

직류송전과 제주연계

김 세 일*, 권 구 역**

(*한국전력 제주내륙연계사업추진반장

**한국전력 송변전처 지중선계획부장)

1. 서 론

전기는 초기 직류전기 발견으로 시작하여 실생활에 사용하여 왔으나, 교류가 발전기 구조, 신뢰성 및 사용전압으로의 변성의 용이등 많은 장점이 있어 생산, 수송 및 사용기기등에 전반적으로 적용되어 교류기술의 많은 발전을 가져왔다. 그러나, 교류로서는 안정도, 손실, 송전용량 및 무효전력 문제등으로 한계가 있어 직류방식은 직류차단, 고조파 발생 및 무효전력 공급문제등 결점에도 불구하고 광범위한 계통연계를 위한 보다 더 장거리의 송전, 이종 주파수계통간 연계 수단으로 이용되어, 1954년 스웨덴 본토와 Gotland섬간 연계를 시작으로 전세계 40여개소가 운전중이며, 현재 20여 Project가 추진, 계획중이다. 본고에서는 국내 최초로 시도되는 제주-육지간 연계사업을 중심으로 HVDC 송전에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 사업수립배경

제주도 전력사업은 지역특수성에 의하여 소규모(최대 단위가 10MW 이하)의 고립된 전력계통을 유지하고 있음으로 Scale Demerit에 의한 고정비 부담이 높고 100% 유류발전인 관계로 연료비 부담이 높아 발전원가 자체가 육지에 비해 약 2배 이상 높은 반면에 전력요금은 전국을 기준으로 결정되므로 이론적으로 적자를 면할 수 없는 상황이며(표 1 참

조) 이는 기존의 방법으로는 해결책이 없어 직류송전을 이용한 육지 계통과의 연결방안이 1980년대 초부터 검토되어 왔으며 85년 스웨덴 왕립연구소와 87년 한국전력기술 주식회사의 타당성 검토를 거쳐 제주도와 육지의 최남단 해남 100여 km을 용량 150MW×2, 전압 ±180KV, Solid Type의 해저 케이블 2회선으로 연결하는 본연계 사업추진이 90년말 확정되었다.

본사업의 타당성 검토는 위와 같은 이유로 경제성을 중점으로 검토되었으며 방법은 현 제주도 전력계통을 그대로 유지 발전 시키는 방안과 제주 DC Inter-tie를 적용했을 때의 방안에 대해서 평가 기간 20년동안에 소요되는 총경비를 현재가치(NPV)로 환산 비교 평가하는 방식을 택하였다.

위 방안들은 제주도 전력사업의 총체적 측면을 다루는 문제이며 그 기본이 되는 수요 예측은 우리 회사 전력경제연구실에서 조사 작성한 것으로 '91년 131MW에서 2001년 443MW으로 향후 10년간년평균 13%(전국 7%)의 고성장이 전망된다.

표 1. 제주도 전력사업 수치실적

년 도		'87	'88	'89	'90	'91
손 익(억원)		-194	-117	-169	-248	-254
발 전 원 가	전 국	36.24	32.18	29.00	29.88	66.05
	제 주	92.27	67.14	67.14	60.79	28.10
원 /Kwh		전국대비 2.25배	2.09배	2.28배	2.03배	2.35배

2.1 검토기준

2.1.1 독립 계통 유지시

제주도를 독립계통으로 계속 유지시 먼저 결정해야 할것은 발전설비 계획의 수립이며 본 방안에서는 기저부하 담당으로 안정성 위주의 순수기력 및 복합기력을 병용하며 중간부하 담당으로 효율이 매우 높은(40%이상) 저속내연을, 첨두부하대비로서 복합 G/T를 채택하였으며 이들의 평균 연료비는 년도별로 차이는 있지만 2000년 경에 약 22원/Kwh대, 발전원가는 55원/Kwh대로서 예측 상정되었다.

설비에비율은 25~30%를 적용하였으며 이는 육지에서 일반적으로 알려진 설비에비율 20%대보다 5%이상 높은 수준인데 소규모 독립계통(섬 등, 하와이 35%)에서 보편적으로 적용되는 수준이다. 또한 최대 단위기 용량은 계통 최대전력의 10% 수준으로 년도별 예상 최대전력 추이에 따라 변동 투입하였다.

