

### HVDC계통의 최대 송전전력

김찬기\*, 심응보\*, 정길조\*, 문익희\*\*  
 한전 전력연구원\*, 한국전력공사\*\*

### Maximum Power Transfer of HVDC

C.K.Kim\*, E.B.Shim\*, G.J.Jeong\*\*, I.H.Moon\*\*  
 KEPRI\*, KEPCO\*\*

**Abstract** - 본 논문은 HVDC 시스템의 최대 송전능력을 다루었다. HVDC 시스템은 AC 시스템과 연결되는 부분에서 DC출력의 60%정도의 무효 전력을 소비한다. 그러므로 상대적으로 약한 AC 시스템에 연결될 경우에는 전압 안정도(Voltage Stability)문제를 유발할 수 있다. 이러한 전압 안정도가 HVDC의 최대 송전 전력을 결정하는 주된 요인이다.

#### 1. 서 론

전력 계통의 최대 송전 전력을 논할 때 AC 계통에서는 다음과 같은 수식을 이용한다.

$$P_e = (V_s \times V_R) \cdot \sin \delta / X_s \quad (1)$$

식1에서 보여주는 수식은 유효 전력에 따른 최대 송전 전력을 보여 주고 있는 것으로써 송전 거리가 길어짐에 따라 계통에 임피던스에 의해서 생기는 전압 강하를 고려한다면 반드시 안정하다고 말할 수 없다. HVDC 시스템은 DC출력의 60%정도의 무효 전력을 소모하기 때문에 전압 안정도의 문제가 가장 중요한 문제가 된다. 이러한 점이 AC계통과 DC계통의 주된 차이로 볼 수 있다. HVDC의 전압 안정도는 AC계통의 전압 안정도와 유사하기 때문에 AC계통의 전압 안정도를 고찰한 후에 논하기로 하겠다.

#### 2. AC계통의 최대 송전 량과 전압 안정도

그림 1은 부하 점으로부터 등가 리액턴스를 통하여 멀리 있는 발전기로부터 전력이 전송되는 계통 시스템을 등가 적으로 표현한 것이다.(단, 등가 리액턴스에는 선로 커패시터 성분도 포함된 것으로 본다.)

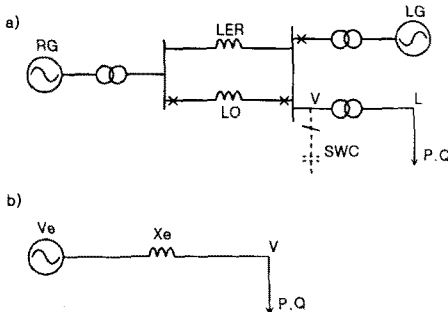


그림 1. 축약된 AC 송전 시스템과 테브난 등가 회로

이러한 시스템은 정전이나 단락 사고와 같은 현상이 없다면 정상 상태에서는 큰 문제를 유발하지 않고, 가변 부하 조건에서도 1(p.u)전압을 유지하는 것이 가능하다. 왜냐하면 Load Power Correction 커패시터가 존재하기 때문 부하 점의 발전기로부터 무효 전력이 충분한 공급되고 있기 때문이다. 전송 시스템은, 필요하다면

직렬 커패시턴스와 PSS를 사용하여, Remote와 Local의 발전기 사이의 동기화를 유지하기 위해서 적당한 정상 상태와 과도 상태 여유를 갖도록 설계되어진다. 그러나 시스템의 안전한 운전을 위해서는 정전이나 계통 선로의 고장을 고려해야 한다. 예를 들면 송전 선로의 한 선을 유지/보수하고 있는데 모든 시스템의 고장을 유발할 수 있는 고장이 발생한다면 남아 있는 송전선으로는 전력을 보낼 수 없는 상태가 되는 경우를 대비하여 시스템을 설계해야 한다. 전력 계통 망과 전원은 그림 1의 (b)와 같이 초기 전압원(Ve)과 등가 리액턴스(Xe)로 표현될 수 있다. 공급 점에서 전체 부하는 만약 직렬 커패턴스가 충분하다면 국부적인 발전기로부터 공급되는 무효 전력에 따라 역율이 1이나 지상으로 표현될 수 있다. 부하의 역율이 1인 경우에 대하여, 그림 2는 그림 1에서 한 선로의 고장에 대하여 각각 다른 전력량에 따른 부하 전압 V의 변동을 그래프로 나타내고 있다.

