

전기공학의 현재와 전망

연구편 2

전력계통 송전기술과 운용기술

임 주 일

한국전력 기술연구원 계통연구실장

I. 머릿말

전력은 저장하기가 매우 힘들 뿐 아니라 생산과 소비를 동시에 수행해야 하는 특질을 갖고있다. 이 때문에 양질의 전력을 원활히 공급하기 위해서는 시시각각으로 변화하는 전력수요에 대처하여 발전에서 부터 송전, 배전등 전력계통 각 부분에서 전력을 안전하게 수송하고 분배하여야 한다.

전력수요는 경제발전과 국민생활 수준향상에 긴밀한 관계를 가지고 있다. 경제개발을 통한 고도성장을 중심으로 전력수요가 꾸준히 증가하여 왔으며 이와 관련하여 전력설비의 건설과 확충도 대단히 빠른 속도로 진척되었다.

한편 1970년대에 전세계에 불어닥친 석유파동은 전원의 다변화를 촉진시켰고, 계통규모의 대형화와 사회적 서비스 향상요청의 증대로 인한 전력계통운용은 고도의 기술개발을 필요로 하게되었다.

변동하는 부하조건을 충족시켜야 하고 안전성과 신뢰성을 유지하면서 아울러 경제성을 도모해야 하는 대단히 큰 상반된 두가지 문제는 전력계통분야의 연구진과 기술진이 앞으로 계속적인 연구에 의해 해결해야 할 난제이다.

현 단계에서 되돌아 보건대, 전력계통분야의 기술수준은 선진 외국의 그것에 비하여 질적, 양적인 면에서

그리고 접근방법론적 측면에서 한 단계 아래에 있는 것만은 틀림없는 사실이다. 그동안 우리나라는 학계와 전력회사를 중심으로 하여 1960년대 까지는 전력기술의 자립과 발전을 위한 기술마련에 주력하였으며 1970년대 이후에 와서야 진정한 의미의 전력계통분야의 연구개발이 시작되었다고 말할 수 있다.

때를 같이하여 국내에 전문연구기관이 생겨나면서 학계와 함께 송전부문과 운용부문의 연구가 활발히 진척되었으며 2000년대를 향한 장기 연구과제에도 눈을 돌리게 되었다.

이제 우리나라도 전력사업에 대한 기술의 선진화를 기하지 않을 수 없으며 그간에 다져온 연구를 바탕으로 현용 기술의 개선과 기초이론연구는 물론 미래 지향적 신기술 개발연구에 주력해야 하겠다.

여기에서는 이러한 관점에서 전력계통분야의 운용부문과 송전부문에 주안점을 두고 개괄적으로 기술코자 한다.

II. 대전력 송전기술

우리나라와 같이 可用土地가 제한되어 있는 실정에서는 전력사업에 필요한 用地의 확보문제는 점차 심각할 것으로 예상된다. 또한, 전력수요의 증가와 더불어 이에

대용하는 전력공급루트가 대용량 발전소의 집중현상과 부하의 대도시 편중으로 장거리화할 추세이다.

이 때문에 전력을 안정하게 그리고 저렴하게 공급하는 데 필요한 대용량·장거리 송전기술과 도시환경에 조화를 이룬 송전기술연구가 요구되고 있으며 그 뿐 아니라 전력공급시스템의 고밀도화에 대처한 기술개발은 극히 중요한 역할을 하게 될 것으로 전망된다.

2.1 초초고압 가공송전

앞으로의 전원은 에너지의 안정공급과 코스트 상승을 억제하기 위해 원자력 발전소를 주체로한 수백만kw가 넘는 대규모 전원을 수요지로 부터 멀리 떨어진 지점에 개발하여야 할 상황에 있고 이에 대응해서 비교적 가까운 장래에 계통구성 골격으로 초초고압(UHV) 송전기술의 도입이 구상되고 있다.

그동안 세계각국에서는 원거리·대용량 수송의 증대에 대처하여 송전선의 전압레벨을 높이는 방안에 대해 꾸준히 연구해 왔으며 현재는 800kV급까지 운전중에 있으며 앞으로는 미국, 일본, 이태리 및 소련등이 1,000kV 급 초초고압 송전을 개시할 전망이다.

