

RF 감지방식을 이용한 초고압 케이블 접속함의 상시감시장치 개발 전자식안정기의 고효율화 기술

이동영<위덕대학교 전기공학부>·이성익<포항산업과학연구원 기전연구팀>

1 서론

산업 사회의 고도화에 따라 안정적인 에너지 공급의 필요성은 날로 증대 되고 있는 실정이며 특히, 전기 에너지의 전송에 사용되는 송배전 설비에서 초고압케이블의 경우 문제가 발생할 확률이 아주 낮은 반면에 문제가 발생하는 경우 수용가에 심각한 피해를 가져온다[1]. 케이블의 결함 원인은 크게 제작불량과 시공불량 및 경년 열화가 주된 것으로 알려져 있다. 154[kV] 송전 케이블의 경우, 제작 시 최대 길이가 500m 이내로 제한되어 시공 시 접속부위가 많이 발생되고, 시공 불량에 의한 초기 결함을 가지는 경우 많다.

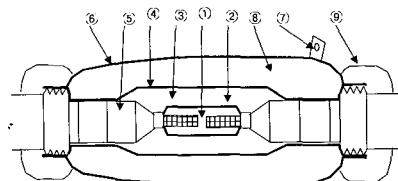
전력 케이블에서 발생하는 부분방전(PD: partial discharge)은 케이블의 열화 상태 및 사고에 대한 많은 정보를 제공하기에 오래 전부터 지속적인 연구 대상이 되어왔다[2]. 케이블 내부 결함에 의한 부분방전을 측정하는데 있어서, IEC-270에서 정한 커플링 유닛을 사용하는 방식이 표준으로 사용되는데, 활선 상태에서의 부분방전의 직접 측정은 어렵기 때문에 동반되는 음파를 측정하는 초음파 센서 사용 방법과 전자기장을 측정하는 전자파 방식 등이 연구되어 왔다[3~8].

본 연구에서는 154[kV] 케이블 접속부에 존재하

는 결함을 탐상하는 방법으로, 접속재 내부에 공극 또는 이물질이 존재하는 경우 발생하는 부분방전을 감지하는 방법에 있어서 VHF 대역 감지 RF 센서를 이용하는 새로운 방법을 제시하고, 기존 탐상 방법과의 차이점을 보이고, 실험 결과를 통해 제안된 결함 탐상 방법의 타당성 및 동작 성능을 입증한다.

2. 케이블 결함과 부분방전

전력용 케이블은 여러 종류가 있는데 근래에 들어 시공의 편의성, 유지보수의 용이성 및 환경 친화성 등의 이유로 지중선로의 대부분은 XLPE(cross linked polyethylene: 가교 폴리에틸렌) 케이블의 한 종류인 CV 케이블(XLPE Insulated and PVC Sheathed Cable: 가교 폴리에틸렌 절연 비닐 케이블)이 주종을 이루고 있으며 초고압케이블의 경우도 CV 케이블이 주종을 이루어 가고 있다. 초고압케이블은 배전급 케이블과는 달리 제작과정에서부터 엄격한 결함관리가 되고 있으므로 주 절연층의 사고발생 가능성은 낮다.



상 장치의 내부 블록도이다. 시험 케이블 접속부는 22(kV)급의 경우 0.5(m) 정도의 길이이고, 154(kV)급의 경우 2(m) 정도로 길다. RF 신호는 거리의 3승에 비례하여 감쇄하는 특성을 가지므로 취약부위인 양 끝 부분에 개별 센서를 장착한다. 센서는 광대역 RF 수신안테나로 구성되는데, 부분방전에 의한 RF 신호 대역인 1(MHz) - 30(MHz) 대역만 통과하도록 증폭 후 필터를 통과한다. 필터링 된 신호는 그림 5와 같은 적분 회로를 통과하여 디지털 데이터로 변환되며, FFT에 의한 스펙트럼 분석을 통해 전원 주파수의 2배 주파수 성분을 추출할 수 있다.

제안된 RF 감지 방식 케이블 접속부 비파괴 탐상 장치는 신호 적분 회로를 채용함으로써 주변 잡음의 영향을 적게 받으며, 전원 주파수의 2 배 주파수 성분만 취함으로써 대상 케이블에서 발생될 수 있는 산발적 잡음을 제거할 수 있다.

