

미국 전력 계통의 현황과 초전도 전력 기기의 개발

■ 한일택 / New York Power Authority, 박사

1. 전력 계통의 현황

1990년대에 시작된 전력산업구조개편(Utility Deregulation)의 영향으로 지금 미국 전력 업계는 큰 위기에 직면해있다. 구조개편으로 인하여 송전 계통의 투자가 이루어 지지 않고 있으면서 전력수요는 계속 늘어나고 있기 때문이다. 송전 계통은 옛날 그대로 지역적으로는 독점적인 운영을 하고 있지만, 완전 개방된 시장 경쟁은 아니다. 발전 부문은 현재 완전히 개방되어 무한 경쟁 시대로 들어갔지만 송전 업계는 그 뒤를 못 따르고 있다. 한마디로 미국 전력업계는, 특히 송전 계통은 지금 혼돈 속에서 어디로 가야할지 방향 감각을 잃고 있는 셈이다.

경제와 사회의 발전에 따른 수요 급증, 즉 모든 기술 개발과 공장의 현대화, 현대적 생활 방법과 편의 시설을 전기 공급에 의존하는 사회 구조 하에서 불안정한 전력 계통 때문에 사회적 또는 경제적 공황으로 이르게 될지 모르는 상황이 되고 있다. 발전 산업의 호황으로 전기는 충분하지만 필요한 수요자에게 제시간에 맞추어 공급되지 못하는 경우가 생길 수가 있는 것이다. 여러 가지 이유가 있지만 그 중에서도 부족한 송전선이 가장 큰 이유가 될 것이다. 새 송전선의 건설은 정부허가 기관, 지역사회, 토지소유자와 환경 보호론자들의 반대로 건설허가가 되는데 무척 힘들어 졌으며, 현재의 기술로는 그 이상 송전량을 획기적으로 증가시

키기도 어려운 형편이다.

미국 송전 계통을 보면 약 350,000Km의 가공선과 지중선이 있다. 그중 6,000Km 정도가 지중선이며 그중 55% 이상 약 3,500Km가 설계수명(40년)을 초과하고 있다. 초전도선을 이용하면 더 많은 전력을 같은 경로를 이용해서 보낼 수 있기 때문에 대체 전선으로서 큰 역할을 하게 된다. 특히 New York같은 대도시에는 지하시설이 포화상태여서 더욱 중요시 되고 있다. 현재 매년 200km 정도 시설이 증축 되고 있다. 그중 80km 정도는 69kV 이상이며 120km가 15kV에서 50kV급이다.

고유가 시대를 맞이하여 미국 정부는 Energy Policy Act 2005를 법으로 통과 시켰다. 이 법안에 의하면 원유의 해외 의존도를 줄이고 전기 자동차를 개발하여 유류소비를 줄이며 초전도 기술 개발을 지원하여 새로운 전력 수요계통을 구축하려고 하고 있다. 이에 따라 자동차 업계는 전기자동차 개발에 박차를 가하고 있다. 대도시 전력회사의 생산에 의하면 전기자동차의 시장 점유율이 5%만 되면 저녁시간 전력 수요가 50% 증가 할 것으로 예측하며 그 준비에 고심하고 있다.

노후화되고 있으며 과도한 부하에 허덕이는 송전 계통이 결국은 정치, 사회, 경제, 산업 전 분야에 걸쳐 대공황을 초래할 것이라는 우려가 있다. 새 기술, 즉 초전도를 이용한 새 송전 체제를 설치하고 시효가 지난



송전기기를 대체해야한다. 초전도를 이용한 새 송전 기기, 즉 송전선, 한류기, 변압기 등을 이용하면 효율이 올라가고, 손실이 줄어들고 운영 경비가 절감되고, 자연 경관이 훼손되지 않으며 사고 발생 시에 자연 환경에 미치는 영향이 현저히 줄어든다.

2. 초전도 기기 개발 상황

고온 초전도 물질이 발견된 1987년부터 미국은 에너지성(Department of Energy, DOE)을 중심으로 범국가적인 노력을 해오고 있다. 정부의 전폭적인 지원 아래 국립 연구소(ANL, LANL, ORNL)를 중심으로 초전도 전력 기기 연구 개발에 전력을 다하고 있다. 또 각 지역별로 주정부의 지원도 매우 활발하여 현재는 18개 주정부의 지원도 받고 있으며 여러 대학의 연구소를 비롯하여 주요 전력 회사가 개발에 참여하고 있다.

