

최근의 진공차단기 기술동향

박홍태, 안희일, 김성일, 서정만
(LG산전 전력연구소)

1. 서론

산업의 진보에 따른 전력수요의 증대는 전력설비의 대용량화와 그에 따른 신기술 개발의 필요성을 요구하고 있다. 최근의 고압차단기 시장은 차단성능, 안전성 및 신뢰성이 우수한 진공차단기(Vacuum Circuit Breaker ; VCB)를 위주로 구성되어 있으며, 그 사용량은 점차 증가하는 추세에 있다. (그림 1) 현재 배전시스템에 사용되고 있는 진공차단기는 일부 국산화되어 생산되고 있으나, 기술의 핵심을 이루는 진공인터럽터(Vacuum Interrupter ; VI)는 자체 기술력의 부족으로 외국 선진업체의 기술에 의존하고 있다. 해외 선진업체는 진공인터럽터에 대한 지속적인 연구개발을 통하여 대전류화, 고전압화, 저서지화, 소형화 및 고신뢰성의 측면에서 괄목할만한 성과를 이루었으며, 이러한 기술의 진보를 배경으로 시장점유율을 측면에서 단연 우위를 점하고 있다. 특히, 일본, 미국 및 유럽의 해외 선진업체들은 아크소호능력을 향상시킬 수 있는 새로운 방식의 전극구조 및 신접점재료의 개발을 통해 신뢰성 있는 고차단 용량의 진공인터럽터를 개발하여 제품화하고 있으며, 지속적인 연구개발을 진행하고 있다. 따라서 본 고에서는 진공차단기에 대한 개발 및 기술동향에 대해 분석하여 진공차단기의 개발기술을 확보하는데 필요한 자료로 활용하고자 한다.

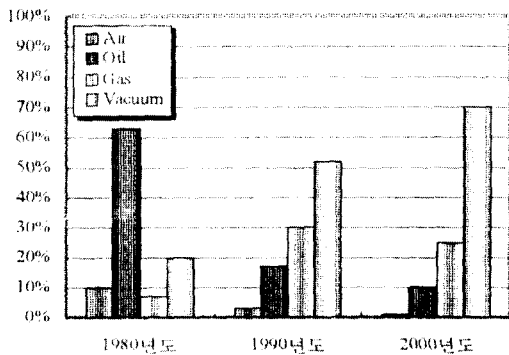


그림 1. 고압차단기의 세계적인 동향

2. 최근의 진공차단기 기술동향

표 1은 최근의 진공차단기의 기술동향을 본체, 주변 및 응용으로 분류하여 개략적으로 나타낸 것이다.

표 1. 진공차단기의 기술동향

NO	분류	동향	내용
1	본체	대전류 차단화	종자계방식 전극의 고성능화
		고전압화	CuCr계 전극재료의 채용
		저서지화	저재단전류 전극재료의 채용
		소형화	가스절연 및 진공인터럽터의 소형화
		다빈도화	벨로우즈, 전극재료의 대체
2	주변	보호장치	진공누설, 전극소모, 동작특수감시
		전자회로응용	한류특성
		서지해석기술보급	전동기 개폐시 다중재발호 서지해석
3	응용	가스절연개폐장치	6kV~70kV의 고압 및 특고압으로의 도입
		직류차단기	전철용
		진공퓨즈	고신뢰도 관점에서의 실용화
		LTC	대용량 변압기에 적용
		새로운 시도	하이브리드 차단기, 한류기의 검토

2.1 본체

본체는 진공차단기의 핵심부품으로 차단시 발생하는 아크를 신속하게 소호하는 진공인터럽터(Vacuum Interrupter ; VI)를 나타내는 것으로, 진공인터럽터의 개발은 대전류 차단화, 소형화, 고전압화 및 저서지화 추세에 있으며, 관련기술을 요약하면 다음과 같다.

