

직류변환 송전방식 국내도입 타당성 검토
: 신옥천-서대구 345kV 송전선로 1회선 직류변환 설계

김동준, 윤재영, 양광호, 문영환, 이동일*, 신구용*
한국전기연구원, *전력연구원

Feasibility Study of the application of HVDC System to Domestic Power System
: Design of the HVDC system for Sinokchun-Sedaegu 345kV Transmission line

D.J. Kim, J.Y. Yoon, K.H. Yang, Y.H. Moon, D.I. Lee, G.Y. Shin
KERI, KEPRI

Abstract - This paper describes the feasibility study of HVDC system application to KEPCO power system for increasing power transfer capability or the flexibility of power delivery from one area to the other using the existing transmission line. This paper assumes the 345kV transmission line connecting between Shinokchun and Sedaegu to be converted to the DC line by replacing the AC insulator with that of DC. Then, the HVDC bipole system of 1000MVA with $\pm 300kV$ is designed and the contingency studies are carried out.

1. 서 론

국내 전력계통은 점차 송전선로의 신규 경과지 확보의 어려움과 기존 송전선로 건설 지연 등에 의해서 안정적인 전력공급 신뢰도 확보가 어려워지고 있다. 따라서 시설설비를 최대한 활용하는 방안이 모색되고 있고, 이에 대한 하나의 방안으로서 직류송전계통을 도입하여 송전용량을 증대하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

직류송전은 리액턴스 제약이 없기 때문에 직류 송전용량은 도체온도상승에만 제약을 받는다. 또한 직류송전선로 건설비용은 교류송전 선로에 비해 더 경제적이다. 따라서 1970년도 이전에는 직류송전은 해저케이블 송전과 장거리 대전력 송전에 주로 채용 되었다. 1980년대 들어오면서 직류송전에 관한 소프트웨어 및 하드웨어 기술이 급속히 발전되고 직류 송전기술 경험이 축적되면서 전력용통을 위한 비동기 연계와 시설설비의 송전용량 증대를 위해서 채용되는 경우가 증가되고 있다.

시설 설비의 송전용량 증대를 위해서 인도에서는 교류 선로를 신설하는 대신 직류송전을 선택했다[1]. 인도 내의 2개의 전력회사간의 196km, 220kV의 교류 2회선 연계선로에 대하여 송전용량을 240MW에서 400MW로 증가시키기 위해서 시설교류설비를 직류설비로 변환하여 송전하는 것이 더 경제적인 것으로 분석되었다. 시드니 back-to-back(BTB) 200MW급 변환소는 서부지역과 동부지역의 전력용통시 나타나는 전문문제를 해결하기 위해서 건설되었다[2]. 인도 Chandrapur에서의 BTB 직류연계는 수자원이 풍부한 남부지역과 화력이 풍부한 서부지역의 전력용통을 위해서 건설 되었다. 이 BTB 직류계통은 2개의 500MW pole로 구성되었고(총 1000MVA), 직류전압은 205kVdc 이다[3].

국내에서 직류계통 연구는 시설 교류선로의 송전용량을 증대시키면서 지역간의 전력용통을 증진 시키는 타당성 연구와 단락전류 억제를 위한 타당성 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 선로 이용률이 낮고 전압 변동 문제가 발생할 가능성이 많은 신옥천-서대구 345kV 1회선 교류선로를 직류선로로 변환하여 서쪽지역과 동쪽지역의 전력용통을 향상시키는 방안을 검토한다.

2. 본 론

2.1 한전계통 검토

본 논문에서의 직류계통 국내 도입 연구는 국내 전력계통의 근간을 이루는 345kV 선로에 대해서만 한정한다. 국내계통에 직류계통을 적용하기 위해서는 직류계통의 장점을 살릴 수 있는 계통문제가 존재해야 한다. 기 연구에서는 송전선로의 길이에 의한 안정도 문제를 검토하였다. 국내에서는 대부분의 345kV 송전 선로의 길이가 100km 이하였기 때문에 송전선로 길이에 의한 송전용량 제한은 없었다. 본 연구에서는 국내계통 송전선로의 이용률이 가장 낮은 선로를 검토하여 직류계통을 적용하는 방안을 검토한다.