4. 실험 및 결과

실험을 위한 RF 감지 센서는 그림 7과 같이 제작되어 케이블 접속부에 장착되고, 탐상 장치는 그림 8과 같이 제작되었다.

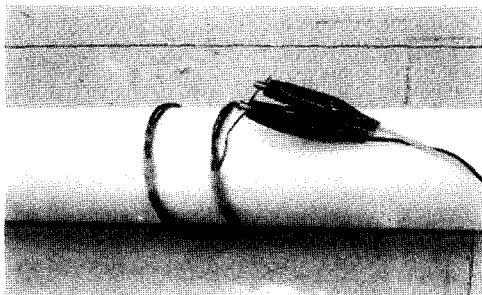


그림 7. 케이블 접속부 탐상을 위한 RF 센서

제작된 센서는 VHF 대역 전자파 수신을 위한 loop-안테나를 변형시킨 형태이며, 부분방전에 의한 전자파의 신호 크기 및 거리에 의한 감쇄를 고려하여

대상 부위에 최대 밀착시키는 형태이다. loop의 길이 및 턴 수는 부분방전에 의한 전자파 에너지가 밀집된 주파수 대역을 고려하여 선정되었다. 그리고 제작된 탐상 장치는 전력 케이블이 3상 선로임을 감안하여 6개의 센서를 연결하여 분석하도록 제작되었다.

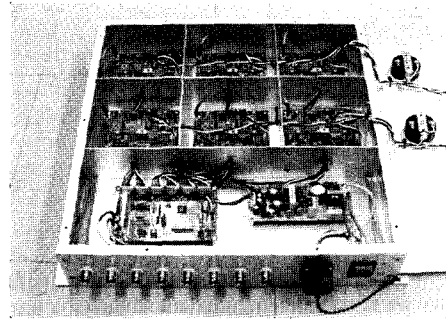


그림 8. 제작된 탐상 장치의 사진

그림 9는 약 100pC의 부분방전에 대하여, 입력 증폭단 출력 파형과 적분 결과 파형을 측정된 결과이다. 증폭된 RF 신호는 100usec 정도인데, 적분 결과 파형은 정형화된 결과를 보여준다. RF 신호를 직접 디지털 프리세서에서 측정하여 판단하기는 어려운 반면, 적분 결과 파형은 외부 잡음이 제거됨과 동시에 발생 시간 및 크기를 정확히 분별할 수 있다.

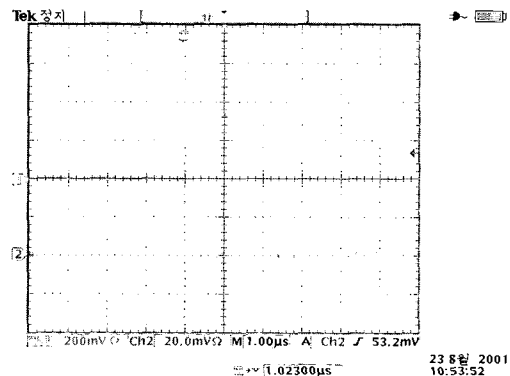


그림 9. 측정된 RF 신호 파형과 RF 신호의 적분 결과 파형(아래: RF 신호, 위: 적분신호)

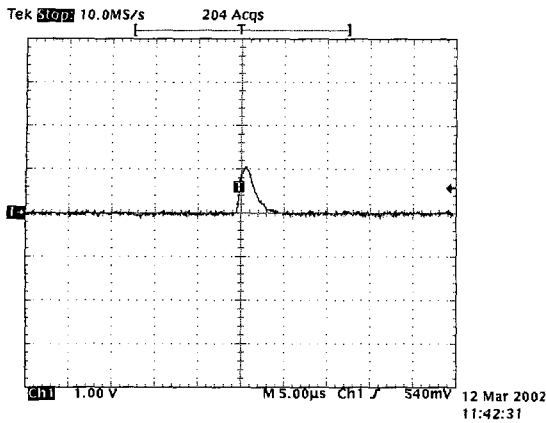


그림 10. 10pC 부분방전에 대한 탐상 장치의 측정 파형(vertical: 1(V/div), horizontal, 5(us/div))

그림 10은 10pC의 부분방전에 대해서 증폭 이득을 높은 상황에서 측정된 탐상 장치의 출력 파형이다. 주변 공중파 잡음의 영향이 제거되고 디지털 프러세서에서 판단이 가능한 정형화된 파형이 획득되었다. 그림 11은 평균 300pC의 부분방전에 대해서 여러 주기 동안 측정된 탐상 장치의 출력 파형이다.

