

기존 교류선로의 직류변환 송전방식에 있어서 선정기법에 관한 연구

김 동 준* 문영환 이동일* 윤재영 양광호
한국전기연구원, *한전전력연구원

A Study of Selection of Existing A.C. Transmission Facilities for Use with D.C.

D.J. Kim Y.H. Moon D.I. Lee* J.Y. Yoon K.H. Yang
KERI *KEPRI

Abstract - The paper describes a study of selection of existing a.c. Transmission facilities converted for use with d.c. system. In order to increasing the power transfer capability of existing a.c. transmission facilities, d.c. is one of good alternatives. Some advantages and disadvantages of this method are discussed, and the selection method of existing transmission facilities for use with d.c. considering economics and stability is presented in this paper.

1. 서 론

전력계통의 목적은 소비되는 부하요구량과 일정 수준의 안전도 수준에서 최소한의 비용으로 전력을 공급함에 있다. 현재, 국내 신규 송전선로 건설에는 선진국과 같이 환경문제가 주 문제로 등장하고 있으며, 많은 국가들은 환경 보호주의자들의 주장에 귀를 기울이고 있다. 이러한 문제점에 대해서 기존 교류선로를 직류변환 송전하여 송전용량을 증대하는 방법은 매우 효과적인 방법이 된다. 기존 교류선로의 직류변환 송전은, 단락전류저감 효과도 크지만, 궁극적으로 경제성을 바탕으로 한 기존 송전선로의 송전용량을 증대하는 것을 주목적으로 한다.

본 논문은, 먼저 교류선로 선정기법에서 고려되어야 할 기존 교류선로의 공칭 전압과 절연의 정도에 따라 직류전압 결정방법, 최대직류전력전송 능력 등등을 해명한다. 다음으로, 변환대상 교류선로 선정기법을 제시한다: 제안된 선정기법은, 먼저 안전도가 고려되지 않은 교직 시스템에 있어서 경제성을 평가하여 타당성을 검토한다. 다음으로, 경제성이 타당하면 안전도 해석을 통해서 최대직류 전력전송량을 재산출하고 경제성을 재평가하여 대상 교류선로를 선정하는 방법이다. 제안된 변환 교류선로 선정기법은 향후 연구에서 국내 사정에 맞게 알고리즘이 수정되어 345kV 교류선로를 대상으로 적용할 계획이다.

2. 본 론

2.1 교류송전시스템의 직류변환 송전

2.1.1 기본원리

변전소 밖의 교류 송전설비는 최대 열용량(Thermal Ratings)까지 부하가 걸리는 경우가 비교적 드물고, 직류 전력 송전에 비해 교류 전력설비는 송전용량이 낮다. 많은 경우, 특히 EHV에서, 코로나와 주파수 간섭 기준을 만족시키는 가장 경제적인 선로건설은 일반적으로 적은 수의 내부도체(Sub-conductors)를 갖는 선로에 있으며, 이 선로의 열용량은 교류송전 조건을 압도하고 있으므로 직류송전에서 충분히 이용할 수 있다.

이러한 사실은 어떠한 교류링크라도 직류로 사용되면, 그 도체는 열용량 한계까지(필요하다면) 독립적으로 동작할 수 있는 직류계통의 한 극을 형성할 수 있다. 설계 초기에 교류계통 요구치에 부합하기 위해 결정된 절연체는 대체로 교류전압의 최대치와 동등하거나, 혹은 강한 대기오염이 제한요소가 아니라면, 최대치를 초과하는 지

면에 대한 직류전압을 견딜 수 있다. 직류송전에서 지면을 귀로로 사용할 수 있다는 가능성은, 사고 시 최대전력능력을 고려할 때 나머지 하나의 극을 운전할 수 있다는 점에서 또 하나의 장점을 제공한다.

기존의 교류 전력설비의 직류변환 송전은, 의심할 바 없이 환경성 문제(Amenity Problem)들을 생각했을 때 이익이 되고 전력공급 안전성을 증대시킬 수 있다. 반면, 이러한 사실들은 선로 양단의 직류 변환소 건설을 포함한 완전한 경제성 분석을 바탕으로 하여 신중히 고려되어야 한다.