1,000kV급을 기준으로 하여 800kV급과 500kV급을 비교하여볼 때, 대규모 장거리 송전에서 건설비의 증가폭이 상대적으로 낮아지는 것으로 연구결과가 보고되고 있으나 절연레벨의 결정 및 환경장애를 고려한 회선도체의 결정, 공기절연거리 및 지지물 설계등에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

이미 선진각국에서는 1970년대 부터 UHV 송전기술에 대한 기초연구를 시작하였고 현재는 송전선의 절연문제 및 환경대책에 필요한 실증시험 연구까지 진행하여 송전선의 소형화, 설계의 합리화 및 신뢰도 향상등에 많은 성과를 거두고 있다.

2.2 대용량 지중송전

대도시 지역에서의 전력공급은 화재, 안전 및 도시미관 등 도시환경과의 조화라는 측면에서 지중화가 불가피한 수단으로 되고 있으며 이미 우리나라도 도시권에 154kV 송전계통에 적용하고 있다.

도시권의 확대와 전력수요의 증대에 대처하여 가공송전선과 마찬가지로 지중케이블도 여러가지 측면에서 송전용량의 증대에 기여할 것으로 예상되며, 그 방안으로 송전전압의 상승과 허용 전류의 증가가 있다.

그러나, 지중케이블은 가공송전과 비교할 때, 건설에 따른 토목공사량이 많고 케이블로 부터의 열발산이 나빠서 허용 전류의 제한에서 기인된 송전용량의 감소와 정전용량이 크기 때문에 송전가능 거리가 수10km로 짧다는 결점을 갖고있다.

현재 지중케이블로 대전력을 경제적으로 수송하기 위한 기술연구과제로서 송전용량을 증가시키고 열발산을 좋게하는 내부냉각 케이블시스템, 설비의 간소화 및 저손실화를 위한 초고압 CV케이블시스템과 대용량 가공송전선에 견줄 수 있는 송전용량을 갖는 초고압 관로기 중송전 기술등이 있으며 앞으로 이에 관한 연구도 수행하여야 할 것이다.

2.3 직류 송전

초고압 직류송전은 초초고압 가공송전 및 지중송전 등과 함께 장거리 송전으로서 향후 각광받는 송전방식이 될 것이다.

계통의 복잡화와 다양한 전원, 대용량 부하의 지역 편중에 따른 계통안정도 문제등은 매우 중요한 연구과제로 대두되고 있다.

이에 대응하여 송전선 전압을 격상시키는 방안과 더불어 송전용량을 증가시키면서 원거리 송전에 안정도상의 문제가 없는 초고압 직류송전에 대한 기술연구가 활발히 진행되고 있고 특히, 직류 해저케이블의 연구는 상당한 수준에 도달하였다.

앞으로 송전선 양단의 AC/DC 변환기 및 이에 소요되는 비용문제, 변환장치의 무효전력 소비 및 고조파 발생문제등에 관한 연구결과에 따라 장거리·대용량 송전에 부합하는 송전방안이 될 것으로 예상하며 계통운용상에서 발생하는 계통안정도, 전압안정 및 단락용량등의 복잡한 문제 해결과 대책수립에 상당한 도움이 될 것이다.

직류 송전방식은 현재 세계 27개국에서 운전중에 있거나 건설 및 계획중에 있고 향후 장거리 송전 및 해저 케이블송전, 계통특성(주파수등)이 다른 교류계통간의 연계에 의한 계통안정도 향상대책 및 단락용량 억제방안 등에 그 적용폭을 넓혀갈 것에 대비한 기술연구를 수행할 필요가 있다.

2.4 초전도·극저온송전

초전도 현상의 송전계통에의 응용은 아주 매력적인

신기술로서 현재의 기술개발 추세에 비추어 볼 때 초전도 송전은 초전도 저장장치와 발전에 앞서 실용화될 전망이다.

앞으로는 종래의 초고압 송전 기술개발에 대한 연구가 진행되고는 있으나 장차 도시권 전력공급에 대비한 새로운 원리에 기초를 둔 송전방식에 의존할 수 밖에 없으며 이중 극저온기술을 이용한 송전에 많은 기대가 집중되고 있다.