제한된 측정 장치는 10pC의 부분방전에 대해서 주변 공중파 잡음의 영향이 제거되고 재현성이 뚜렷하여 판독이 가능한 정형화된 파형이 획득되었다. 그런데 RF 신호의 세기는 거리에 민감하게 반응하였고, 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값 변동이 심하여 증폭 이득을 조정하여 실험하였다.

표 1. 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값

부분 방전 크기 [pC]	5	20	100	200	500	2000	5000
출력 전압 [V]	0.0~0.02	0.04 ±5%	0.2 ±5%	0.4 ±5%	1.0 ±5%	4.0 ±5%	5.0 (포화)

*부분 방전 발생은 LDIC사의 모듈 사용

표 1은 센서 장착 거리 및 진단 장치 내부 증폭 이득을 일정하게 고정시킨 후 부분방전의 크기에 따른 진단 장치의 출력 전압의 최대 값을 측정한 결과이다. 대체적으로 부분방전의 크기에 비례하는 출력을 얻었는데, 500pC 근처의 값들은 정상화에 최적인데, 2500pC 이상의 값은 포화되어 구분이 되지 않으며, 10pC 이하의 부분 방전에 대한 출력을 아주 낮다.

그림 11은 평균 300pC의 부분방전을 가지는 실제 케이블에서 여러 주기 동안 측정된 진단 장치의 출력 파형이다. 관측된 파형의 주파수는 인가 전원 주파수의 2배인 120Hz이고, 각각의 파형 크기가 다르게 나타났다. 이는 양의 최대 전압 및 음의 최대 전압 부근에서 각각 발생되기 때문이며, 케이블 또는 케이블 접속재 내부의 공극이, 부분방전 발생이 지속됨에 따라 특성을 달리하기 때문이다. 또한 부분방전 크기는 케이블 자체의 결함 특성으로 결정되고 인가 전압 크기에는 무관하며, 임계 전압을 기준으로 발생 여부가 결정되었다.

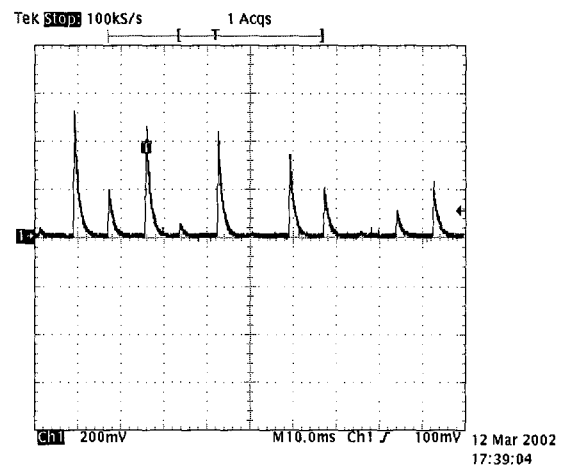


그림 11. 평균 300pC 부분방전에 대한 탐상 장치의 반응 파형 (부분방전 크기는 Hubbel사의 DDXTM-7000으로 측정)

상 장치의 내부 블록도이다. 시험 케이블 접속부는 22(kV)급의 경우 0.5(m) 정도의 길이이고, 154(kV)급의 경우 2(m) 정도로 길다. RF 신호는 거리의 3승에 비례하여 감쇄하는 특성을 가지므로 취약부위인 양 끝 부분에 개별 센서를 장착한다. 센서는 광대역 RF 수신안테나로 구성되는데, 부분방전에 의한 RF 신호 대역인 1(MHz) - 30(MHz) 대역만 통과하도록 증폭 후 필터를 통과한다. 필터링 된 신호는 그림 5와 같은 적분 회로를 통과하여 디지털 데이터로 변환되며, FFT에 의한 스펙트럼 분석을 통해 전원 주파수의 2배 주파수 성분을 추출할 수 있다.