2.1.1 국내 2004년 피크 부하 케이스 검토

국내 직류계통을 적용하기 위한 타당성 검토로서, 2004년도 국내 계통 최대부하 케이스를 검토하여 송전선로 이용률이 가장 낮은 선로를 조사하였다. 2004년도 피크부하 케이스에 대한 계통기본 정보는 아래와 같다.

- 발전량: 50286.6MW, 12057.2MVAR
- 부하량: 49493.4MW, 22874.2MVAR
- 버스shunt: -12428MAR
- 선로 총송전용량: 17018MVAR
- Slack 모선: 울산 T/P
- 모선 1339 ◦ 선로: 2042 ◦ 발전기: 189기
- 부하모선: 909 ◦ 변압기: 374
- 765kV: 4개(손실: 10.64MW, 290.45MVAR)
- 345kV: 198개(손실: 515.93MW, 8743.74MVAR)
- 154kV: 1634개(손실:266.65MW, 3793.70MVAR)

조류계산을 통한 345kV 송전선로의 송전전력은 그림 1과 같다. 국내 345kV 송전선로는 4 bundle 인 경우 송전용량은 2000MVA이며, 2 bundle인 경우는 1000MVA 이다. 실제 송전용량은 40~50%정도로 송전되고 있다. 가장 송전선로 이용률이 낮은 선로는 신옥천-서대구 345kV 1회선 선로로서 170MW를 송전하고 있다. 이 선로는 2 bundle 로서 선로의 최대 송전용량은 1000MVA 이다.

그림 1처럼 실제 신옥천-서대구 345kV 선로는 2회선 선로이나 하나의 선로가 선로중간에 무주양수와 연결되어 발전력을 송전하기 때문에, 나머지 하나의 선로는 1회선 선로처럼 동작한다. 따라서 신옥천-서대구 345kV 선로에 대한 등가 임피던스는 다른 모선에 비해 상당히 높다. 그림 2는 이 선로에 대한 송전선로 정수이다. 결과적으로 이 345kV 송전선로에는 조류가 적게 흐른다. 또한 이 선로의 등가 임피던스가 높기 서대구 모선에 전압 변동 문제를 야기시킬 수 있다. 본 논문은 이 선로를 대상으로 정상상태에서 직류변환 하여 송전용량을 증대시키는 방안을 검토한다.

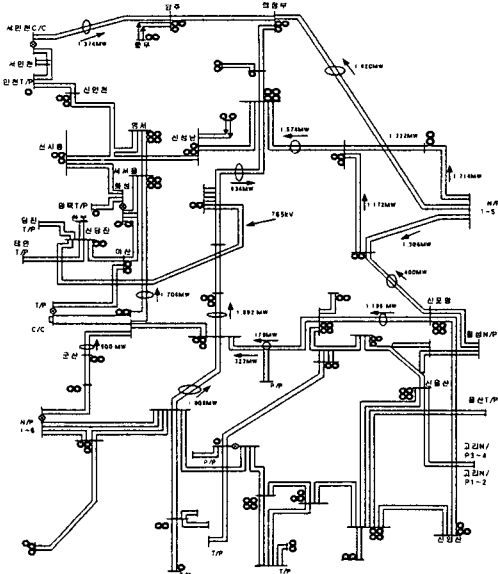


그림 1. 2004년도 peak 부하 계통도

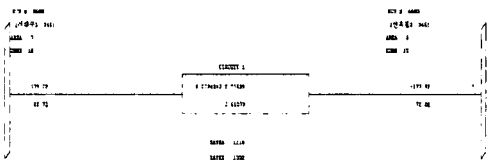


그림 2. 신속전-서대구 345kV 1회선 송전선로 정수

2.2 직류계통 설계

본 절에서는 신속전-서대구 345kV 1회선 교류선로를 직류 변환하여 송전하는 직류시스템을 설계한다. 직류시스템은 교류선로를 직류로 변환한 직류선로와 두 개의 변환소로 구성된다. 변환소는 순변환소와 역변환소로 각각 1000MVA급으로 설계한다.