세계경제가 고도성장하던 1960년대 후반에서 1970년대에 걸쳐 세계각국에서는 극저온 송전에 관한 기술연구가 전개되었다. 액체질소를 저온액체로 냉각해서 대전류를 흘리는 극저온 송전방식은 미국, 소련, 폴란서와 일본등에서 연구하고 있으며 또한 초전도케이בל연구도 미국, 소련, 영국, 폴란서, 독일및 일본등에서 진행되고 있다.

일반적으로 전력케이בל의 송전용량은 사용 절연물의 허용온도에 의해 제한된다. 따라서, 이를 대응량화하기 위해서는 케이블로부터의 발생열을 저감시키거나 강제 냉각시키는 방법이 채용되고 있다. 극저온케이בל은 이 양자를 이용한 것이다. 한편, 초전도케이בל은 이러한 강제 냉각방식 대신에 초전도 현상을 이용한다는 점으로 다르다.

송전손실 없이 대전력을 흘려 보낸다는 것이 송전계통 기술개발의 최종목표라 할 때, 이에 대한 연구는 역사적 사명이라고 말할 수 있다.

궁극적으로는 초전도 송전이 이를 해결하는 수단이 되겠지만 그전 단계로서 극저온 송전이 머지않아 실용화될 전망이며, 그 실용성이 입증되고 나면 초전도 송전 시대의 막이 열릴 것이다.

따라서, 극저온및 초전도에 대한 기술연구와 전력계통에의 응용상의 문제점에 관한 연구에 눈을 돌려야 하겠다.

Ⅲ. 전력계통 운용기술

전력계통의 복잡화로 인한 계통안정도 제고문제는 필히 해결해야할 중요한 연구과제로 부각되고 있다. 1960년대 이후 계통운용분야에서 전력의 안정공급을 위한 온-라인 제어기법인 계통안전성 제어가 새로운 연구분야로 제시되기 시작하였고 상정사고해석및 대책, 조속기 및 자동전압 조정장치, 무효전력제어등의 최적제어에

의한 계통안정 영역을 확대하였다.

또한, 계통운용과 제어를 자동화하려는 시도에 의해 표준화 시스템인 에너지 관리 시스템(EMS) 및 SCADA 등이 실용화되어 1975년부터 계통운용분야에 적용하기 시작하였다.

EMS에서 계통운용과 제어의 경제성, 신뢰성및 품질향상을 위한 응용프로그램의 개선과 개발, 고신뢰 운용설비 개발등에 연구가 계속되고 있을 뿐 아니라 정보처리 능력 향상에 따른 계측제어 시스템과 종합 정보망 구성, 고도의 응용프로그램개발에 의해 계통운용의 성역화라 할 수 있는 종합자동화가 이룩될 것으로 예견된다. 신기술로서 계산기 속도의 한계성 극복및 병행처리 기법, 패턴인식법및 엑스퍼트시스템등 인공지능분야의 계통운용에의 활용이 앞으로 연구해야할 과제가 될 것이다.

그밖에 계통운용의 최적화, 광역보호시스템개발등에 관한 연구과제들이 있으나 본 계통운용분야에서는 종합 자동화기술과 계통안정화대책 문제를 논의 대상으로 하여 개괄적으로 설명하겠다.

3.1 계통운용의 종합자동화

계산기 제어시스템의 개발과 전력계통에의 응용은 계통운용및 제어 기술개발의 혁신적 전환점이 되었으며 이는 정보전송 기술향상과 명맥을 같이하고 있다.

근래에 전력계통에 적용하기 위해 개발된 SCADA와 EMS는 표준화 제어시스템이며 우리나라도 계통운용과 제어를 자동화하기 위해서 1979년에 SCADA를, 현재는 경제급전(ELD)과 원방감시 제어기능외에도 계통해석 및 안전성 분석등의 실-시간 제어기능을 갖는 에너지 관리시스템(EMS)을 도입하여 설치중에 있다.

이와 함께 지역급전과 배사자동화에 대한 연구가 진행되고 있어 계통운용분야의 종합자동화를 위한 발판을 착실히 다져가고 있다.