2.1.1 대전류 차단기술

진공차단기는 사고전류를 차단하는 책무를 가지고 있기 때문에 대전류 차단성능은 진공차단기의 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 진공차단기의 대전류 차단성능을 향상시킬 수 있는 유일한 방법은 자계에 의해 진공아크를 효과적

표 16. 電力設備의 電氣環境 設計基準¹⁵⁾

평가 분야	적용지역구분	설계허용목표	적용조건
코로나 소음	주거 지역	50dBA 이하	-강우시 L _{50%} 치 -선하용지 보상경계 및 지상 1.5m
	준 주거지역	55dBA 이하	
	기타지역	60dBA 이하	
라디오장해	전지역	SNR 24dB 이상 (F.L./Q.P.)	-청명시 L _{50%} 치 -선하용지 보상경계 및 지상 2m -측정주파수: 0.5 ± 0.1 MHz -신호강도: 저잡음지역 방송 전계강도, 71dB μ V/m
텔레비전 장해	전지역	SNR 40dB 이상 (F.L./Q.P.)	-강우시 L _{50%} 치 -선하용지 보상경계 및 지상 3m -측정주파수: 73.5 ± 1.5MHz -신호강도: 저잡음지역 방송 전계강도, 54dB μ V/m
자계 강도	전지역	1000 mG	-송전선하, 지상 1m -전력설비 부근, "
전계 강도	사람의 출입이 빈번한 지역	3.5kV/m 이하	-최대치 -송전선하, 지상 1m
	기타 지역	7.0kV/m 이하	-전력설비 부근, "

기환경에 관한 국내의 환경규제를 고려시 지속적인 관심과 전기환경장해 저감연구개발로 전기를 사용하는 국민들이 안심하고 사용할수 있는 친화적 환경을 조성하여야 겠다.

저 자 소개

참고문헌

- [1] V.L.Chartier : Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines : IEEE/PES Jan. 1980.
- [2] Transmission Line Reference Book, EPRI, .P. 274-301. 1982
- [3] 초고압 송전에 관한 연구V, 한전전력연구원 보고서 1989.
- [4] 송전선로 전자계영향연구(1), 한전전력연구원 보고서 1997
- [5] 초고압 송전에 관한 II단계연구III, 한전전력연구원 보고서 1994.
- [6] Electric Power Lines, BPA, June, 1995.



이동일(李東一)

1958년 3월 15일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업(공학). 1978년 한국전력공사 입사. IEEE Member, CIGRE SC22 WG14 Member. 현재 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원. 주연구분야: 초고압송전

및 전기환경.



김정부(金正夫)

1943년 11월 14일생. 1990년 서울대 전기공학과 졸업(공학). 1971년 한국전력공사 입사. IEEE Senior Member, CIGRE SC22 Member. 현재 전력연구원 전력계통연구실장. 주연구분야: 송전선 절연협조 및 전기환경.

으로 제어하는 기술로서, 몇가지 방법들이 개발되어 사용되고 있다. 1980년대 초에 일본의 Toshiba사에서 개발된 종자계형(Axial Magnetic Field ; AMF) 전극(그림 2)은 아크에 평행한 자계를 인가하여 접점표면으로 입력되는 아크에너지가 균일하게 분포할 수 있도록 설계된 전극으로, 최대정격 13.8kV, 100kA 진공차단기가 제품화되어 있다. 그러나 종자계형 전극은 매우 높은 대전류하에서 아크가 집중되어 국부적인 용융을 발생시키는 경우가 있기 때문에, 최근에 종자계형 전극의 자속밀도분포를 개선시킨 자기아크 확산방식(Self Arc Distributed Electrode ; SADE) 전극(그림 3)을 개발하여 대전류 차단성능의 향상 및 소형화에 기여하고 있다.