2.1.2 계통 연계시

계통 연계시 발전설비 계획은 원칙적으로 독립계통 유지방안의 그것과 동일하며 단지 연계용량(150MW×2회선) 및 예비율 등을 고려하여 설비 투입시기만 지연 조정시키는 방식을 택하였다.

설비에비율은 육지계통에서 적용하는 20~25% 선을 상정하였으며 특이하게 제주도 최대전력 발생 시간대(하와 6~8시)가 육지의 경우(하오 2시 부근)와 다른점, 즉 예비력 공용효과로서 제주도 최대전력의 20% 정도를 감안하였다.

제주도에 전력을 공급하기 위한 육지의 발전설비 감안은 장기 전원계획상의 예상 고정비를 비용에 반영하였으며 연계로 인한 송전손실(2%)도 고려하였다. 연료비의 추정은 제주 발전설비에 의한 발전량과 연계에 의한 송전량의 분배를 년도별 예상 송전전력량을 기준하여 연계설비를 기저부하 담당으로(약60%) 나머지를 독립계통 유지방안의 원칙과 함께 배분하였다.

2.2 평가결과

비교평가에는 할인율 및 유가같은 중요한 평가 변동 요인이 있으며 이들을 고려하여 위 두 방안의 20년간(1993~2002) 소비비용의 현재가치 환산액 비교시 계통연계 방안이 약 칠백억에서 천억 정도

유리한 것으로 나타났다.

공익사업인 전력사업에 있어서 할인율(Discount Rate)을 얼마로 할 것인가는 많은 논란의 대상이 되 왔으나 우리회사에서는 서울대 경제연구소 용역 결과인 불변가격 8%를 적용하였고 참고로 두 방안의 소요경비가 같아지는 할인율은 16%로 평가되었다.

유가는 본 평가의 결정적인 요소로서 18\$/B를 적용하였으며, 30% 인상 가정시(25\$/B) 그 추가 이익액은 약 배로 평가되었다.

참고로 본 연계설비 용량의 변경(200MW×2회선)시에도 평가하였으나 현실비용량(150MW×2회선)의 경우보다 불리한 것으로 나타났으며 이는 150MW에서 200MW로 증가시 증분비용 과다의 영향으로 보여진다.

2.3 연계시의 추가효과

2.3.1 광통신 사업

본 제주연계 시스템의 운전, 보호, 제어를 위한 통신망으로서 광케이블 시스템이 채택되었으며, 이로서 본 연계 목적 이외에 우리회사의 한국통신으로부터의 전력통신용 회선 임차료의 절감과 아울러 회선대여 수익이 연간 8억 향후 10년간 150억 수준의 수익이 기대된다.

2.3.2 노후, 소용량 발전기 조기폐지 및 저효율 발전소 휴지

제주도에는 현재 일부 발전소에 내용년수가 25년 이상된 노후, 소용량 발전기가 다수(약 37MW) 있어 연계시 이들의 조기폐지와 연계에 따른 초기년도 예비력의 여유로 일부 저효율 발전소의(약 60MW 수준) 휴지가 가능함으로서 이들에 따른 발전소 운영비 절감의 가능성이 기대된다.

2.3.3 환경보전 및 발전소 입지난 해소

제주도의 독립계통을 계속 유지시 최소한 2010년 이후에는, 청정구역으로 선포된 제주도의 국가 정책 특성상, 새로운 발전소 부지의 취득이 거의 불가능 할 것으로 보여지며 이는 비용평가에는 반영되지 않았지만 실제적으로 장차 제주도 전력사업의 가장 큰 장애요소인 입지 구득효과도 기대된다.

3. 일반 직류 송전 기술의 개요

직류 송전계통은 직·교류를 변환하는 변환 장치

와 변환기용 변압기, 고조파 처리를 위한 Filter 설비 및 제어설비와 송전선으로 구성되며 그 개요는 다음과 같다.