한편, 향후의 종합자동화의 실현을 위해서는 고속처리 계산기 제어시스템및 고신뢰 전송시스템등 하드웨어 개발과 전력계통의 계층제어화및 응용프로그램에 관한 연구가 다각적으로 수행되어야 하겠다.

계층제어시스템은 계통운용과 제어를 효과적으로 실행하기 위한 계통운용조직이며 일례로 중앙급전지령소(EMS)-지역급전(SCADA)-배사자동화(ADS)의 계층구성을 들 수 있다. 이는 계통운용의 계층별 부분 자

동화로 부터 총체적 종합자동화의 실현을 가능케 하는 중간과정으로서의 급전및 제어기술이다.

또한, 계통운용분야에서 필수적인 응용프로그램에 대한 기술개발을 꼽을 수 있다. 이 프로그램들은 전력의 안정공급에 직접 관계하는 중요한 사항이기 때문에 절대적인 정확성과 고속처리가 요구된다.

시시각각으로 변하는 계통상태에 부응하여 즉시 온-라인 제어를 실행해야 하며 광범위한 전력계통을 종합적으로 판단하여 신속히 대처할 수 있는 운용도구가 응용프로그램이기 때문에 계통운용의 종합자동화를 성취하기 위해서는 새로운 이론개발과 현용기술의 개선및 개량에 관한 연구가 수반되어야 한다.

이와같은 계산기 응용프로그램은 크게 기본기능, SCADA 기능, 발전제어, 안전성제어기능, 계획및 운용, 급전원혼련등으로 구성된다. 이 중에서 안전성제어에 속하는 예방제어, 긴급제어및 복구제어의 자동화에 대해서는 연구해야 할 일이 대단히 많고 특히, 신기술연구를 필요로 한다.

3.2 전력계통의 안정화기술

근래 전력계통은 전원설비의 대용량화및 편재화, 송전설비의 장거리화및 조류의 증가등 복잡한 양상으로 발전되고 있다. 이러한 속에서 전력계통의 안정화기술은 대규모 정전사고의 방지라는 측면에서 매우 중요하게 되었다.

전력계통의 안전성은 유효전력-주파수의 안정성및 무효전력-전압의 안정성으로 나누어 생각할 수 있고 안정도 문제로는 초속응여자에 의한 약제동현상및 저출력 영역에서의 부제동현상, 계통의 비선형에 의한 공진가능성(파라미터 공진), 대용량 전원탈락등에서 기인된 주파수 이상저하시 연속적 전원탈락으로 대규모 정전사고의 발생 가능성, 전원개발및 계통구성상의 대용량·장거리 송전계통및 양수발전 등에 대한 안정도 향상대책, 운용상의 문제로서 선로조류한도및 발전기 진상운전한도와 보호계전기 재폐로 운용등에 의한 안정도상의 제약등을 들 수 있는데 계통계획적인 측면과 운용적인 측면에서 다각적인 안정화대책에 관한 연구가 필수적으로 수행되어야 하겠다.

계통계획적인 측면에서는 송전계통의 직렬리액턴스를 감소시키는 방안으로 상위 전압의 채용, 발전소측면의 발전기 제정수및 특성 개선, 과도안정도 향상을 위한

SVC와 초속응여자방식및 PSS의 채용, 주파수의 안정유지를 위한 순동예비력 확보및 적정배치, 전압안정화를 위한 발전기 진상및 지상용량의 확대, 최적조상설비 배치등에 관한 대책이 있으며 계통운용 측면에서는 탈조방지를 위해서 예방제어및 긴급제어와 복구제어의 도입, 주파수 이상방지로서 안전성제어(상술한바와 같음) 등의 안정화 대책이 있다.

계통안정화를 위한 신기술로는 계통안정화장치(SVC, SMES등), 초전도 발전기및 온-라인 안전성제어등이 있으며 계통의 확장및 설비구성의 복잡화, 부하종류의 다양화에 대비하여 종합적인 기술연구와 원자력 비율증가에 따른 심야부하개발, 원자력 부하추종운전, 일일기동정지발전, 양수AFC 운전등도 연구대상이 되고 있다.