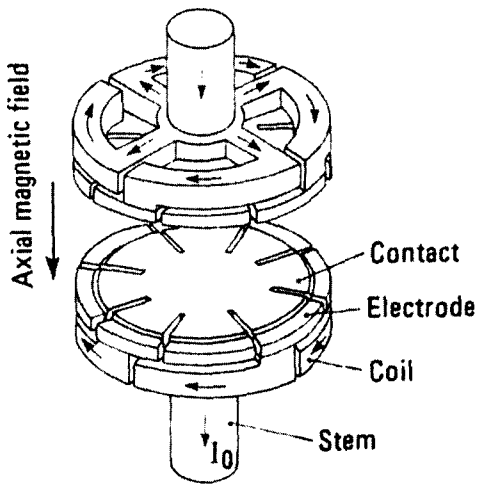


그림 2. 종자계형 전극구조

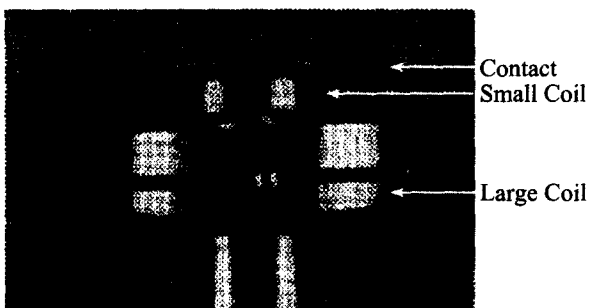


그림 3. 자기아크 확산방식형 전극구조

2.1.2 절연기술

절연기술은 진공차단기의 소형화 및 고전압화를 위해 사용되는 필수적인 기술이다. 진공차단기의 소형화 및 고전압화는 핵심부품인 진공인터럽터의 소형화에 의해 결정되며, 그 기초기술은 면적효과(area effect)를 적용한 절연설계이다. 진공인터럽터 내부의 절연설계는 그림 4와 나타난 것과 같이 3가지로 분류하여 나타낼 수 있으며, 전극봉과 아

크실드(arc shield)사이의 절연설계는 진공인터럽터의 소형화에 결정적인 영향을 미치게 된다. 현재까지의 소형화를 위한 수단으로는 면적효과에 의한 유효면적의 제어, 에폭시 몰드의 채용 및 내부의 표면절연을 위한 다중갭(multi-gap)의 적용 등이 있다. 그림 5는 다중갭을 적용한 72/84kV 진공인터럽터의 소형화 추세를 나타내고 있다.

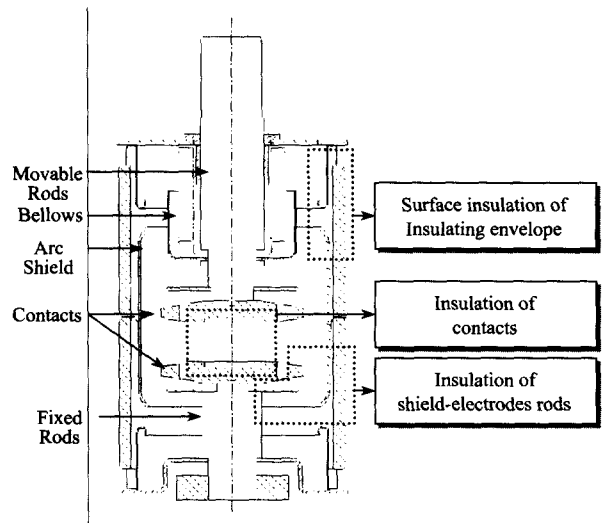
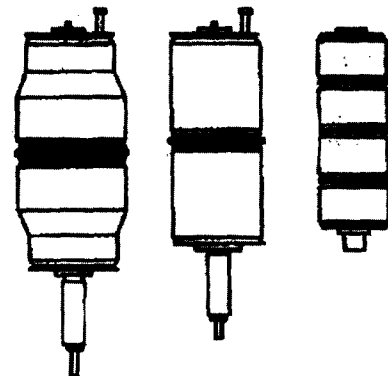


그림 4. 고전압용 진공인터럽터의 절연기술의 분류



Volume Ratio	100	65	40
Development Year	1985	1989	1997

그림 5. 72/84kV 진공인터럽터 소형화 추세

2.1.3 저서지 기술

진공차단기는 소전류 차단시에 전류영점 전에 아크가 소멸하여 전류가 강제적으로 차단되는 전류제단현상(current chopping phenomena)에 의해 이상전압 즉, 서지(surge)가 발생한다. 이러한 개폐서지의 발생을 감소시키기 위해 저서지형 진공차단기가 개발되었지만, 부하전류에서 아크가 유지되기 쉬운 접점재료를 사용할 필요가 있기 때문에 20kA 이상의 대전류 차단에는 적합하지 않는 것으로 알려져 있었다. 그러나 접점재료, 개리속도 및 대전류 아크의 제어