3.1 변환장치(Thyristor Valve)

변환 장치의 핵심은 사이리스터 밸브와 이에 따른 제어 및 보호회로에 있으며 직류 송전에 사용되는 Valve로는 수은 아크밸브(Mercury Arc Valve)와 사이리스터 Valve가 있으며 사이리스터 Valve는 수은 Arc Valve에서 생기는 이상 현상(Arc back)이 없고 보수도 간단하고 회로 구성도 정격전압, 전류의 선택이 비교적 자유로와 현재 대부분의 HVDC 연계는 사이리스터 Valve를 채용하고 있다.

냉각 방식에 따라 공냉식, 수냉식, 유냉식이 있으며 사이리스터 개발 초기에는 공냉식을 많이 사용하였으나 냉각 효율이 좋은 수냉식이 근래에는 많이 사용되고 있으며 유냉식은 일본에서 사용실적이 있으나 별로 사용되고 있지 않다.

사이리스터 Valve는 요구되는 직류전압에 따라 사이리스터를 직렬 연결 사용하며 그림 1에서는 전형적인 사이리스터 회로를 보여준다.

사이리스터 보호는 궁극적으로 사이리스터를 안전하게 도통 시키는데 있으며 그 제어 회로는 Pulse 발생 시스템 및 사이리스터 전류시 점호 순간의 Mismatch 등으로 인하여 발생하는 과전압을 Damping하는 회로와 사이리스터를 강제 도통시키는 BOD회로 및 사이리스터의 di/dt 저감용으로 채용된 Saturable 리액터 등이 주요 구성원으로 되어 있다.

변환기의 Valve 접속 방식으로는 Valve의 역내 전압, 변압기의 이용율을 고려할 때 삼상 bridge 접속을 기본으로 한 6pulse 접속과 12pulse 접속이 있으며 6pulse 접속시는 $6n \pm 1$ ($n=1, 2, 3$)차의 고조파가 발생하므로 Filter 설치가 많아지면 12pulse 접속시는 상대적으로 적은 고조파가 발생하나 그 선택은 Filter의 가격과 변환장치의 가격이 좌우하며 현재 대부분 12pulse 방식을 채택하고 있다.

고조파를 줄이기 위한 Filter 설비는 보통 변환 장치에 무효전력 공급을 겸하며 필터 탱크 갯수의 결정, 탱크당 무효 전력 용량, 필터 형식의 채용 등은 계통의 에너지 손실 평가액, 공급 용량에 따른

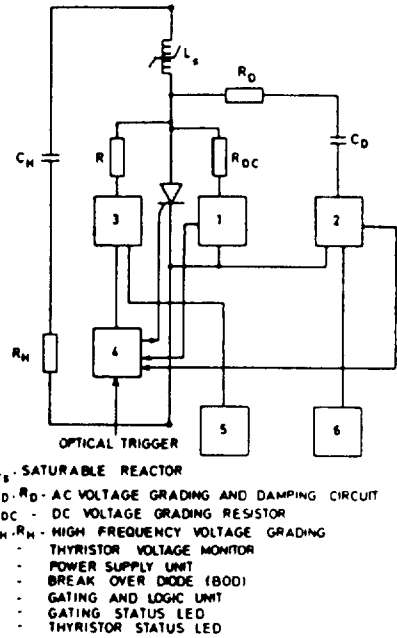


그림 1. 전형적인 Thyristor Valve Module

무효 전력 균형 비율, 개폐시의 전압변동 등을 고려하여 결정하며 일반적으로 커패시터 뱅크를 추가하여 무효전력 균형을 잡아주는 예가 많으며 커패시터 뱅크 추가시 고조파의 가능한한 저감을 위하여 고차 고조파에 공진시켜 사용한다.

변압기에 입력되는 교류 전압에 역상분(Negative Sequence) 전압이 포함되어 있으면 시스템에 비정상 고조파를, 즉 직류측에 2차 고조파 전압, 다시 교류계통측에 3차 고조파 전류를 유발함으로 입력 교류 전압의 평형에 주의하여야 한다.

3.2 변환기용 변압기

변환기용 변압기는 변환기가 일반적으로 삼상 Bridge 접속방식을 사용하기 때문에 12pulse 시스템시는 5, 7차 고조파 상쇄를 위해 Valve 측에 스 및 Y결선을 가져야하며 단상 및 삼상의 구분은 예 비 변압기를 포함한 경제적인 관점에서 선택된다.