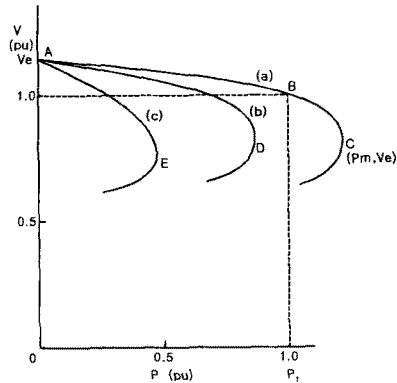


그림 2. 다른 동작 조건을 가진 AC 시스템의 P/V 특성 곡선

무부하에서 V는 Ve와 같고 일반적으로 1(p.u)보다는 크다. 부하가 증가함에 따라 등가 리액턴스에서 I<sup>2</sup>X의 무효 전력의 소비 때문에 부하 전압 V는 강하하고 전력 레벨 P1(p.u : 1.0)에서 동작한다. 근처에 발전기가 있다면 곡선 (a)의 B point에서 정격전력으로 운전하는 것은 어려운 문제가 아니다. 부하가 증가함에 따라 전압은 강하하고 전류는 증가하게 되는데 전압이 감소하는 비율보다 전류가 증가하는 비율이 높으면 전압은 안정하고 전압의 감소 비율보다 전류의 증가 비율이 높으면 전압은 불안정하게 된다. 전압의 증가 비율과 전류의 증가 비율이 같은 점을 최대 부하 점이라고 부를 수 있다. 최대 부하 점에 대한 수식은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{V_c^2}{2X_e} \text{ and } V_e = \frac{V_c}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

최대 부하 점은 V<sub>c</sub><sup>2</sup>/X<sub>e</sub>. 시스템의 단락 레벨(Short-

Circuit Level)과 관계가 있고 SCL에 대한 전력 비율을 단락비(Short Circuit Ratio)라 한다. 따라서 AC 시스템에 약할 경우에는 즉, 높은 리액턴스를 갖거나 낮은 SCR을 가진 경우에는 최대 전력 전송량이 작아진다. 극단적인 경우에 시스템은 임계 부하 점 C에서 동작할 수 있다. 그래서 정격전압( $V_c=1$ )에서 최대 허용 부하( $P_m=1$ )점에서 운전하게 된다. 만약 부하단에서 사고에 의한 부하 탈락이 일어나는 경우는  $V_e(A점)$ 가  $\sqrt{2}V_c$  또는  $\sqrt{2}(p.u)$ 가 되며 일시적인 과전압상태가 될 수 있다. 일반적으로 정격 동작 점은 C가 아니라 B이다. 완전한 전압-부하 관계는 다음과 같다.

$$\frac{V}{V_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_m}\right)^2} \right] \quad (3)$$

그림 2의 커브(b)는 근처 발전기가 사고로 탈락되는 경우 즉, 등가 리액턴스  $X_e$ 가 증가하는 경우가 발생했을 경우를 보여 주고 있으며 그림 1에서 부하의 역을 유지하기 위해서 빠른 스위치 동작으로 커패시터를 연결하면 곡선(b)의 D점에서  $P_m 0.89$ 는 실제의 부하 1(D점)보다는 작아진다. 이러한 상태는 전압이 붕괴될 수 있다는 점을 말해주며 많은 양의 커패시터를 연결함에도 불구하고 제어 가능하지 않은 Black Out 상태에 도달하게 된다. 만약 커패시터가 준비되지 않은 경우를 가정해 보면 실제 상황은 곡선(b)보다 더욱 악화된다. 근처의 발전기에서 공급하는 무효 전력은 선로로 공급된다. 그림 2의 (c)에서 보는 바와 같이 전압 강하는 더욱 커지고, 최대 공급 전력의 양은 더욱 작아지게 된다. 커브(c)는 선로에 부과되는  $0.9(p.u)$ 에 대한 관계를 보여 주고 있다.  $TAN \phi = Q/P$ 에 의해서 역률각을  $\phi$ 로 정의할 경우 임계점 E를 분석하면 다음과 같다.

$$P_m = \frac{V_c^2}{2X_c} \frac{(1 - \sin \phi)}{\cos \phi}, \quad V_c = \frac{V_e \sqrt{1 - \sin \phi}}{\sqrt{2} \cos \phi} \quad (4)$$

그림 2의 (c)에서 최대 전송 전력은 실제적인 전력 전송량의 50%밖에 안된다. 그래서 부하를 분산 하기 전에 전압 붕괴가 몇 초나 몇 밀리 초만에 일어날 수 있다.