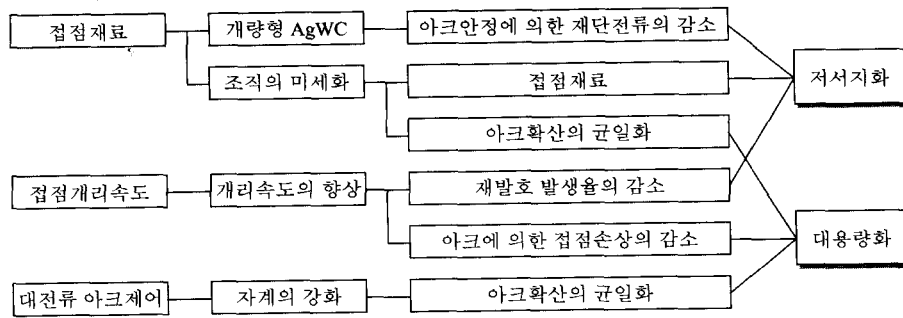


그림 6. 대용량, 저서지화 기술

등과 같은 연구를 통해 7.2kV, 40kA의 대전류 차단용 저서지형 진공차단기가 개발되었다. 그 기술내용을 그림 4에 개략적으로 나타내었다.

2.2 주변

주변장치는 시대의 요청에 대응하기 위해 진단 및 보안 장치 및 한류특성을 가진 진공차단기가 개발되었으며, 진동기 회로용 진공차단기가 설치되어 있는 부분에서는 서지해석이 많이 사용되고 있다.

2.3 응용

응용부분에서는 진공차단기를 채용한 가스절연 개폐장치가 6kV~70kV의 고압 및 특고압에 보급되었으며, 진공차단기를 사용한 역전류 투입방식의 직류차단기가 전기철도용으로 실용화 되었다. 또한, 진공퓨즈(vacuum fuse) 및 변압기의 LTC 등 그 응용범위가 계속해서 확대되고 있으며, 진공차단기와 가스차단기를 직렬로 구성해서 각 기기의 우수한 특성만을 이용하는 하이브리드(hybrid) 차단기, 그리고 자계중의 진공아크 특성을 이용한 한류기 등이 새로운 응용부분으로 시도되고 있다.

3. 개발기술의 진보

진공차단기의 개발에 많이 사용되는 해석 및 개발기술을 표 2에 간략하게 나타내었다.

표 2. 진공차단기의 개발을 위한 주요기술

NO	기술	적용내용	용도
1	전자계 해석기술	- 전극간 전계분포 - 전류차단시 발생자계	진공인터럽터 설계 및 개발
2	온도해석기술	- 정격전류 통전시 온도상승 - 단시간 전류통전시 온도상승	진공인터럽터 설계 및 개발
3	메카니즘 해석기술	- 전극의 개리속도 및 투입속도 - 채터링(Chattering)해석 - 벨로우즈 수명해석	메카니즘 설계 및 개발
4	시험 및 분석기술	- 아크형상 관측기술 - 합성시험 - 진공압력측정	특성 및 성능평가

전자계 및 온도해석은 차단부인 진공인터럽터의 설계 및 개발에 사용되며, 메카니즘 해석기술은 메카니즘의 설계와 벨로우즈의 수명 예측에 사용되고 있다. 진공차단기의 시험기술로는 진공압력을 측정하기 위해 마그네트론법(magnetron method)이 개발되어 사용되고 있지만, 최근에는 이를 개선하여 생산공정중에 품질관리상의 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한, 진공차단기의 대용량화에 따른 차단성

능의 검증은 합성시험법을 사용하여 행할 수 있다. 합성시험법의 경우 실제회로와 동일한 아크시간(arcing time)을 얻기 위해 강제적으로 아크를 연장시켜 시험을 해야 하고, 이를 위해 별도의 아크연장회로가 개발되어 사용되고 있다. 물론, 진공차단기의 개발은 이러한 해석 및 시험기술의 측면만을 고려해서 행할 수는 없다. 특히, 현재에는 전극재료를 개발하기 위해 사용될 수 있는 해석기술이 없기 때문에 재료를 제작해서 평가하는 방식으로 개발이 진행되고 있다. 향후에는 이 부분에 해석기술의 도입이 필요한 것으로 생각된다. 이렇게 하기 위해서는 내전압 및 전류차단현상에 대한 정량적인 결과가 필요하고, 향후 이에대한 기초적인 연구의 진보가 기대된다.

