의 온도분포를 제작사에서 예측한 값이며, 그림 9는 동일 지점에서 본 연구에서 시험을 통해 측정된 온도분포이다. 두 값을 비교하면 오일 온도는 하부에서 예측치보다 측정치가 4[°C] 낮게 시작되어 모든 지점에서 약간 낮은 값이나, 온도상승은 비슷한 경향이다. 반면 권선 온도는 하부에서는 예측치보다 낮은 온도에서 시

작되었어도 상부에서는 더 높은 온도가 측정되었다. 예측치는 100[°C]였으나 측정치는 106[°C]이었다. 실제 하부에서의 시작온도가 예측치보다 실측치가 낮았음을 감안하면 실제 온도차는 10[°C] 이상 뒀을 의미한다.

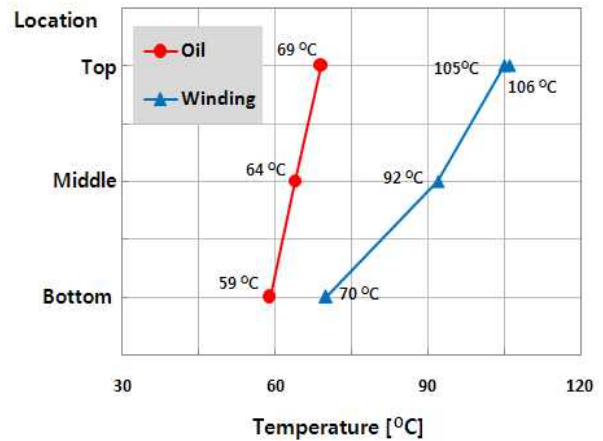


그림 9. 변압기 내부 온도분포 (측정치)
Fig. 9. The temperature distribution of the transformer(test)

또한 온도가 상승되는 기울기도 선형적으로 상승할 것으로 예측하여 설계되었으나 실측결과 상부로 갈수록 상승률이 더 급격해지고 있다.

따라서 IEC에서는 전력용 변압기의 경우 평균권선 온도와 평균오일온도차에 1.3배를 보정치 온도로 하여[7], 탑오일 온도와 보정온도의 합을 변압기의 핫스팟 온도로 설명하고 있으나, 이와 같은 방법도 상하부의 온도차와 기울기에 따라 핫스팟 온도추정치가 달라지므로 각 부위 및 운전 조건에서의 온도분포를 파악하여야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 154kV 표준 전력용 변압기를 제작하고, 온도상승 시험을 통해 온도를 측정하고, 변압기 내부의 저압권선, 고압권선 및 상하부 오일에서의 온도 분포를 분석하였다.

100[%] 부하를 기준으로 방열기에서는 약 23[°C]의

방열효과가 있었으며, 변압기 상부에서 측정된 온도가 약 69[°C], 온도상승치로는 49[°C]로써 온도상승치 기준인 60[°C] 범위내로 만족함을 확인하였다.

모든 부하에서 하부에서는 절연유가 유입되는 지점과 가까워 저압권선과 고압권선의 온도가 거의 동일하며, 부하의 변동에 따라 온도 상승이 선형적으로 변동된다. 상부에서도 부하증가에 따라 온도상승이 선형적이다. 하지만 고압권선과 저압권선간의 온도를 비교할 때 부하가 증가할수록 두 권선간의 온도차가 크고, 저압권선에서 온도가 더 높았다.

설계치의 최고온도는 100[°C]였으나, 측정치는 최고온도가 106[°C]이었다. 실제 하부에서의 시작온도가 계산치보다 실측치가 낮았음을 감안하면 실제 온도차는 10[°C] 이상 됨을 의미한다. 따라서 IEC에서는 전력용 변압기의 경우 평균권선온도와 평균오일온도차에 1.3배를 보정치 온도로 하여, 탑오일 온도와 보정온도의 합을 변압기의 핫스팟 온도로 설명하고 있으나, 이와 같은 방법도 상하부의 온도차와 기울기에 따라 핫스팟 온도추정치가 달라지므로 각 부위 및 운전 조건에서의 온도를 파악하는 것이 중요하다.

지금까지 변압기의 온도는 저압 및 고압권선 구별 없이 평균권선온도가 기록되어 관리되고 있다. 그러나 절연물은 온도가 높을수록 열화가 빨리 진행되므로 변압기 내부의 온도를 파악하고 각 위치에서의 부하별 온도데이터를 확보함에 따라 부하에 따른 온도를 평가하고, 최고점 온도를 예측하여 한계수명을 평가하기 위한 연구에 활용할 수 있다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2011년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

[1] 권동진 외, “전력용 변압기 사용수명 판정기준 수립을 위한 사전조사 연구,” KEPCO 연구보고서, 2008. 10.
 [2] IEC 2200, “Power Transformers,” The Japanese electrotechnical committee, 1995.
 [3] IEEE Std. C57.92, “IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers,”, 1995.
 [4] 구교선 외, “154kV 전력용 변압기 부하별 온도특성”, 한국조명·전기설비학회 2011 춘계학술대회 논문집, pp.34

1~342, 2011.
 [5] John J. Winders, Jr, “Power Transformers Principles and Applications”, Marcel Dekker, 2002.
 [6] Bharat Heavy Electricals Limited, “Transformers”, McGraw-Hill, 2003.
 [7] IEC 60076-2, “Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers”, 2011.

◇ 저자소개 ◇



우정욱 (禹貞旭)

1968년 9월 19일생. 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.

Tel : (042)865-5892

E-mail : jwwoo@kepri.re.kr



구교선 (具敎善)

1974년 9월 27일생. 2001년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임보연연구원.

Tel : (042)865-5894

E-mail : my1004@kepco.co.kr



곽주식 (郭周植)

1971년 11월 10일생. 1996년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.

Tel : (042)865-5893

E-mail : joosiki@kepco.co.kr



김경탁 (金慶鐸)

1978년 10월 1일생. 2005년 경북대학교 전기전자공학부 졸업. 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.

Tel : (042)865-5895

E-mail : eiff@kepco.co.kr



권동진 (權東震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1986년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 ~ 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.

Tel : (042)865-5890

E-mail : djkweon@kepri.re.kr