현재 기존 설비들의 전력송전능력을 증대하는 방법들이 지속적으로 연구되어 오고 있다. 장거리 교류선로의 직렬 또는 병렬 보상 콘덴서 장치가 초기에 적합하게 결정되었다면, 변환소에서 고조파 필터를 구성하도록 변경하는 동안 이 병렬 콘덴서 장치를 다시 사용할 수 있다. 기존 교류 스위치 장치는 변환소에서 설비차단을 위해서 다시 적용될 수 있다. 지면을 귀로로 하는 계획을 가지는 경우, 교류스위치 장치는 고속절체 장치로 사용될 수 있다.

2.1.2 변환송전의 단점

교류송전설비의 직류변환송전 이점에도 불구하고, 이러한 송전용량을 증대시키는 방법은 몇 가지 문제를 포함한다. 주요 문제점은 다음과 같다:

- (a) 직류로 변환될 설비는 오랜 기간동안 운전정지를 해야 한다. 이것은 변경 기간동안 전력공급 유지가 요구되어질 때 특히 중요한 방해요인으로 나타날 수 있다.
- (b) 많은 송전계통에서 선로중간에 부하선로와 연결되어 부하에 전력을 공급한다. 물론 이러한 전력공급은 유지되어야 하지만, 직류선로에서 중간에 전력을 인출하는 것은 비싼 비용을 요구한다. 그러므로 이러한 부하를 공급하는 대체방법이 강구되어야 한다.

2.1.3 도체의 배합

그림 1-(a)의 교류 1회선인 경우, 두 개의 상(Phase)은 쌍극 계통의 양극과 음극으로 사용될 수 있고, 세 번째 상은 여분으로 사용된다. 이러한 접근은 일반적으로 사용된 상으로부터 여분의 상으로 전환해주는 설비를 요구한다. 이 접근 방법이 갖는 다양성은 양극 시스템에서 하나의 상을 여분의 점지 귀로로 사용할 수 있고, 전도율을 증가시키거나 손실을 줄이기 위해 다른 극과 병렬로 사용되어지는 것이 가능하다는 것이다.

두 개 이상의 회로와 함께 사용하면, 전체적이거나 부분적인 직류변환에 대해서 많은 가능성을 갖는다. 예를 들어, 교류 2회선에 대한 전체적 변환이 필요하다면, 그림 1-(b)와 같이 하나, 둘, 혹은 세 개의 쌍극 직류회로는 6개의 상으로부터 구성되어질 수 있고 독립적으로 동작할 수 있다. 다른 한편으로는, 각 회선의 셋 상들은 직류계통의 양극과 음극을 형성하기 위해서 평행으로 동작할 수 있고, 따라서 최소의 송전 손실을 얻을 수 있다.

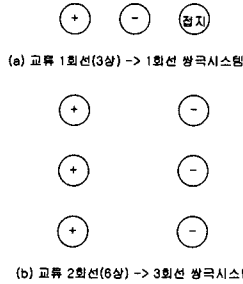


그림 1 교류선로를 직류선로로 변환

어떤 몇 가지 경우에서, 선로를 따라 탭핑 지점에 전력을 공급하기 위해 한 개의 교류회로를 유지하는 것이 더 이익이 될 수도 있다. 이는 합성 병렬 교류/직류 방법을 구성하여, 계통양단과 중간에 전력을 공급할 수 있게 한다. 홀수의 상이 (예로, 세 개의 회로와) 사용될 때, 홀수 상은 나머지 상 중 어떤 상이 사용될 수 없는 경우에, 여분으로 대신 사용될 수 있다. 여분 극이 가용되지 않으면, 극이 동작 정지 시 접지 귀로로 사용하여 송전용량을 최대화할 수 있다. 이러한 능력은 동일한 단락사고에서는 모든 3상 손실을 의미하는 교류에 해서는 본질적인 장점이다.

2.2 변환식 개선율

2.2.1 이론상 개선율

개선율(Improvement Factor, 이하 IF)은 다음과 같이 정의 된다:

$$IF = \frac{\text{최대 직류전력 송전량}}{\text{최대 교류전력 송전량}} \quad (1)$$

여기서, 극/상 전류는 최대 열용량에 대응하는 값을 가지며 단극의 직류전압은 접지에 대해서 교류 상 전압 (V_a)의 최대 순시치 값을 갖는다고 가정한다 ($V_d = \sqrt{2}V_a$). 이러한 가정과 더불어, 여분의 극이 사용되지 않고 도체가 고장인 경우 접지 귀로로 사용하는 장점이 있다고 가정하는 경우, 이론상의 IF 는 아래 표와 같다. 참고로, $IF=1.4$ 에 대한 계산은 부록에서 설명한다.