제안된 RF 감지 방식 케이블 접속부 비파괴 탐상 장치는 신호 적분 회로를 채용함으로써 주변 잡음의 영향을 적게 받으며, 전원 주파수의 2 배 주파수 성분만 취함으로써 대상 케이블에서 발생될 수 있는 산발적 잡음을 제거할 수 있다.

4. 실험 및 결과

실험을 위한 RF 감지 센서는 그림 7과 같이 제작되어 케이블 접속부에 장착되고, 탐상 장치는 그림 8과 같이 제작되었다.

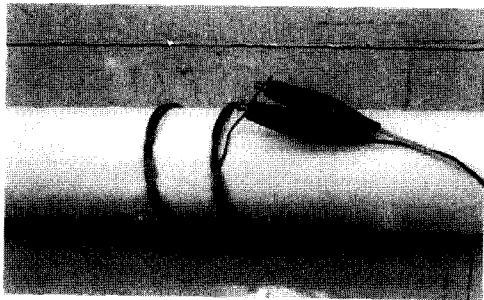


그림 7. 케이블 접속부 탐상을 위한 RF 센서

제작된 센서는 VHF 대역 전자파 수신을 위한 loop-안테나를 변형시킨 형태이며, 부분방전에 의한 전자파의 신호 크기 및 거리에 의한 감쇄를 고려하여

대상 부위에 최대 밀착시키는 형태이다. loop의 길이 및 턴 수는 부분방전에 의한 전자파 에너지가 밀집된 주파수 대역을 고려하여 선정되었다. 그리고 제작된 탐상 장치는 전력 케이블이 3상 선로임을 감안하여 6개의 센서를 연결하여 분석하도록 제작되었다.

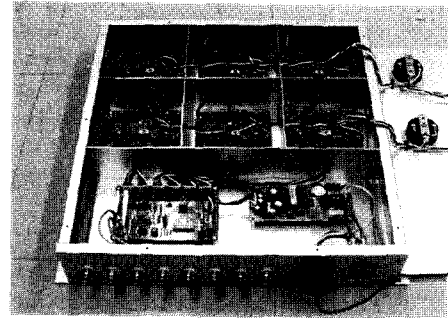


그림 8. 제작된 탐상 장치의 사진

그림 9는 약 100pC의 부분방전에 대하여, 입력 증폭단 출력 파형과 적분 결과 파형을 측정된 결과이다. 증폭된 RF 신호는 100usec 정도인데, 적분 결과 파형은 정형화된 결과를 보여준다. RF 신호를 직접 디지털 프로세서에서 측정하여 판단하기는 어려운 반면, 적분 결과 파형은 외부 잡음이 제거됨과 동시에 발생 시간 및 크기를 정확히 분별할 수 있다.

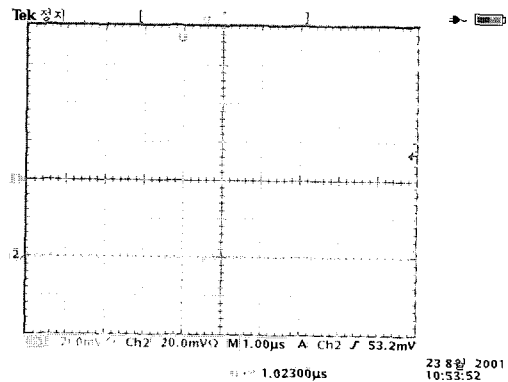


그림 9. 측정된 RF 신호 파형과 RF 신호의 적분 결과 파형(아래: RF 신호, 위: 적분신호)

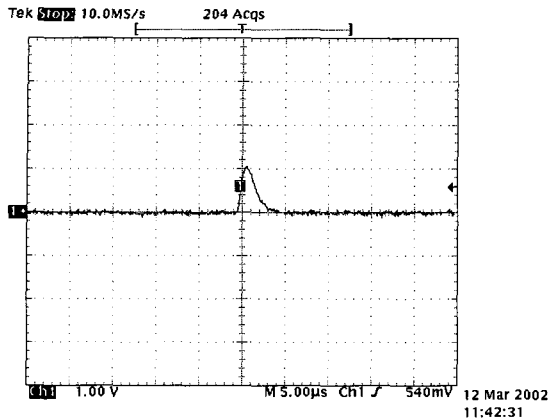


그림 10. 10pC 부분방전에 대한 탐상 장치의 측정 파형(vertical: 1(V/div), horizontal, 5(µs/div))