### 3.AC 계통의 최대 송전량을 높이는 방법

고장 때문에 수반되는 부족한 부하 무효 전력을 만드는데 사용되어지는 커패시터의 응답은 충분히 빠르지 않기 때문에 사이리스터로 스위치 되는 Static VAR가 있어야 한다. 만약 직렬 커패시터를 추가하는데도 라인 리액턴스가 줄지 않는다면 그림 3에 보는 바와 같이 추가적인 선로를 달아 무효 전력 보상 장치들을 달아야 한다. 이러한 것은 송전용량을 증가시키는 좋은 점도 있으나 비용과 환경문제 때문에 추천할 만한 것은 못된다. Static VAR는 가격이 싸고 설치가 용의하며 GTO나 IGBT와 같은 강제 소호 능력이 있는 소자를 이용한 SVC의 개발은 커패시터의 필요성을 없게 만든다.

### 4. HVDC에서 무효 전력의 필요성

그림 4는 인버터를 통하여 AC 전력 계통망에 전력을 공급하는 기본 회로를 보여 주고 있다. 컨버터 브리지의 밸브를 게이팅하는 시간은 DC 전압과 전류 그리고 전력을 제어하는데 사용된다. AC측의 갑작스런 작은 전압 변동에 의한 전류실패를 막기 위해 인버터 게이팅 순간은 제어되어지고 그래서 최소  $\gamma$ 각은 대략  $15 \sim 18$ 도를 유지한다. 이러한 이유와 정류용 변압기의 중첩각 리액턴스  $X_{com}$ 의 영향 때문에 AC 상전류는 항상 상전압에 지연(lag)하고 인버터는 실제적으로 AC 시스템에 실효 전력을 공급함에도 불구하고 항상 무효 전력을 소비한다. 그러므로 DC/AC 인버터는 DC 출력  $P_d$ 가

Negative이며  $Q_i$ 가 통상 정격 부하에서  $P_d$ 의 50 ~ 60%를 소비하는 AC부하의 P, Q부하로 생각되어 질 수 있다.  $P_d$ 에 대한 관계식은 다음과 같다.

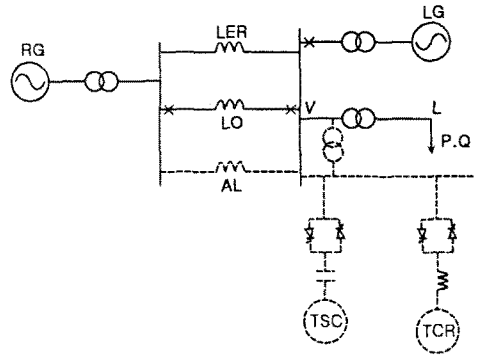


그림 3. AC 시스템에서 출력을 증가시키는 방법

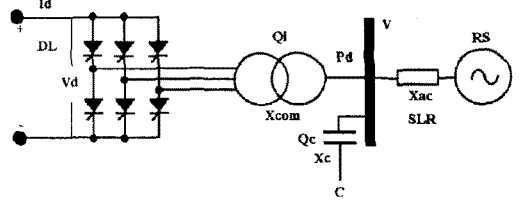


그림 4. HVDC 인버터 시스템의 기본 회로

$$Q_i = P_d \sqrt{\left[ \frac{(1 + 0.5X_{com}P_d)}{\cos \gamma} \right]^2 - 1} \quad (5)$$