이상의 계통안정도 향상과 종합적인 대책 수립을 위해, 그리고 실현하기 위해서 장래에 적용이 기대되는 신기술 연구대상을 열거하면, 초초고압(UHV), 초전도 발전기, 초전도저장장치, 양수 AFC, 원자력 부하추종운전, 온-라인 안정도 해석및 인공지능분야의 전력계통 활용 등이 있다.

IV. 전력저장기술

전력의 안정공급은 앞으로의 국내외 에너지 정세에 융통성있게 대처하고 해외 의존도가 높은 에너지의 가격 변동에도 안정한 전원을 확보함으로써 이룩될 수 있다. 이를 위하여 원자력 발전을 주축으로한 LNG, 석탄 및 신에너지원의 기술개발에 의한 전원의 다변화에 계속적인 노력을 기울이고 있다.

한편 전력은 안전, 청결과 사용편리성등의 장점 때문에 그 선호도가 높아가고 있으며 다른 에너지에서는 대체가 불가능한 전력특유의 수요가 증가할 전망이어서 우리나라와 같이 천연 에너지 자원이 부족한 나라에서는 공급의 경제성이 가장 높은 원자력 발전을 주 전력 에너지원으로 확보할 계획이다.

원자력발전과 함께 값싼 전력공급원으로 석탄화력과 LNG발전등이 중간부하용으로 전원구성의 일부를 차지하고있다. 특히 발전원가가 저렴한 기저부하용 대용량 발전소의 부하에대한 구성비가 증가함에 따라 안정성 확보, 부하추종 및 심야부하관리등 전력계통운용상에 많은 문제점을 야기하고 있다.

따라서 이와같은 문제해결을 위한 신기술 연구와 중

합적인 검토분석이 요구되고 있다. 그 일환으로서 현재 전력저장기술에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있으며 구체적 설비로는 초전도에너지저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage) 분산형전원으로 연료전지를 들 수 있다.

초전도에너지 저장장치는 초전도 특성인 대전류성 및 영구전류성을 이용하여 전기에너지를 직접저장하는 장치다. 이것은 특히 효율이 높고(90% 이상), 전력변환기를 사용하여 유도·무효전력 조절을 신속하게 행할 수 있는등 속용성에서도 우수한 특성을 가지고 있어 양수발전소 대체에서 부터 안정화장치, 주파수조정장치, 무효전력장치 및 pulse 전원에 이르기 까지 광범위한 적용이 고려되고 있다.

이 저장장치는 초전도선을 솔레노이드 또는 토로이달 형태로 감아서 직류전류를 흘려 자기에너지 형태로 저장하는 초전도마그네트와 계통과 연계시켜 전력에너지를 조정하는 전력변환기·초전도마그네트를 극저온으로 유지시켜 주기위한 냉각시스템 및 초전도 코일을 보호하고 계통에서 요구하는 전력을 제어하기위한 보호제어 시스템으로 구성되어 있다.

이 장치의 연구개발은 미국의 위스콘신대학과 로스아라모스 연구소에서 주로 연구해 왔으며 특히 BPA의 타코마 변전소에 30MJ안정화용 초전도 저장장치를 제작 및 전력계통에 적용, 계통의 장주기 진동억제 효과를 보고한 바 있다. 또한 양수발전 규모의 초전도 저장장치는 코일직경이 크고 그 힘이 막대하기 때문에 가장 경제적이고 기술적으로 가능한 모델은 직경에비해 높이가 낮은 마그네트 형태로 지하암반에 매설하는 방식을 제안하였다. 일본에서도 대학·연구소 산업계에서 소형 저장장치에 대한 요소기술을 확립하였으며 정부·민간연구소들이 협력하여 50MJ(13kwh) 시험프랜트건설을 1986년부터 5개년 계획으로 추진 중에 있으며 미국에서도 시험프랜트 규모인 20MWh초전도 저장장치를 위스콘신 대학 연구팀을 주축으로 연구에 착수한 바 있다. 우리나라에서도 연구의 필요성을 인식하여 1984년부터 한전기술연구원에서 서울대학교의 협조로 25KJ 저장장치를 설계·제작하여 자체와 동특성 시험을 완료하였고 현재 3단계인 초전도 저장장치에 의한 계통의 안정화 효과 및 병용효과 분석을 연구중이다.