초전도 전력기기의 개발은 DOE의 SPI(Superconductivity Partnership Initiative) Program을 중심으로 매우 적극적인 활동을 하고 있다. 전체적으로 보면 미국의 초전도 개발은 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째는 초전도 2G 선 개발(Second Generation YBCO)이며 둘째는 초전도 선을 이용한 전력기기 개발이다. 여기서는 전력 기기 개발에 대해 미국의 현황을 알아보기로 하자.

초전도 전력기기 개발에는 Power Cable, Transformer, Fault Current Limiter(한류기), Motor, Generator, Flywheel, Synchronous Condenser 등이 있다.

현재 DOE는 Power Cable, FCL과 Flywheel에 집중적으로 지원하고 있으며 2G 선이 개발되는 데로 Motor, Generator, Transformer 등에도 지원을 아끼지 않으리라 믿는다.

DOE는 현재 미국의 송배전 계통을 현대화 할 수 있는 가장 좋은 방법이 초전도 전력기기를 응용하는 것이라고 생각하며 우선적으로 Cable 개발에 주력 하고 있다. 현재 Power Cable 개발에 관심이 집중되고 있는 이유는 1G (First Generation-BSCCO) 선재를 이용해 상용화가 가능하기 때문이다.

A. 송배전 전력 Cable

현재 개발 중인 Power Cable을 살펴보자.

DOE는 1990년도 말에 개발 중이었던 Detroit Edison(Pirelli 주도) Cable (그림 1)을 설치 후 Cryo-stat Vacuum Leak 문제로 마지막 현장 실험에서 실패했던 경험을 가지고 있다. 그 경험을 살려 이번에는 모든 면에서 주의



그림 1 Pirelli cable DTE

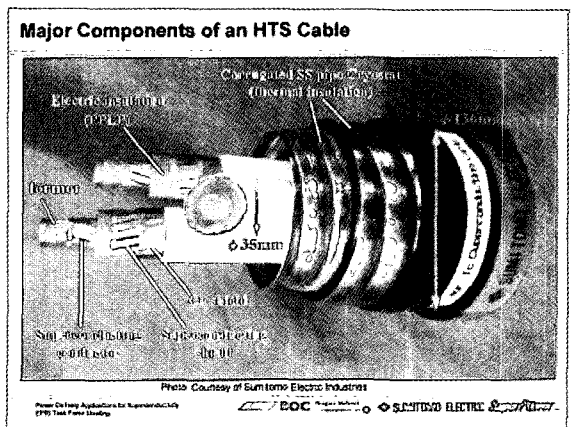


그림 2 Albany cable section

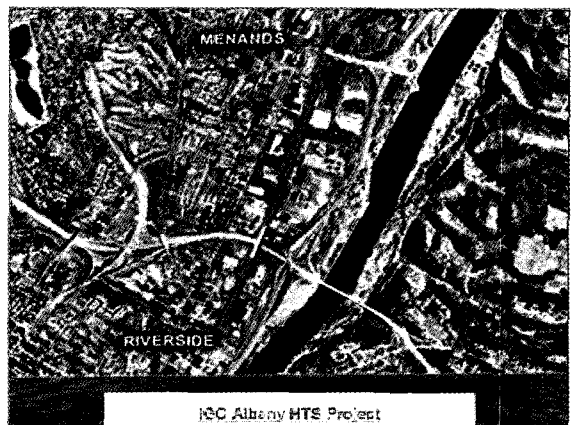


그림 3 IGC Albany cable

를 하고 있다. HTS Readiness Review Panel을 만들어 국립연구소, 대학 그리고 전력회사 Cable 전문가로 구성된 Team을 조직하여 모든 과정을 철저히 검토 조사 하면서 진행하고 있다.