정격 부하 상태에서 무효 전력의 대부분은 컨버터 버스바의 커패시터에 의해 공급되며 커패시터의 전압은 Per unit를 유지하고 있다. 시스템의 저항이 작기 때문에 리액턴스  $X_{ac}$ 에서의 주된 전압 강하는 무효 전력에 흐름에 의한 것이다. 커패시터  $X_c$ 에 대한 분석을 위해서  $X_{ac}$ 는  $X_e$ 에 포함될 수 있다. 다른 레벨  $P_d$ 와  $Q_i$ 에 대한 전압 조정에 대한 영향은 그림 2에서 나타난 V-P 관계와 유사하다.  $V_e$ 는 정격 인버터 부하에 대한 것이며, V- $P_d$  정상 상태 동작 점은  $1.0(p.u)$ 이다. (본 논문에서는  $X_{ac}=0.5$ ,  $X_c=1.75(C=0.57)$ ,  $X_e=0.7$ 값들은 그림 2의 Curve (a)와 유사한 파형을 갖게 하기 위해서 임의로 선택되었다.) SCR를 통하여 공급되는 DC출력에 비해서 상대적으로 AC 시스템의 강도를 나타내는 수식은 다음과 같다.

$$SCR = \frac{\text{Short-Circuit level, SCL(MVA)}}{\text{DC power, } P_d(\text{MW})}$$

$$= 1/X_{ac}$$

$$ESCR = \frac{SCL - Q_c}{P_d} = 1/X_e \quad (6)$$

직렬 커패시터 C는  $X_e$ 를 증가시키고 AC계통을 약하게 만든다. 최근의 IGBT나 GTO를 이용한 HVDC 시스템은 약한 AC계통에 대해서 동기조상기나 SVC없이 HVDC 컨버터의 동작을 안정하게 만든다.

### 5. HVDC 최대 송전용량과 최대전력 커브

그림 5는 DC전류(그림 2에서 표현된 AC 전압이 아닌)에 대한 DC출력의 비를 보여 주고 있다. 이것은 송전단 쪽에서 DC출력에 있어서 급격한 변화는 과도적으로 필요하고, 인버터가  $\gamma$ 모드에서 제어될 때 전류가 정류기에 의해서 제어되는 변수이기 때문이다. 초기 조건으로

는  $A_{ac}$ ,  $I_d$ ,  $P_d$ ,  $V_d$ 가 본 연구에서는 1(p.u)이며 SCL은 4.5로 가정한다. 또한 DC전류와 DC출력은 발전기의 AVR이나 변압기의 Tapchanger보다 빨리 동작하기 때문에 AC측 EMF 조건은 변하지 않는다는 가정 하에서 모의 해석된다. DC 출력 변동의 영향은 그림 5의  $P_d$ ,  $I_d$ 특성 곡선을 만들기 위해서 위에서 주어진  $Q_i$  관계를 이용해서 평가되어 질 수 있다. DC전류의 증가는  $Q$ 의 증가,  $V$ 와  $V_d$ 의 감소, 그리고 결과론적으로  $P_d$ 의 변동 ( $I_d$ 의 변동에 비해적으로는 작지만)으로 볼 수 있다. 어떤  $I_d$ 값 이상에서는, C점, 무효 전력, 그리고 AC 전압은 DC 전류의 증가보다 높은 비율로 감소한다. 그래서 전류의 증가에도 불구하고 출력은 감소하게 되는 것이다. 그림 5의 커브는 어느 일정값보다  $\gamma$  값이 더 작아지면 전류 실패를 일으킬 수 있기 때문에 인버터가 최소  $\gamma$ 에서 제어를 수행하고 있는 상태에 대한 것이다. 그러므로 실질적으로 이 커브 이상에서는 전력은 얻어질 수 없기 때문에 이 커브를 최대 출력 커브라 명명하게 된다. 물론  $\gamma$ 의 증가는 허용되어질 수 있고 전류 명령  $I_d$ 에 대해서 어떤 낮은  $P_d$ 값은 MPC 아래에서 얻어질 수 있다. 그림 5에서 C점은 DC 컨버터에서 낼 수 있는 최대 출력이다. C점 이전에서  $dI/dP$ 는 Positive이며 C점이 후에는  $dI/dP$ 는 Negative이기 때문에 C점이 후에는 페루프 정전력 모드에서는 안정한 동작이 이루어 질 수 없다. 최대 출력 커브와 최대 허용 출력은 등가 AC 시스템 리액턴스(SCR : SCR이 3.0은 강한 시스템이고 SCR이 2.0은 약한 시스템 그리고 SCR이 1.5이면 아주 약한 시스템으로 분류된다.)에 의해서 좌우된다. 모든 커브는  $P_d/I_d$ 가 1.0 Per Unit인 점을 지나도록 해야 한다. 절대 SCR 시스템 조건은 정격 부하 점이 그림 5의 MAP일 때 이다. 본 예제에서는 이것은 2.0이고 매우 약한 시스템에서는 일정  $\gamma$  제어 모드를 갖는 인버터 모드를 갖는 정상 DC 링크 동작은 정전력 모드에서는 안정하지 않고 단지 정전류 모드에서만 안정한 동작을 한다. 매우 약한 시스템에서 인버터의 안정한 운전은  $\gamma$ 를 제어할 경우에 가능하다. 전력 제어 모드에서 동작하기 위한 능력은, 근처의 유틸리티나 먼 거리의 발전기사이를 DC 링크로 연결하기 위한 이유중에 하나인, AC 시스템에서 주파수 동요를 억제하기 위해서 DC 링크를 이용하는 경우에는 유용하다.