표 1 교류회선 수에 따른 개선율(IF)

교류 회선수	정상운전, IF	하나의 도체 고장, IF	비고
1 회선 (3상)	0.94	∞	
2 회선 (6상)	1.4	2.4	가장 경제적
3 회선 (9상)	1.3	1.9	

물론, 이 계산은, 선로의 전류가 교류나 직류나 똑같이 흐른다고 가정했기 때문에 교류 측면을 유리하게 해서 단순화 하여 구한 값이다. 일반적으로, 교류 송전용량은 선로의 열용량에 비해서 적다.

2.2.2 변환 적용 예

그림 2-(a)는 세 개의 구역과 B와 C의 중간지점에서 전력공급이 필요한 부하를 가진 3회선 330kV 송전계통을 보여준다. 지점 A에서의 발전은 역률이 높은 북쪽방향으로 약 430km 떨어진 D 지점에 중요부하에 전력을 공급한다. 상 도체 배열은 각 상마다 1,350A의 최대 열용량을 가진다. 선로 절연은 직류±300kV까지 사용하기에 적합하다. 교류 송전시스템의 전력송전용량은 안정도를 고려하여 약 800MW에서 제한된다.

대안 1은 최적적인 단계이며 부하 공급을 위해서 독립된 구성이 필요하다. 모든 3회선 330kV 교류회로는 변환 가능하여 ±300kV로 동작할 수 있는 직류쌍극 시스템의 극을 형성할 수 있다. 각 극을 구성하는 9개의 상은 4회선 직류 병렬 회로로 인해서, 약 5,400A의 정격 전류까지 사용할 수 있다. 이 같은 직렬/병렬 배열은 약

3,200MW급의 변환소를 설치할 수 있게 한다.

이 사실로써 송전탑 고장에 대해서 약 2,400MW의 안정된 용량을 가질 수 있고, 여분 극이 있기 때문에 단극 정지에 대해서 무시할 만한 전력감소를 갖는다. 직류/교류 IF 는 일반적으로 4이고, 송전탑 고장을 안전도 기준으로 채택했을 때는 3이 된다. 송전탑 고장인 경우, 병렬 상태에 있는 3개의 상 중에서 건전한 상들로 스위칭 되어 2개의 극을 형성한다. 접지 귀로는 임시적으로 사용될 수 있다.

그림 2-(c)는 대안 2로서, 현재 세 개의 AC 회로 중 오직 2회선만 변환된 것이고, 선로를 통해 작은 부하를 공급하기 위해 세 번째 회선은 그대로 유지한 것이다. 이 대안은 대안 1에 비해서 더욱 개선된 중간 단계가 될 수 있다. 결과적으로 합성 교류/직류 방법에 의한 전력 송전량은 점진적으로 약 2,500MW까지 공급 가능하고, 직류 변환소는 ±300kV 쌍극시스템으로 약 2,200MW를 공급하며 이 때 병렬의 세 개의 상으로 구성된 각 극은 약 4,000A의 전류 용량을 갖는다. 극 고장을 고려한 IF 는 2.4이고, 접지회로인 경우는 2.7이다.

그림 2-(b)는 변환 가능한 초기의 방법으로, 1,100MW의 용량을 초과하지만 변환소는 선로의 전류용량을 고려하여 부족용량으로 운전된다.

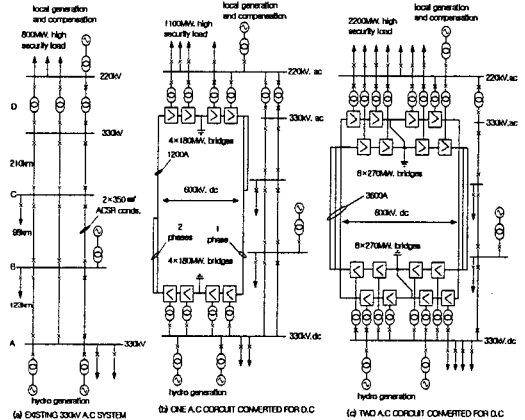


그림 2 변환 예제 계통

2.3 선정기법

용량증대를 위한 직류변환 대상 교류선로 선정기법을 요약해서 나타내면 그림 3과 같다. 선정기법에서 중요한 부분은 경제성 평가이다. 신규 교류송전선로를 건설하여 송전용량을 증대하는 데 들어가는 비용대신, 기존 교류선로를 직류선로로 이용하고 신규로 직류변환소를 건설하여 송전용량을 증대할 경우의 비용이 더 적게 들어가야 이 방법에 대한 실효성이 있게 된다. 경제성 평가에 대한 설명은 본 논문에서는 생략한다. 그림 3의 내용을 자세히 기술하면 아래와 같다:

단계 1-3: 345kV 2회선을 중심으로 송전선로의 과부하로 인하여 선로중설이 필요한지를 판단한다. 과도 안정도 문제를 해결하기 위해서나 발전지역으로부터 나가는 송전용량을 증대키 위해서 또 하나의 송전선로가 필요한지를 검토한다.

단계 4: 추가 송전선로 건설에 소요되는 교류선로건설 총비용을 계산한다. 이때, 새로운 송전탑, 선로, 변전소 건설을 모두 포함한 비용을 계산한다.

단계 5: 직류선로의 직류송전전압과 전류를 계산해서 최대직류전력송전용량을 산출한다. 직류전압결정은 보수적으로 345kV 단상전압의 피크치 ($\sqrt{2}V_{phase}$) 값으로 결정한다. 전류결정은 선로에 사용된 전선의 열용량 제한치 전류와 인근 발전지역의 발전

량을 고려해서 최대한으로 결정한다.

단계 6: 개선율(IF)을 계산한다.

단계 7: 직류계통을 건설하는데 소요되는 총비용을 계산한다. 이때, 송전선로의 건설비용은 제외한다.

단계 8-9: 직류건설 비용이, 교류건설비용*(IF-1.0)보다 적은가 결정하여 경제성이 있는가를 결정한다. 직류변환선로가 경제성을 갖기 위해서는 IF는 최소한 2이상이어야 한다. 안정도를 고려하지 않고 산정된 경제성 평가가 경제적인 경우는 단계 9로 내려간다. 만약, 안정도를 고려해서도 경제성이 있는 경우는 단계 10으로 간다. 경제성이 없는 선로이면, 단계 1로 가서 다시 시작한다.

단계 9: 과도 안정도와 전압안정도를 고려해서 IF를 재계산하고, 단계 8로 올라간다.

단계 10-11: 단락용량 감소치를 계산하고, 변환가능 교류선로에 대한 해석결과를 출력한다.

위 해석방법은 먼저 일차 경제성을 평가하여 직류시스템 비용이 교류송전선로 비용보다 적게 되는 경우를 판별한다. 다음으로, 안정도 관점에서 다시 최대직류전력 송전량을 결정하고 최종 경제성을 평가하여 교류선로를 선정하는 방법이다. 향후, 이 방법은 국내 사정에 맞게 수정되어 사용될 것이다. 아직 실 계통에 적용되지 않은 알고리즘이라서 적용 시 약간의 수정은 불가피 하다.