4. 진공차단기 기술의 향후전망

진공차단기의 기본기술로서 표 3에 나타낸 것과 같이 대전류 차단화, 고전압화, 저서지화, 소형화 및 고신뢰성화가 향후에도 계속적으로 발전될 것으로 생각된다.

표 3. 진공차단기의 향후전망

NO	기술	전망	과제
1	대전류 차단화	- 발전기 주회로용 차단기 - 특고압 40~50kA 차단기	- 전류영점 후의 현상대책 - 경제성
2	고전압화	- 145~168kV 진공인터럽터	- 고내압 전극재료 - 절연물 진공용기
3	저서지화	- 대용량 저서지화(23~63kA) - 동기개폐	- 신접점재료
4	소형화	- 전극간 갭의 단축 - 초소형화	- 전극의 고성능화 - 가스 및 불연성절연
5	고신뢰성화	- 진공압력의 상시감시	- 경제적 검출시스템 개발

4.1 대전류 차단기술

진공차단기에서 대전류를 차단하기 위해 최초로 사용된 방법은 아크를 전극의 원주방향으로 구동시키는 방법이었다. 이후, 아크에 평행한 자계를 인가하면 아크를 접점표면에 고루 분포시킬 수 있는 종자계형 전극이 개발되었다. 종자계형 전극은 접점표면으로의 에너지입력이 균일하기 때

문에 차단성능이 우수하고, 차단성능은 접점표면에 비례해서 증대되는 것으로 생각된다. ($I \propto d^{1.4}$) 향후에는 종자계형 전극의 자속밀도의 분포를 개선시키고, 접점에서 증발되는 금속증기량을 최소화 시킨 고융점, 저아크 전압의 개발로 인해 차단성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 고전압화 기술

내전압화에 대해서는 오랜기간에 걸쳐 연구한 결과, CuCr계 접점재료가 개발되어 현재에는 84kV의 진공인터럽터가 실용화되고 있다. 연구적으로는 145kV의 진공인터럽터도 검토되고 있으며, 장래에 168kV의 단일 진공인터럽터가 출현할 수 있을 것으로 생각한다.

4.3 소형화 기술

진공차단기의 소형화는 전극의 직경 및 외부 절연매체에서 거의 대부분 결정된다. 이러한 측면에서 진공차단기는 상당한 소형화가 이루어 졌지만, 장기적으로 차단성능이 우수한 접점재료가 개발되면 배선용 차단기(MCCB)와 같은 크기의 초소형화도 불가능 한 것이 아니라고 생각한다. 특 고압에서의 초소형화는 가스절연 개폐장치 등에 의해 개폐장치 전체를 높은 절연성능을 가지는 절연매체중에서 구성하는 것이 진행되고 있다. 절연매체에 대해서는 SF₆가스가 많이 사용되고 있지만, 불연성 매체도 가격이 하락하면 사용될 수 있을 것으로 예측된다.

4.4 저서지화 기술

저서지화는 최근에 전류제한현상 및 다중재발호의 원인으로 작용하는 고주파 소호성능이 작은 접점재료가 개발되어 대용량 진공차단기의 저서지화가 실현되었다. 향후에는 저서지형 진공차단기의 사용이 증가할 것으로 예측된다. 그런데 전동기 부하의 경우, 과도한 서지전압을 발생시키는 것은 다중재발호의 경우이고, 이 현상은 전류차단시 매우 특수한 위상으로 전극을 개리시키는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에, 이것을 방지하기 위해서는 동기개폐가 해야 할 것을 생각한다.

4.5 고신뢰성화

진공차단기의 신뢰성 측면에서 가장 중요한 것은 진공도의 유지이다. 이를 위해 가스투과율이 작은 진공용기와 부식이 적은 금속재료를 채용하고, 진공용해 또는 진공소결법에 의해 충분히 탈가스된 접점재료를 사용함으로써 진공차단기의 고성능화를 실현하였다. 또한, 진공열화 검출기가 개발되어 실용화되고 있으며, 향후에는 예측 및 보호의 관점에서 진공인터럽터 내부의 진공압력을 상시적으로 감시할 수 있는 경제형 감시시스템의 개발이 요구된다.