2.2.1 직류계통 정수 설계

경제성을 고려하면 BTB 직류시스템을 송전선로 중간에 변환소를 건설하는 것이 보다 경제적이겠지만, 본 논문에서는 PTP 직류시스템을 가정한다. BTB 직류시스템인 경우 선로의 저항이 없기 때문에 직류전압을 낮출 수 있고 따라서 절연레벨에 따른 비용이 절감되기 때문에 PTP 방식에 비해 20~30%정도의 비용을 절감할 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 논문에서 PTP 직류시스템으로 설계하는 것은 향후 PTP 직류시스템의 국내 도입과 운전경험을 위해서 시험적으로 건설할 수 있는 가능성을 염두 해 두고 검토하기 때문이다.

직류선로는 345kV 1회선 송전선로를 그대로 사용하는 것으로 가정한다. 1회선 선로는 3상으로 구성되어 있기 때문에 직류 bipole 시스템으로 구성 가능하다. 345kV 선로의 절연레벨로 견딜 수 있는 직류전압은 기설 교류선로로 직류 ±300kV 가능하다. 단, 교류 애자는 직류형 애자로 교체하는 것으로 가정한다. 직류전압 결정은 직류선로의 저항이 작기 때문에 ±300kV 이하의 전압에서 설계하는 것이 가능하겠지만 본 논문에서는 직류 ±300kV로 가정한다. 하나의 pole은 500MVA 급으로 설계한다. 실제 건설과정에서는 하나의 pole을 먼저 건설해서 사용하고, 나머지 한 pole을 나중에 제작하여 완전한 bipole을 구성한다. 이렇게 건설하는 것이 경제적이다.

상용조류계산 프로그램에 들어가는 직류계통은 두 개의 pole로 구성되며, 직류계통의 정수계산은 아래와 같이 결정된다. 양 변환소의 무효전력 보상장치는 직류시스템이 없는 경우의 2004년도 피크부하의 모선 전압레벨과 같도록 무효전력량을 조정하여 아래와 같이 결정하였다.

- 345kV 1회선 교류선로의 저항 계산:
 - $0.00343 * (345kV)^2 / 100MVA = 4.08 \text{ Ohm}$
- 순변환기 변압기 설계:
 - 변압기는 255MW, 역률은 0.85 pf, 정격은 300MVA
 - 정격전압 $E_{acr} = V_{dcr} / 1.35N_r = 300 / 1.35 * 2 = 111.11 \text{ kV}, 130.0 \text{ kV}$
- 변압기 Turn Ratio:
 - $TRR = E_{acr} / E_{base} = 130.0 / 300 = 0.38$
- 기본 저항값
 - $E_{acr}^2 / MV_{Abase} = (130E3)^2 / 300E6 = 56.33 \text{ Ohm}$ 변압기의 리액턴스는 7%로 가정하면,
 - $X_{cr} = 0.07 * 56.33 = 3.94 \text{ Ohm}$
- HVDC 변환소의 무효전력보상장치:
 - 순변환기쪽: 300MVAR 보상
 - 역변환기쪽: 400MVAR 보상

2.2.2 직류계통 조류계산 데이터

그림 3은 신속전-서대구 1000MVA급 직류계통을 보여준다. 각 pole은 500MVA급으로 설계되어 총 1000MVA급 bipole 시스템으로 구성된다. 표 1과 표 2는 상용 조류계산 프로그램에 입력되는 각 pole에 해당하는 직류계통 설계 데이터이다. 이 데이터를 이용하여 다음 절에서는 정적 상정사고를 통해서 송전용량 증대 효과와 동서간의 전력유통에 대해서 검토한다.