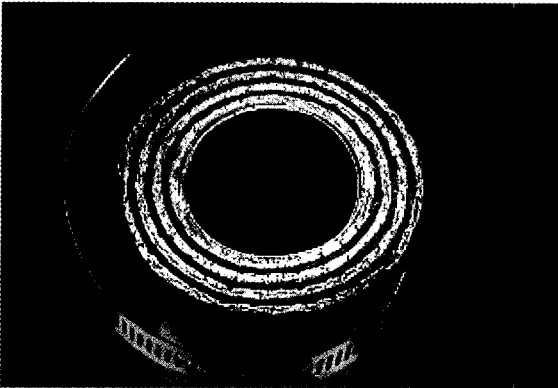


그림 4 Triax Cross Section



그림 5 AEP-Bixby pull

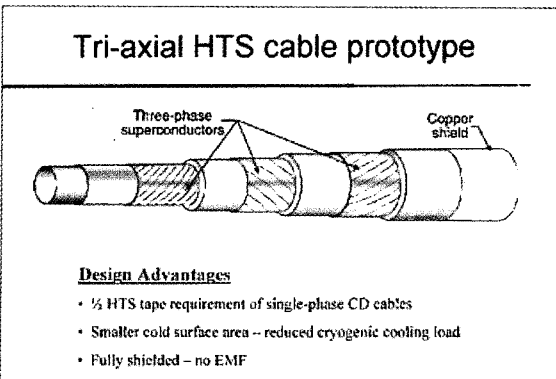


그림 6 tri-axial SW

그 첫 번째 사업이 Albany Cable이다 (그림 2). Albany Cable은 1G 선을 이용한 34.5KV, 800Amps 배전선이다. New York주의 수도인 Albany 도심지역(그림 3)에 새로운 배전망을 설치하면서 초전도 배전선을 350m 정도를 끼워 넣으며 그중 30m 정도를 2G 선을 이용한 초전도 Cable을 설치하는 것이다. 1G 선은 Sumitomo가 만들었으며 2G 선은 IGC-Superpower가 만들었다. Cable 설계는 3 Core - in one Cryostat type으로 Sumitomo에서 제작되었다. 냉동기기는 미국의 BOC가 설계 제작하여 이미 시운전이 끝난 상태이다. Cable은 지중선으로 설치되고 있으며, 금년 3월이면 현장 시험이 끝나고 4월 중 시운전이 시작될 예정이다.

두 번째 사업은 AEP Columbus Cable이다(그림 4). AEP 전력회사의 Bixby 변전소 (그림 5) 내에 13.8KV, 3000 Amps Tie Bus 형태이다. 총 200m 정도에 반 정도는 지상이고 나머지 반은 지하 설치이며 Manhole에서 접속작업을 할 계획이다. 접속작업 성공 여부에 따라 전선길이를 늘려 나갈 수 있는지를 시험하는 것이다. 또 변전소 내에 변압기 접속 작업도 시험할 계획이다. 이 Cable은 AMSC사의 1G 선을 이용하여 Ultera (Southwire 와 NGK 합작회사)에서 만들고 있다. 오는 6월 중에 현장 공사가 끝나고 시험에 들어간다. 냉각기는 New York주에 있는 Praxair에서 설계 제작 중이다. 이 Cable의 특징은 Tri-Axial Type (그림 6)이다. 즉 하나의 축에 3상이 모두 설치되어 효율이나, 냉동 면에서 탁월하다. 장래 배전선로에 많이 쓰일 것이다.