5. 결 론

최근의 진공차단기 기술동향에 대해 개략적으로 설명하였다. 진공차단기는 설계 및 개발기술, 시험검사기술 및 제조기술을 기초로 높은 신뢰도를 유지하고 있다. 그 결과, 36kV까지의 중전압 차단기분야에서 신규로 제작되는 70% 이상이 진공차단기로 구성되어 있으며, 소형화, 고성능화 및 고신뢰성화를 통해 시장에 맞는 진공차단기를 개발하기 위해 노력하고 있다. 이러한 시장동향에 대응하기 위해 LG 산전에서는 대전류 차단 및 소형화에 유리한 종자계형 진공인터럽터를 개발하기 위해 진공인터럽터의 설계도면(CAD)을 전계해석 데이터로 자동변환시켜 유한요소법(Finite Elements Method ; FEM)을 이용해 전계해석을 행하고 있다. 이러한 전계해석 결과와 각종 기초현상 해석결과를 기초로 진공인터럽터의 내부형상을 최적화하고 있으며, 차단시에 발생하는 아크전압(arc voltage)과 자계강도의 관계를 기초로 아크전압이 최소로 되는 자계강도를 코일전극(coil electrode)에서 발생시키고, 코일전극 및 접점에서 발생하는 와전류(eddy current)에 의한 손실을 최소화시켜 종자계형 전극의 구조를 최적화하기 위해 범용 전자계 소프트웨어인 Maxwell과 EMAS를 사용하여 자계해석을 행하고 있다. 또한, 조립식 아크챔버(demountable arc chamber)와 고속카메라(high-speed video camera)를 사용하여 전류차단시 접점간에 발생하는 아크형상을 관측하여 종자계하에서 아크상태를 해석함으로써 전극구조의 최적화를 이루고 있다. 이러한 연구결과로 설계된 진공인터럽터는 대전력 설비를 이용해서 그 성능을 평가함으로써 새로운 방식의 진공인터럽터 개발에 노력하고 있다.

참고문헌

- [1] K. Watanabe, K. Kaneko and S. Yanabu, "Technical Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupter", XVIIth ISDEIV 231, 1996
- [2] F. Heizinger, "Contact Materials for Vacuum Switching Devices", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 21, No. 5, 447-453
- [3] P. Slade, "Vacuum Interrupters the New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits", Cutler-Hammer, 1995
- [4] 黒澤 幸夫, "最近의 眞空遮斷器 · 開閉器의 技術動向", 電氣 · 情報關聯學會聯合人會, 平成3年
- [5] M. Homma, K. Yatanabe, M. Nishihara and I. Ohshima, "New Vacuum Arc Control Technology ; SADE, Application to Vacuum Interrupter" CIRED97, Birmingham, Conference Pub. No. 438, IEE, 2-5, 1997



- [6] 박홍태, 이태섭, 안희일, 함길호, “진공인터럽터용 접점 재료의 최근동향” 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회, 1998
- [7] 김성일, 박홍태, 안희일, 서정민, “종자계방식 진공인터럽터 개발에 관한 연구” 대한전기학회 하계학술대회, pp.943~945, 2000
- [8] 강종성, 박홍태, 최원준, 이방욱, 서정민, “아크계측 및 응용연구를 위한 LC공진회로 전류원 구축”, 대한전기학회 하계학술대회, pp.2113~2115, 2000
- [9] 연영명, 오일성, 박홍태, 이상엽, 서정민, “Cu-Cr계 접점 재료의 소결특성에 관한 연구” 대한전기학회 하계학술대회, pp.1643~1645, 2000

저 자 소 개



박홍태(朴洪泰)

1967년 8월 5일생. 1991년 울산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 LG산전 전력연구소 선임연구원.



김성일(金城壹)

1971년 8월 7일생. 1995년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG산전 전력연구소 주임연구원.



안희일(安熙一)

1961년 9월 6일생. 1989년 경북대 전기공학과 졸업. 현재 LG산전 전력연구소 선임연구원.



서정민(徐廷敏)

1959년 6월 6일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 한양대 산업대학원 졸업(석사). 현재 LG산전 전력연구소 전력기기연구팀장.