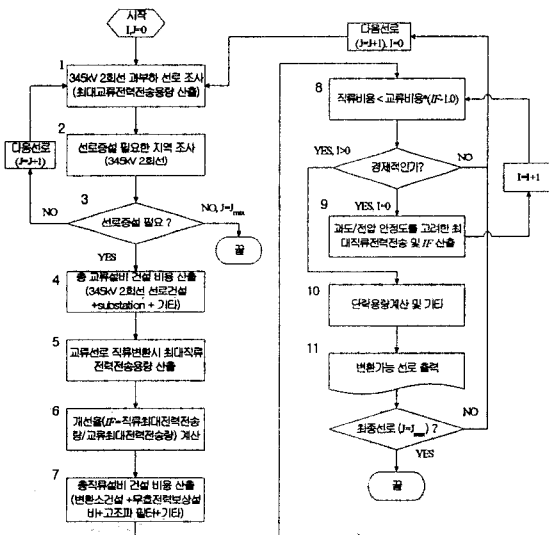


그림 3 직류변환가능 교류선로 선정기법 알고리즘

3. 결 론

본 논문은 기존 교류선로의 직류변환 송전방식에 있어서 중요하게 고려되어야 할 일반적인 사항을 기술하였고, 기본적인 교류선로 선정기법을 간략히 제시하였다. 제시된 교류선로 선정기법은 아직 계통에 적용되어 검증되지 않은 방법이나, 이 방법을 토대로 해서 국내사정에 맞도록 알고리즘을 수정하여 국내 교류선로 대상으로 적용할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.M.Jones, M.W.Kennedy, "Existing A.C. Transmission Facilities Converted for Use with D.C. Transmission," IEE Conf. Publ. 107 on "High voltage DC and/or AC power transmission", London 1973, pp.253-60
- [2] Kennedy M.W., "The conversion of ac bulk transmission systems for use with d.c.," IEE Conference Publication No. 22.
- [3] Dunn G.M, and Bergstron L.A., "Vancouver Island dc

Transmission", ASEA Journal Vol. 42, 1969. No 2-3, p. 17-28

[4] Dougherty J.J, and Caleca V, " The EEI ac/dc Transmission Model", PAS, Vol. 87, No.2, 1968. p.504

부 록

A. 교직 절연전압[A1]

A.1 최대 직류연속 유지전압

만약 현재의 기존 교류선로 절연길이를 사용할 경우, 직류연속유지전압(continuous-working withstand voltage)은 다음과 같이 생각할 수 있다:

$$k = \frac{DC \text{ withstand voltage}}{r.m.s AC \text{ withstand Voltage}} \quad (A.1)$$

외부환경 시험에 의한 결과는 공해에 의한 침전물 등이 절연체 한쪽 끝에 닿아 나쁜 영향을 주는 아주 나쁜 환경에 대해서는 k를 1로 둘 필요가 있다고 보고 한다. 그러나, 대기환경이 깨끗한 지역에서는, 이론상으로 k는 교류전류의 피크치인 $\sqrt{2}$ 배 만큼 해당된다.

A.2 최대 절연 전압

일반적으로 교류 송전선로는 실효치 운전 전압(rms normal voltage, 1.73E_p)에 대해서 4 배 이상의 과전압에 견딜 수 있도록 설계된다. 따라서, 교류 선로의 절연레벨을 정격 상전압 E_p(rated phase-to-earth voltage)에 대해서, 2.5 배정도의 절연이 되도록 설계된다.

$$k_1 = \frac{AC \text{ insulation level}}{\text{rated AC Voltage}(E_p)} = 2.5 \quad (A.2)$$

한편, 직류선로에 대해서는 직류전압(V_d)에 대해서 오직 1.7배의 절연내력만 필요하다:

$$k_2 = \frac{DC \text{ insulation level}}{\text{rated DC Voltage}(V_d)} = 1.7 \quad (A.3)$$

기존 교류선로에 대해서 교류와 직류에 대한 절연 비율은 다음과 같은 관련을 갖는다:

$$\text{insulation ratio} = \frac{k k_1 E_p}{k_2 V_d} \quad (A.4)$$

B. 기존 345kV 3상 2회선 교류선로를 직류 변환 송전하는 경우 IF

2회선 교류선로는 3회선 쌍극 시스템으로 변환 가능하다. 그리고 각각의 두 선로는 대지에 대해서 $\pm V_d$ 값을 갖는다:

$$\text{교류 송전 전력량} : P_a = 6E_p I_L$$

$$\text{직류 송전 전력량} : P_d = 6V_d I_d$$

똑같은 전류와 절연율(=1)을 갖는다면, 식 (A.4)에서 다음과 같이 구할 수 있다:

$$I_L = I_d \quad (B.1)$$

$$V_d = (k k_1 / k_2) E_p \quad (B.2)$$

따라서, 전력비는 다음과 같다:

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{V_d}{E_p} = (k k_1) / k_2 \quad (B.3)$$

앞에서, $k=1$, $k_1=2.5$, 그리고 $k_2=1.7$ 에 대한 IF는 1.47이 된다. 만약, 최대절연전압을 무시하고 연속유지전압에 대해서만 고려하면, $k=\sqrt{2}$, $k_1=1.0$, 그리고 $k_2=1.0$ 가 되어 IF=1.41이 된다. 여기서 주지할 것은 선로에 흐르는 직류전류와 교류전류가 같다고 가정했으나, 실제 교류선로에 흐를 수 있는 직류전류는 교류전류보다 훨씬 크다.

참고문헌

- [A1] Jos Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission, 2nd/ed, IEE, 1998