Southwire는 이미 2000년1월에 시험적으로 13.8KV, 1250Amps 초전도 배전선을 Atlanta 근교 자체공장에

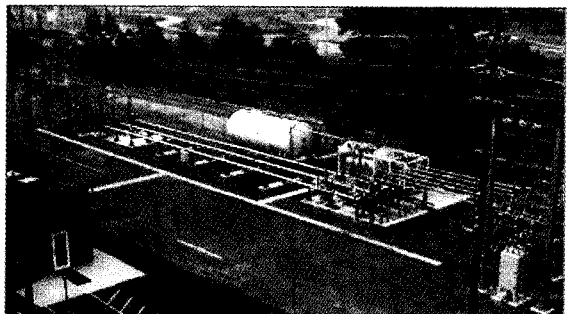


그림 7 Southwire HTS Site

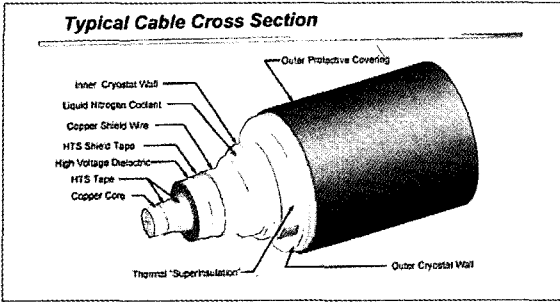


그림 8 LIPA Cable

성공적으로 설치 운영하고 있다(그림 7). 지난 6년 동안 30,000시간 이상을 사고 없이 잘 운영하여 초전도 Cable의 장래를 밝게 해 주고 있다.

세 번째 사업은 LIPA(Long Island Power Authority) Cable이다(그림 8). 138 KV, 600 MW 송전선으로 두번 전소를 연결하면서 30만 가구에 전력을 공급할 계획이다. 송전선으로 처음 기획된 이 사업은 AMSC가 주관하며 그들의 1G 선을 이용하여 Nexans가 다음달 3월부터 Cable을 만들 계획이다. 아울러 단말기도 같이 개발하고 있다. 냉동기는 불란서의 Air Liquide사가 설계 제작 중이다. 현재 계획은 금년 말까지 지중선으로 공사를 끝내고 내년 초에 시운전에 들어갈 예정이다. 구리(Copper)전선을 쓸 경우 138KV 지중선은 최고 200MW 이상을 보낼 수 없다. 하지만, 초전도 선을 이용할 경우 4배 내지 6배 까지 전력을 보낼 수 있다.

현재 미국의 송배전 손실은 7-10%에 이르고 있으며 노후시설에서는 15%까지 이르고 있다. 초전도 선의 손실은 극히 적다. Direct Burial의 경우 이 때문에 Thermal Sand나 FTB(Fluid Thermal Backfill 즉 붉은 세멘트)를 사용할 필요가 없으며, 터널을 쓸 경우 환기 장치에 큰 돈을 쓸 필요가 없다. 송배전 손실을 1-2%만 줄여도 700MW 발전소를 하나 짓는 것과 맞먹는 효과가 있다.

위의 Cable은 모두 Cold Dielectric (CD) Design이다. Detroit Edison의 Pirelli Cable이 Warm Dielectric (WD) Design Cable이었다. WD Cable이 특히 관심을 끌었던 이유는 현재 깔려있는 Pipe Type Cable에서 구리선재(Copper Wire)를 대체 할 수 있기 때문이다. 아

마 언젠가는 성공하리라 믿는다. 그리하면 New York 시내에 설치되어 있는 Pipe Type Cable의 일부만 초전도 선으로 바꾸어도 큰 효과를 볼 것이다.

이상에서 보듯이 금년과 내년은 초전도 선의 응용 면에서 아주 중요한 때이다. 어느 것 하나 소홀히 할 수 없는 중요한 사업들이다.

B. 한류기(Fault Current Limiter)

현재 미국 대도시 전력망은 고장전류 증가가 큰문제로 대두되고 있다. 대도시 변전소는 고장전류가 63KA 이상을 대부분 넘고 있기 때문에 새 용량의 송전선이나 배전망을 그 이상 설치하기가 힘든 곳이 많다. 따라서 한류기 개발에 총력을 집중하고 있다. 그러나 아직까지 뚜렷한 성과가 보이지 않고 있다. 1G 선을 이용한 한류기 개발은 중단 상태이고, 2G 선을 이용한 연구가 시작되고 있다. 앞으로 초전도 선을 많이 이용하기 위해서는 한류기 개발이 필수적이다.

한류기야 말로 진정 새로운 기술이라 볼 수 있다. 새로운 기술을 꺼리는 보수적인 전력회사 입장에서 보면 한류기는 이채로운 기기가 틀림없다. 더욱이 Solidstate 한류기와 경쟁하기 쉽지 않을 것이다.

DOE는 General Atomic사가 주축이 되어 15kV 한류기를 개발되어 SCE(Southern California Edison)에서 현장 시험 까지 끝냈지만 절연 문제(Flashover)로 상용화 되지는 못했다.