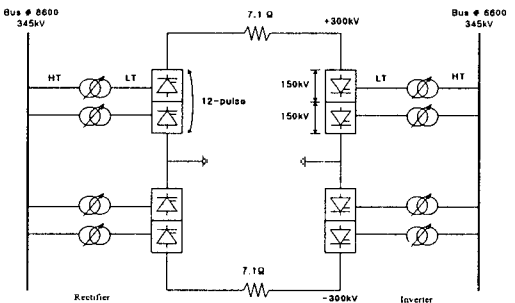


그림 3. 1000MVA급 신속전-서대구 직류계통

표 1 각 pole에 대한 기본 직류입력 데이터

파라미터	값	설명
I	1	직류선로 번호
MDC	1	전력(MW) 제어
RDC	4.08 Ohm	직류선로 저항
SETVL	-425.0MW	역변환기에서의 설정된 출력
VSCHD	285kV	역변환기에서의 설정된 전압
VCMOD	225 kV	이 전압 이하에서는, 전력제어모드에서 전류제어모드로 전환
RCOMP	0.0 Ohm	역변환기에서의 직류전압보상
DELTI	0.1 P.U.	순변환기와 역변환기사이의 직류전류 차이 설정값
METER	'1'	역변환기쪽에서 측정된 직류선로 손실
DCVMIN	0.0 kV	Non-zero VDCMIN is used only in GAMMA=const mode

표 2 조류계산에 입력되는 기본 직류입력 데이터II

정 수	설 명	순변환기	역변환기
IP	변환기 모선 번호	8600	6600
NR	브리지 개수	2	2
ALFMX/GAMMX	degrees	15	20
ALFMIN/GAMMIN	degrees	5	15
RC	변압기 저항, Ohm	0	0
XC	변압기 리액턴스, Ohm	3.94	3.94
EBAS	교류전압, kV	345	345
TR	변압비	0.38	0.38
TAP	탭 설정 위치	1.0	1.0
TMX	최대 탭 설정치	1.2	1.2
TMN	최소 탭 설정치	0.8	0.8
STP	탭 스텝치	0.00625	0.00625

2.3 상정사고 해석 및 단락전류 억제 효과

본 절에서는 설계된 신옥천-서대구 직류계통을 이용하여 송전용량 증대효과와 동서간의 전력유통에 대해서 정적 상정사고를 통하여 검토한다. 사용된 프로그램은 PSS/E이며 교류 상정사고 해석 모듈을 이용한다. 또한 직류계통에 의한 단락전류 억제효과를 비교한다.

2.3.1 정적 상정사고 해석

표 3은 2004년도 피크 부하를 기본 케이스로 하여 별도의 케이스를 만들어서 비교분석하였다. 상정사고는 n-1 상정사고를 345kV 선로에만 개방하는 것으로 발생시켜 조류계산이 수렴한 가, 과부하가 걸리는 가, 전압 문제가 없는 가를 분석하였다.

기본 케이스 CP01과 직류계통이 있는 CP02에 대한 n-1 상정사고 두 결과는 거의 비슷하였다. 두 개의 결과 모두 과부하 선로가 6개가 있었고, 1개의 조류계산 발생 경우가 있었다. 과부하는 A급 선로과부하를 나타낸다. 만약, B급과 C급 선로 과부하 기준을 적용하면 과부하에 걸린 선로는 없었다. 1개의 발생한 경우는 신김제(6450)-영광(7152) 선로 #2가 오픈인 경우 해가 존재하지 않았다.

케이스 CP03과 CP04는 서해안 지역과 경인지역의 발전량을 각각 500MW씩 감소하고 동해안 발전량을 증가한 경우다. 동해안 발전량 증가는 슬랙모선에서 감당하도록 하였다. 케이스 CP04는 케이스 CP02와 같이 직류시스템이 신옥천-서대구에 있는 경우를 상정한 경우다. 345kV 선로에 대한 n-1 선로 오픈 상정사고 해석 결과, 케이스 CP03의 과부하 선로 발생 사고는 8건, 수렴되지 않은 상정사고는 5건이 나왔다. 반면, 케이스 CP04에 의한 결과는 과부하 사고가 12개, 수렴되지 않은 사고가 7건이 발생하였다. 케이스 CP04의 결과가 더 열악하게 나왔지만 이것은 슬랙모선에 관련된 모선사고와 연관되어 있기 때문에, 케이스 CP04의 결과는 케이스 CP03과 결과가 유사하다고 볼 수 있겠다.