그림 10은 10pC의 부분방전에 대해서 증폭 이득을 높인 상황에서 측정된 탐상 장치의 출력 파형이다. 주변 공중파 잡음의 영향이 제거되고 디지털 프러세서에서 판단이 가능한 정형화된 파형이 획득되었다. 그림 11은 평균 300pC의 부분방전에 대해서 여러 주기 동안 측정된 탐상 장치의 출력 파형이다.

제안된 측정 장치는 10pC의 부분방전에 대해서 주변 공중파 잡음의 영향이 제거되고 재현성이 뚜렷하여 판단이 가능한 정형화된 파형이 획득되었다. 그런데 RF 신호의 세기는 거리에 민감하게 반응하였고, 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값 변동이 심하여 증폭 이득을 조정하여 실험하였다.

표 1. 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값

부분 방전 크기 [pC]	5	20	100	200	500	2000	5000
출력 전압 [V]	0.0~0.02	0.04 ±5%	0.2 ±5%	0.4 ±5%	1.0 ±5%	4.0 ±5%	5.0 (포화)

*부분 방전 발생은 LDIC사의 모듈 사용

표 1은 센서 장착 거리 및 진단 장치 내부 증폭 이득을 일정하게 고정시킨 후 부분방전의 크기에 따른 진단 장치의 출력 전압의 최대 값을 측정한 결과이다. 대체적으로 부분방전의 크기에 비례하는 출력을 얻었는데, 500pC 근처의 값들은 정량화에 최적인데, 2500pC 이상의 값은 포화되어 구분이 되지 않으며, 10pC 이하의 부분 방전에 대한 출력을 아주 낮다.

그림 11은 평균 300pC의 부분방전을 가지는 실제 케이블에서 여러 주기 동안 측정된 진단 장치의 출력 파형이다. 관측된 파형의 주파수는 인가 전원 주파수의 2배인 120Hz이고, 각각의 파형 크기가 다르게 나타났다. 이는 양의 최대 전압 및 음의 최대 전압 부근에서 각각 발생되기 때문이며, 케이블 또는 케이블 접속재 내부의 공극이, 부분방전 발생이 지속됨에 따라 특성을 달리하기 때문이다. 또한 부분방전 크기는 케이블 자체의 결함 특성으로 결정되고 인가 전압 크기에는 무관하며, 임계 전압을 기준으로 발생 여부가 결정되었다.

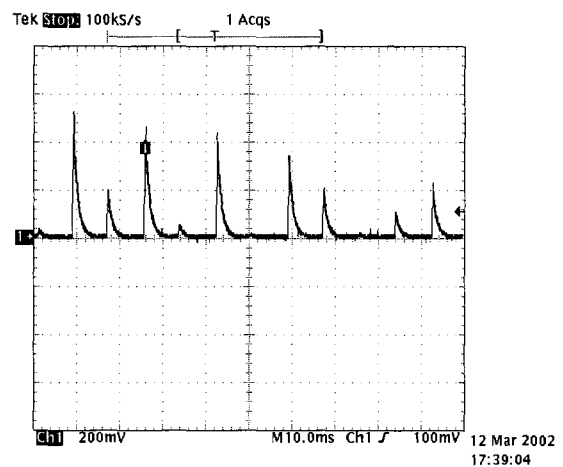


그림 11. 평균 300pC 부분방전에 대한 탐상 장치의 반응 파형 (부분방전 크기는 Hubbel사의 DDXTM-7000으로 측정)

표 2. PD 발생원과 센서 거리에 따른 출력 레벨

발생원과 의 거리 [cm]	left 40	left 20	center 0	right 20	right 40	right 60
출력 레벨	0	7 ±4	20 (max)	3 ±3	0	0

*출력 레벨은 최대 값 20을 가지는 아날로그 메타의 출력 값임.