C. 변압기

현 전력 계통에서는 발전소에서부터 실수요자까지 대략 세 번 이상의 전압을 바꾸게 된다. 한번 변압기를 통과 할 때 마다 3~4%의 손실을 가져온다. 초전도 변압기를 사용할 경우 이 손실을 30% 정도 줄이며, 전체 변압기의 크기와 무게를 45% 정도 줄이고 운영비를 20% 이상 줄일 수 있다. 현재 미국 송전 계통에 설치된 변압기의 70% 이상이 25년 이상 노후 된 것이다. 또 사고 발생 시 화재위험이 없어지고 Oil로 인한 환경 파괴가 없어진다. DOE는 그동안 많은 노력을 들여 Waukesha/IGC-Superpower가 5/10MVA (그림 9) 개

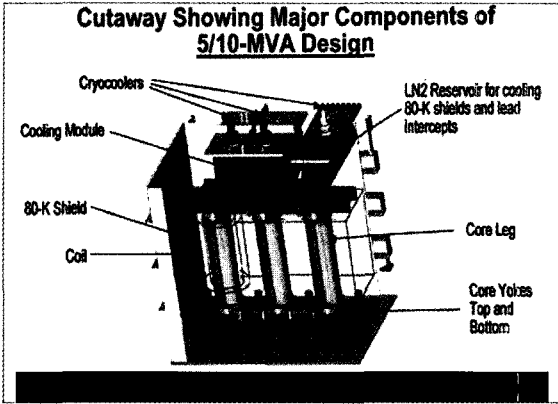


그림 9 XFMR Cutaway WEK

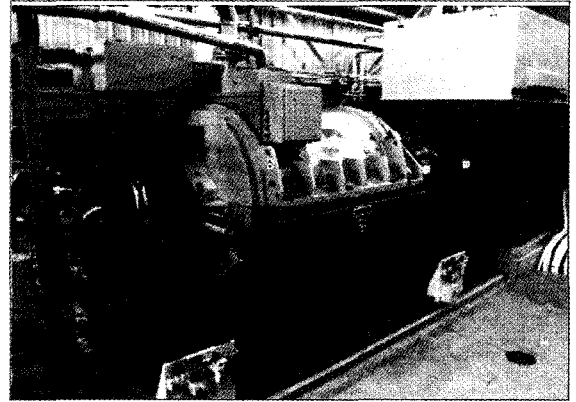


그림 10 5MW HTS motor AMSC

발에 일단 성공 했지만 값비싼 1G 선으로는 시장 경제성이 떨어지고 또 권선 절연 물질 때문에 현재는 개발이 중단된 상태이다. 금년에는 절연 물질 개발에 힘을 쏟고 있으며 곧 2G 선을 이용한 변압기 개발을 다시 시작 할 것이다.

D. Motor

DOE는 1G 선을 이용한 200마력 모터는 이미 1996년에 개발을 끝냈고 2001년에는 1200 마력 모터도 Rockwell에서 개발되었으며 지금 5000마력 모터가 개발되고 있다. AMSC에서는 5MW Ship Propulsion Motor 개발을 Navy와 개발 중이다(그림 10). Navy는 거의 모든 군함의 Steam Turbine을 초전도 모터로 바꿀 계획을 세우고 있다. 초전도 모터는 현재 모터와 비교해서 크기와 무게가 반으로 줄일 수 있으며 손실도 절반으로 줄어든다. 초전도 모터는 5000 마력 이상일 경우 경제성이 있다.

E. Flywheel

DOE는 Flywheel을 이용한 Load Leveling 과 UPS (Uninterruptible Power System) 개발에 주력하고 있다. 초전도 Flywheel을 이용해 단전을 막을 수 있기 때문이다. 한번 단전으로 대기업 또는 큰 공장이 입는 손해는 California에서만 백만 달러 이상이 되기 때문이다. Energy 저장 장치로서 Flywheel은 거의 손실이 없