앞에서 서술한 바와같이 이 저장장치는 고효율성 고속용성 입지조건등에서 매력적인 장점을 가지고 있어

현재 실용화 연구가 세계각국에서 활발히 진행중이다. 이 추세로 볼때 2010년경에 대규모 저장장치 실용화가 확실시되고 있으며, EPRI에서 행한 경제성 평가에 의하면 해마다 건설단가가 현저히 저하하는 추세에 있다. 앞으로 임계자속 밀도의 상승, 고순도 알루미늄 제조공정의 경제화 및 코일의 최적설계에 따른 경비절감, 냉각시스템에 관한 연구개발을 계속하고 최근고온 초전도체의 선제화를 통한 냉동시스템의 경제성과 초전도마그네트의 안정성이 해결될것으로 보여 전력계통 실용화 시기는 앞당겨 질것이 확실하기 때문에 이에 대한 연구를 광범위하게 수행해야 할 것으로 보인다.

또한 연료전지 발전은 연료가 가진 화학에너지를 연소과정 없이 전기화학 반응으로 직접 전기에너지로 변환시키는 신 발전방식으로 높은 열효율성, 환경에 대한 저공해성, 폐열이용의 용이성, 수요지 부근에 설치할 수 있는점, 송배전설비 및 손실경감등 좋은 특성을 가지고 있어 다음세대 발전방식으로 주목을 받고 있는바 선진 각국에서 활발히 연구를 진행하고 있다.

특히, 일본의 제조회사와 전력회사에서는 소규모 장치 요소기술을 확립하였으며 또 동경전력은 200kw급을 '86년부터 '91년까지 열병합 발전용으로 개발 호텔·병원 등 Onsite 용으로 실용화할 계획을 세우고 있으며, 관서 전력에서도 후지전기와 공동으로 30kw급 시험 프랜트를 사내 LNG 발전소 부근에 설치하여 운전시험을 계속하고 있다. 역시, 미국에서도 가스회사, DOE 및 EPRI에서 MW급 정도까지 실험을 완료하였고 특히 1MW 파이롯트 프랜트를 13.8kw 계통에 연계하여 발전시험을 완료한 바 있다.

국내에서도 1981년부터 기초연구를 수행하였고 한전 기술연구원과 동력자원연구소가 공동으로 1985-1988년까지 5kw급 인산형연료전지 발전설비를 제작·실험을 목적으로 연구를 진행중이다. 이 발전방식은 열병합 발전용으로 사용이 가능할 뿐만 아니라 앞으로 부하의 다양화에 따른 부하변동에 대응하기위하여 분산전원용 및 Onsite용으로 설치하여 전력의 질적 향상을 기할 수 있을 것으로 예상된다.

앞으로 특성향상을 위한 요소기술을 확립하고 전력계통과 연계운전에 따른 동특성해석 및 전력변환기술의 향상을 통하여 계통에 조기적용이 기대된다.

V. 맺음말

에너지 중에서 전력이 차지하는 비중이 점차 높아가고 대용량 발전소가 부하중심지로 부터 원거리에 건설됨으로서 장거리·대전력 송전시대에 접어들고 있다. 또한 다양한 발전설비의 개발로 인하여 향후 전력계통망은 더욱 복잡화될 것으로 전망되며, 이와 같은 상황에서 전력계통을 보다 효율적으로 관리하기 위해서는 전력계통의 광역성, 대규모성, 그리고 다양한 설비들이 가지는 특수성과의 상호 관련성을 유기적으로 결합시킨 총체적인 운용기술 및 계통안정도 제고를 위한 안정화 대책

수립이 필요하다. 이를 위해서는 현계통구성및 운용방법의 재검토와 해당 기초 이론의 연구가 요청된다.

또한 전력계통의 종합자동화에 관련된 정보처리시스템과 운용 데이터베이스 구축및 응용프로그램의 고도화, 그리고 대전력 송전기술및 초전도에너지 저장장치등의 새로운 전력기에 대한 연구가 필요할 것이다.

여기에서는 전력계통의 송전부문과 운용부문에 대해 실현 가능성이 높은 과제를 개괄적으로 다루었으며 현재 학계및 연구소등에서 연구중인 비교적 단기 연구부문은 생략하였음을 언급하여 둔다.