일반변압기와 비교할 때 권선에 고조파를 많이 포함한 전류가 흐르기 때문에 변압기간, 혹은 상간의 리액턴스 오차를 최소한으로 줄여 비정상 고조파를 억제하여야 한다. 또한 Valve의 사고나 전류 실패시 과대한 고장 전류가 흐르므로 이것을 제한

하기위해 변환기용 변압기의 리액턴스는 일반 변압기보다 수 % 크게한다.

실제적으로 위의 고장 전류를 제한할 수 있는 것은 선로의 서지임피던스와 변압기 리액턴스, 평활리액터의 리액턴스이며 평활리액터의 리액턴스는 실제로 고장전류의 제한이라는 점과 DC 선로에 있어서 기본과 공진이 일어나지 않도록 결정되어 진다.

3.3 제어 및 보호

직류 송전의 제어는 기본적으로 순, 역변환기의 gate pulse 위상제어에 의하여 2차적으로 변환기용 변압기의 Tap 제어를 사용한다. 두 제어는 각기 개별적으로 운영되면서 상호 보완되는 특성을 갖는다.

제어 방식으로 정전류, 정여유각, 정전압, 정전력 및 주파수 제어등이 사용되며 그 기본이 되는 것이 정전류 제어와 정여유각에 의한 정전압 제어이다.

일반적으로 제어는 크게 두가지, 즉 순변환기에서 전류 제어를 하고 역변환기에서 전압 제어를 하는 방식과 그 역의 방식이 있는데 후자가 싸이리스터전류 면에서 훨씬 안정적이나 반면에 무효전력의 공급량이 많아지는 등 효율성이라는 측면에서 약점을 가지게 된다.

싸이리스터 제어의 근본인 점호방식은 각 상별 점호 및 등간격 점호방식의 두 종류가 있는데 각 상별 점호방식은 각 싸이리스터마다 점호 순간을 개별적으로 결정하는 것으로서 장점으로 비대칭 전압이나 왜형파의 경우에도 최대의 직류전압을 유지할 수 있는 점이나 상대적으로 고조파 확대의 문제점을 갖고 있어 최근에는 거의 점호순간이 같은 간

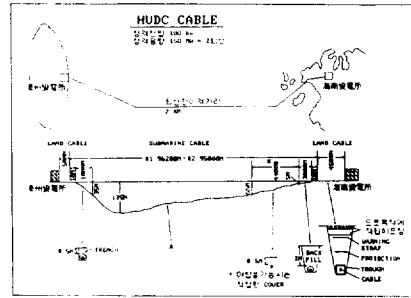


그림 3. 케이블 현황

격으로 주어지는 등간격 점호방식을 선호하는 추세로 되어있다.

직류 송전 계통에 일어나는 고장의 종류는 크게 양측 변환소 교류 모선에서 일어나는 고장과 DC선로의 지락, 변환기에서의 전류실패 세가지 정도로 나눌수 있으며 직류 송전의 보호는 이와 관련하여 제어 시스템과 연결되어 시스템 전체의 운영으로 이루어진다. 보호계통은 일반적으로 크게 2계열화되었으며 원칙적으로 고장시 시스템의 트립, 국부적으로 싸이리스터의 안전한 개폐에 주안점이 있다고 볼 수 있다.

고장감지도 시스템의 특성상 교류 및 직류측 전류의 비교를 통해서 혹은 전압강하율 및 전압 강하수준이 직류측이 상대적으로 빠르고, 많이 일정하게 강하되는 점등을 이용하여 적용하고 있으며, 또한 변압기 및 평활리액터의 임피던스 차이에 의한 고장전류 크기로 고장개소 판별도 가능하다.

4. 제주 연계 기술사항 개요

위에 서술한 일반 직류송전기술과 관련하여 제주 Inter-tie의 개념이 그림 2 단선도에 나타나 있으며 주요특징으로 Bipole 양측 접지 방식이며 상정사고에 대해 이용율을 높이기위해 케이블 전송로 전환 시스템을 채택한 점을 들 수 있다. 접지시스템은 해수귀로 방식으로서 변환소에서 약 15km 떨어진 곳에 전극소(Electrode Station)를 설치 운전한다.