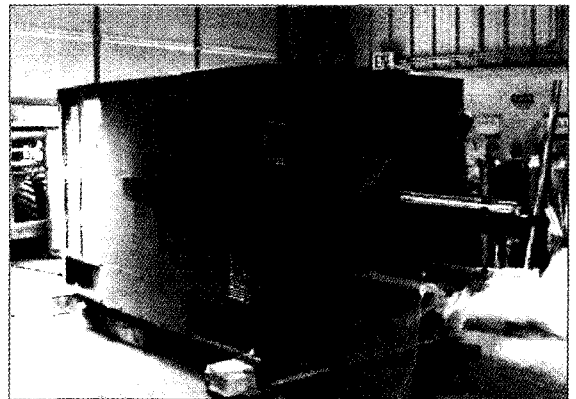



그림 11 SuperVAR generator1 AMSC

기 때문에 대단한 가치가 있다. Flywheel이 완전 개발되고 사용 된다면 웬만한 양수 발전소 이상의 효과가 있다. 10KWH Flywheel이 2003년에 개발 되었고 30KWH Flywheel이 개발되고 있다.

F. Synchronous Condenser

2004년에 AMSC에서 이미 10MVAR SuperVar를 개발하여 TVA에 설치 운전 중이다(그림 11). 지금까지는 Capacitor를 이용해 VAR 전력을 공급해왔다. 그러나 효율 면이나 운영 면에서 많은 문제가 있었다. Var Compensation은 특히 제철소에 운영에 꼭 필요한 기술이다. 제철소에서는 Short Circuit Current를 이용해 철광석을 처리하는데 SuperVar는 지금까지의



Capacitor를 이용한 기기보다 효율 면이나 계통 운영 면에서 월등한 실적을 보이기 때문이다. TVA에서는 이미 2대 이상을 더 주문한 상태이다.

G. 발전기

현재까지 GE에서 연구를 계속하고 있지만 비싼 1G 선 때문에 실용가치가 적어 중단 된 상태이다. 값이 저렴한 2G 선이 개발되면 다시 시작 될 것이다.

3. 앞으로의 전망

초전도 Cable이 개발되어 상용화가 되면 지난 100년간에 성립된 송전과 배전의 한계가 모호 해 지게 된다. 미국에서는 전압이 50KV 이상이면 즉 69KV부터 송전 선이고 50KV 이하이면 배전선으로 구분 되어 왔다. 즉 지금 까지는 Voltage-Driven 개념이었다. 그러나 초전도 선이 상용화 되면 Current-Driven으로 바뀌게 된다. 예를 들면 1000Amps 까지는 배전용이고 그 이상은 송전용이라고 부를 수 있는 날이 오리라 생각된다.

미국의 Con Edison지역 즉 뉴욕시의 중심가 만하탄 지역의 전력 밀도는 2000MW/mile² 약 800MW/Km²가 넘는 곳이 많다. 이런 지역을 초전도 전선을 이용하여 저전압 대용량 계통으로 바꾸려고 연구를 시작했다.

즉 3 세대 배전망이다. 이 개념을 실현하기 위해서는 2G 초전도 선과 한류기가 꼭 필요하다. 2015년경에 3 세대 배전망을 구축 하려고 노력 중이다.

초전도 전선 개발이 실용화 단계에 이르렀지만 1G 선의 비싼 단가(현재 약 \$200/kA-m) 때문에 보편적 실용화 까지는 힘든 상태이다. 선 값이 Copper(\$15/kA-m)와 비슷하게 되는 2G 선이 개발되면 실용화는 현실화 될 것이다. 현재 그 시기를 2010년경으로 예측하고 있다.

현재 1G 선으로 만든 초전도 기기는 가격 경쟁 면에서 일반적으로 상용화가 되지 못하고 있지만 크기와 무게가 중요한 요소가 되는 군수업체에서는 가격이 문제가 아니기 때문에 사용할 곳이 많이 있다. 미 국방성과 해군, 공군 연구기관에서 초전도 모터와 발전기에 심혈을 기울이는 가장 큰 이유이다.

미국 전력업계에서도 점점 초전도 기기에 관심을 가지고 참여하고 있다. 10년 전에는 DOE Peer Review에 아무도 참석 안했지만 지금은 10여 회사가 대표를 보내고 있다. 초전도 업계는 매년 새로운 발명과 발전을 거듭하고 있으며 DOE는 연구기금을 증가하고 있다. 그동안 초전도 기기 발전에 관심을 가지고 지켜 보아 온 필자로서 금년에는 뜻있는 열매가 맺기를 기원하는 바이다.