표 2는 6개의 센서를 케이블 접속부 부근에 20[cm] 간격으로 설치한 후 아날로그 메타의 출력 레벨을 측정된 결과이다. 이 때 장치 내부 증폭 이득은 동일하게 설정하였다. 이로서 센서의 거리에 따른 민감성을 확인하였고, 2개 이상의 전자파 센서가 부착되어 동작되면 원격지에서 결합부의 방향 또는 위치 판정이 가능함을 확인하였다. 표 2에서 메타의 ±값은 아날로그 메타의 흔들림 범위이고, 왼쪽과 오른쪽의 값 차이는 두 ref. 위치가 정확하지 않은 것과, 각각의 센서 자체 특성 및 취부 형상의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전자파 측정에 의한 활선 상태 온라인 방식 케이블 접속부 비파괴 탐상 장치를 제안하고, 제안된 장치의 동작 실험을 통하여 타당성을 입증하였다. 실제 케이블에서 발생하는 부분방전 신호를 제안된 탐상 장치로 분석한 결과 10pC 이상의 PD에 대해서 반응하였고, 2개 이상의 센서가 장착되는 경우에 전자파 발생 위치 즉 결합 위치 탐상이 가능하였다. 또한 온라인 연속 측정을 통한 케이블의 노화 진행 모니터 및 교체 시점 판단이 가능하다. 제안된 탐상 장치의 문제점으로는 발생된 부분방전의 절대량 측정이 어렵고, 무전기나 고주파 전류 부하 전기기기 와 같은 강한 전자파 발생원이 근접한 경우 영향을 받는다 하는 것이다.

향후, 제안된 진단 장치의 측정 결과 분석 기술을 개발하고, 측정 결과에 영향을 미치는 전자파 잡음에 대한 대책마련 연구가 수행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 남궁도, 한상욱, "초전도 케이블용 고분자 절연재료의 부분방전 열화특성에 관한 연구," 전기학회논문지 45권 7호, pp1020-1025, 1996.
- [2] 김정태, 김남준, 이진선, 구자윤, "전력케이블에서 교류전압과 진동과 전압을 이용한 부분방전 측정," 전기학회 논문지 48C권 5호, pp247-252, 1999.
- [3] 이우영, 김광화, 송일근, 김주용, 김상준, "23kV급 전력케이블 조립형 직선접속재의 활선진단 부분방전 검출 기기 개발," 전기학회논문지, 47권 3호, pp358-363, 1998.
- [4] Dirk Russwurm, "On-site partial discharge monitoring using the differential Lemke Prove LDP-5 and its accessories", Proceeding of HV testing, monitoring and Diagnostics wrokshop, pp8-1~8-11, 2000.
- [5] E. Lemke, T. Strehl, and D. Russwurm, "New developments in the field of PD detection and location in power cables under on-site condition," Proceedings of the 1999 11th international symposium on 'High voltage engineering', pp106.s14-111.s14, 1999.
- [6] E. Lemke, T. Strehl, and W. Mosch, "Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol.26, no.3, 1991.
- [7] 이성희, 이진희, 한무호, 이왕하, 정희돈, "PD 검출을 통한 케이블 접속부 결합 비파괴 탐," 한국비파괴 검사학회 2002춘계학술대회 논문집, pp158-163, 2002.
- [8] 이성희, 이진희, 이왕하, "PD 검출을 통한 케이블 접속부 진단," 대한전기학회 2002하계학술대회 논문집, pp554-556, 2002.

기술해설

- (9) 구선근, 박기준, 유진열, "GIS 부분방전 검출용 내장형 UHF 센서의 특성조사," 대한전기학회 2000하계학술대회 논문집, pp1840-1842, 2000.
- (10) 박기준, 구선근, 유진열, 정길조, "345kV GIS AC 내전압 시험의 UHF 부분방전 검출기술 적용," 대한전기학회 2000하계학술대회 논문집, pp1843-1845, 2000.

◇ 저 자 소 개 ◇



이동영(李東映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1985~1986년 삼성전자(주) 사원. 1990년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사).

1995년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사).

1995년 ~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원.

1996년 ~1997년 한전 전력연구원 선임연구원.

1997년~현재 위덕대학교 정보전자공학부 조교수.



이성희(李成熙)

1967년 9월 7일생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1994년~현재 포항산업과학연구원 선임연구원. 1999

년~현재 위덕대학교 정보통신공학부 겸임교수.