변환장치는 12pulse 시스템에 수냉식 Thyristor Valve를 채택하였으며 변압기는 경제적 관점에서 예비변압기 포함 3상 3권선형 5대로 구성하며 그 리액턴스는 13%로서 HVDC Simulator를 이용한

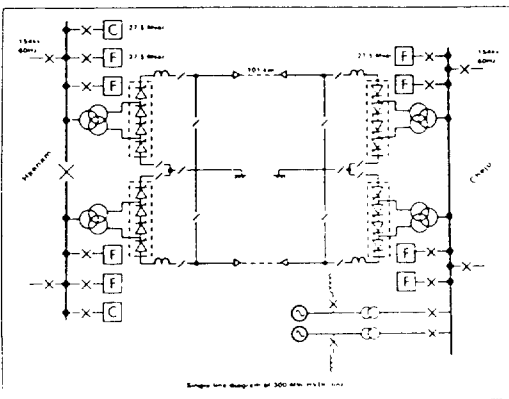


그림 2. 제주연계 단선도

Simulation 결과에 의하면 케이블 고장시 고장전류를 약 4KA 수준으로 유지할 수 있는 수치이다.

무효전력 공급은 육지측은 Filter와 Capacitor Bank로 제주측은 역시 Filter와 복제주 G/T를 동기조상기로 공급하며 Filter 자체는 13, 15차 고조파에 대한 Double Tuned Filter와 23차 이상에 대한 High Pass Filter로 구성하였으며 Capacitor Bank도 32차에 공진 시킴으로서 고차 고조파를 고려하였다. 또 이들의 Unit별 용량은 개폐전압 변동 기준 5%와 단위 필터의 경제성 규모를 고려하여 27.5MVAR로 선정, 총 공급가능량은 Pole당 110MVAR로 하였다.

직류케이블은 송전용량 300MW(150MW/pole)를 송전할 수 있는 직류 ±180KV, Cu 800mm²의 Solid type(mass impregnated paper insulated) Cable로서 육상부 약 5km를 제외한 해저구간은 현장접속이 없이 약 95km 2조를 공장에서 직접 포설선에 선적하여 현장에서 포설하게 되며, 해저케이블 선정에 대하여는 Solid type, XLPE Cable, OF Cable이 대상이 되었으나 XLPE 케이블은 현재까지 직류 절연특성상 문제가 있어 현재 사용실적이 없으면, 단지 일본의 홋카이도-혼슈 직류선로에서 귀로선으로 사용하는 경우는 있으나 본선(Pole Line)에는 사용하지 않았다.

또한 OF 케이블은 일부 짧은 구간(약 40km 정도 이내)에서 사용되고 있으나, 본 구간은 약 100km 정도의 장거리 구간으로 OF 케이블은 급유 문제로 불가능하였다. 따라서 현재까지 사용실적이 가장 많고 신뢰성이 입증된 Solid type Cable을 사용케 되었다.

한편, 케이블의 외적 보호에 대하여는 매설구간과 비매설구간으로 구별하여 매설구간은 Single Armour Cable을 그리고 비매설구간은 Double Armour Cable을 사용하여 전 구간에 대하여 기계적 보호에 신중을 기하였으며 육상구간은 콘크리트 트러후에 넣어 도로에 매설함으로 외부 보강은 생략하였다.(케이블 현황은 그림 3 참조)

본 해저케이블은 현재 동양에서는 최장설비로서 최신의 장비 및 기술진에 의해 시공될 것이다.

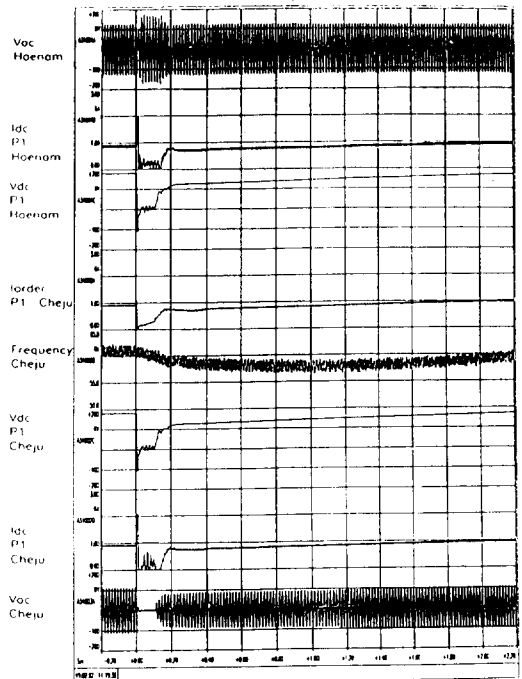
두개의 전력선중 1개루트에 병행포설되는 광통신 케이블은 12코아의 저손실 광섬유케이블로 중계기 없이 제주-해남간의 광통신 망을 구성한다.