케이스 CP05과 CP06은 경인지역의 발전량을 1000MW 감소하고 동해안 발전량을 증가한 경우다. 동해안 발전량 증가는 울산 슬랙모선에서 감당하도록 하였다. 케이스 CP06은 케이스 CP02와 같이 직류시스템이 있는 경우이다. n-1상정사고 해석 결과, 케이스 CP05의 과부하 선로 발생사고는 11건, 수렴되지 않은 상정사고는 16건이 나왔다. 반면, 케이스 CP06에 의한 결과는 과부하 사고가 17개, 수렴되지 않은 사고가 11건이 발생하였다. 케이스 CP06의 결과가 케이스 CP05보다 과부하 측면에서는 더 열악하게 나왔지만 수렴된 경우는 더 양호하게 나왔다. 이것은 직류시스템을 도입하여 동해안 발전력을 유통하는 것이 정적 안정도를 향상시킨다는 것을 나타낸다.

표 3 상정 계통 케이스

Case	설 명	비 고
CP01	2004년도 Peak 계통 해석	기본 Case
CP02	2004년도 Peak 부하에 신옥천-서대구 1000MVA HVDC 추가 계통	HVDC 시스템 추가
CP03	CP01에 보령 C/C 5기 정지, 서인천 C/C 5기 정지 (서해안 및 경인지역 발전력 1000MW 감소)	동해안 발전기 군에서 출력 증강
CP04	CP02에 보령 C/C 5기 정지, 서인천 C/C 5기 정지 (서해안 및 경인지역 발전력 1000MW 감소)	동해안 발전기 군에서 출력 증강
CP05	CP01에 서인천 C/C 10기 정지, (경인지역 발전력 1000MW 감소)	동해안 발전기 군에서 출력 증강
CP06	CP02에 서인천 C/C 10기 정지, (경인지역 발전력 1000MW 감소)	동해안 발전기 군에서 출력 증강

2.3.2 단락전류 억제 효과 검토

직류계통은 단락전류를 억제하는 효과를 갖는다. 앞의 케이스 CP01과 CP02의 3상 단락전류를 검토하였다. 케이스 CP01의 신옥천(모선 6600) 모선의 3상 무효성분 단락전류는 38.2kA이고, CP02의 직류계통이 있는 경우 신옥천 모선의 3상 무효성분 단락전류는 35.8kA 였다. 약 3kA 정도의 차이를 보여 주지만 크게 차이가 나지 않는다. 이것은 기존 신옥천-서대구 345kV 교류선로의 임피던스가 다른 345kV 선로에 비해 크기 때문이다. 결과적으로 직류계통이 이 선로에 도입되는 경우 단락전류 억제효과는 크지 않다고 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 선로 이용률이 낮고 전압변동 문제가 발생할 가능성이 많은 신옥천-서대구 345kV 1회선 교류선로를 직류선로로 변환하였다. 변환된 직류시스템은 송전선로의 송전용량을 4배 이상 증대시키면서 서쪽지역과 동쪽지역의 전력유통을 향상시키는 역할을 하였다. 본 연구의 중요 공헌을 요약하면 아래와 같다.

- 가. 신옥천-서대구 345kV 1회선 교류선로의 직류변환을 위해서 양변환소에 1000MVA, 직류 ±300kV급 bipole 직류시스템을 설계하였다.
- 나. 설계된 1000MVA급 직류변환 시스템은 기설 송전선로의 송전용량을 증대하고, 동부 발전량을 증대시키고 서부 발전량을 감소시킬 수 있다.
- 다. 설계된 직류시스템은 동서의 전력유통에 의해서 정적안정도를 향상할 수 있는 가능성을 제시하였다.

설계된 PTP HVDC 시스템은 기설설비의 휴전기간을 줄이고 경제성을 높이기 위해서 BTB HVDC 시스템으로 변경가능 하며, 이것에 대한 효과는 본 논문의 결과와 크게 다르지 않을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] CIGRE Working Group, " Economic Assessment of HVDC Links", December, 2000
 [2] R.Jotten, J.P. Bowles, G.Liss, C.J.B. Martin and E.Rumpf, " Control in HVDC Systems, The State of the Art, Part I: Two Terminal Systems," CIGRE Paper 14-10, 1978
 [3] E.W.Kimbark, Direct Current Transmission, Vol.I, 1971, John Wiley and Sons, Inc., USA.
 [14] A. Ekstrom, G. Liss, "A Refined HVDC Control System" IEEE Transaction, Vol. PAS-89 May/June 1970 pp 723-732.