각 변환소에 설치되는 광통신 단국장치의 회선용량은 약 1300회선 규모이며, 향후 광단국장치만의 확장으로 수십만 회선까지의 증설이 가능하다.

이들 통신회선은 변환소간 전력계통의 보호, 제어와 자동급전을 위한 EMS, SCADA의 데이터 전송회선, 사무자동화용 온라인회선과 급전연락 및 일반업무회선들로 사용예정이며 장차 정보화 사회의 시대에 부흥하는 전력사업의 정보통신을 위한 중추적인 망 구성에 기여하게 된다.

또한 광통신케이블을 전력케이블과 병행시공함으로서 설계비, 운송비, 케이블 포설장비 및 어민보상비등 단독의 광케이블 포설보다 경제적인 시설을 가능케 하였다.

제주연계에서 복제주 G/T는 무효전력 및 단락용량의 공급원이며 발전기로서의 운전이 가능토록 하여 비상시 전원으로서의 역할도 겸하고 있다. 현재 제주측 인버터 AC 모선의 삼상단락용량은 2기의 G/T를 포함하여 550MVA 수준에 불과하며 이는 Short Circuit Ratio(송전용량/단락용량)가 2



THREE PHASE AC SYSTEM FAULT(100ms) AT INVERTER

그림 4. BIPOLAR OPERATION-300MW MAINLAD TO ISLAND FREQ CONTROL MODE-TWO SYNCHRONOUS COMPENSATORS

미만으로 HVDC 송전중 대표적인 강한계통과 약한 계통의 연계이며 제어도 상대적으로 안정한 인버터 측에서 전력을 조정하는 방식(제주 주파수 제어)을 기본으로 하고 있으며, 앞으로 제주 기존발전소와 더불어 상정사고 및 경제급전을 고려한 종합적인 운전이 되도록 할 것이다.

참고로 본연계는 상정사고로서 가장 심한 조건중의 하나인 복제주 인버터 교류모선 삼상단락사고시 (가정 : 전용량 송전, 6Cycle 사고후 자동회복, 제주 자체발전 전무 제주계통 무효전력 자체 해결) 성공적인 회복이 가능하며 그림 4에서 이과정을 보여주고 있다.

5. 결 론

직류 송전의 여러가지 장점이 일찍부터 인정되었고 해외에서는 이에 따른 연구와 개발이 이루어져 현재 실제 운전되고 있는 시스템은 50여개소가 넘는데 그동안의 운전실적으로 이 시스템의 기술적, 경제적 타당성을 충분히 입증했다고 볼 수 있다.

직류 송전에 있어서 당면문제는 변환설비의 가격이 아직도 고가라는 점인데 사실 HVDC 기기의 가격은 계속적으로 하락하여 왔으며, 지금은 20년전

에 비해 60% 수준이라고 볼 수 있다. 앞으로도 꾸준한 가격저하로 직류송전의 경제적 타당성을 좀 더 높여리라고 본다. 또한 직류 차단기의 개발, GTO 싸이리스터의 대전력 계통 채용 등이 좀 더 많은 전력 계통에 직류 송전의 입지를 마련하리라고 본다.

우리나라는 제주-육지간 전력 계통 연계에 최초로 적용되 사업이 현재 진행중이며, 유럽대륙이 전력 계통에 관한한 한나라인 점을 감안해보면 우리도 차제에 인근국가간 전력연계 필요성이 생겼을때 이에 대처해 나갈수 있도록 해야 할 것이다.



김세일(金世一)

1942년 3월 3일생. 1966년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 현재 한전 송변전처, 제주-육지전력계통연계 사업추진반장.



권구억(權九億)

1948년 10월 5일생. 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 한전 송변전처 지중선계획부장.