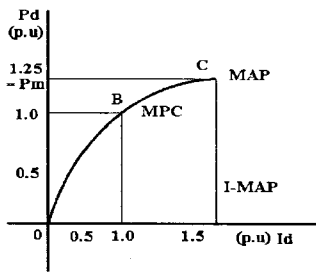


그림 5. DC 출력, DC 전류 그리고 최대 출력 커브

미래에 최대 허용전력을 높이는 방법은 컨버터 터미널에 SVC를 사용해야 한다. 이러한 SVC는 시스템 리액턴스를 줄이는 것 뿐만아니라 직접적으로 무효 전력을 제어할 수 있다. 그림 6에서 컨버터 터미널의 전압 변동은 3개의 SCR에 대하여 그런 것이다. 시스템을 디자인하는데 있어서 고려해야 하는 점중에 하나는 직렬 콘덴서가 아직 연결되지 않았는데 전체 DC 부하가 갑작스럽게 탈락하는 경우에 인버터 단에 일어날 수 있는 일시적인 과전압의 크기이다. 이것은 정류기 말단에서 주된 고장이나 외란일 수 있다. 만약 컨버터 정격이 시스템 강도에 비해서 커질 필요가 있다면, 만약 컨버터 정격이

작다면 일시적으로 높은 과전압이 생길 것이다. 예를 들어 이것은 SCR이 2.0이나 이 보다 약한 시스템에서 대략 0전류에서 1.4에 도달할 것이다. 높은 과도 무효 전력 소비능력이나 최근에 ZnO 써지 어레스터를 가진 SVC의 적용은 이러한 과전압을 줄이는데 필요하다. 1(p.f.)에서 1(p.u) 부하로 DC컨버터의 정격 운전은 그림 6에서 최대 허용 전력점에서 운전한다. 이때 임계 SCR을 관찰하는 것은 흥미 있는 일이다. 이것은 그림 2(b)의 AC 시스템과 비교해 볼 수 있다. AC송전에서 최대 부하 점에서 완전히 부하가 제거되면  $V_e$ 와 동일한 AC 시스템 부하 버스에서는 일시적인 과전압을 유발할 수 있다. 그리고  $V_c = V_e/\sqrt{2}$ 의 관계는  $V_e$ 가  $\sqrt{2}$  [p.u.]일 수 있다는 사실을 포함한다. AC송전의 경우에 일시적인 과전압 값은 그림 6의 SCR에 대한 DC인버터 터미널에 적용할 수 있는 값과 동일하다. 이러한 일시적인 과전압 레벨의 유사성은 AC 시스템이나 DC 시스템의 최대 허용 전력을 비교 가능하게 만들고 상대적으로 약한 계통에 적용되는 경우에는 더욱 두드러진다.

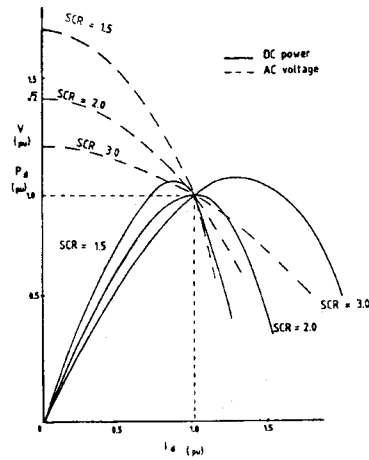


그림 6. 다른 단락 용량에 따른 AC전압과 DC 출력의 변화 특성

## 6. 결론

AC 시스템의 최대 허용 전력은 주로 AC 시스템 자체의 송전 파라미터에 의해 결정된다. SVC와 같은 무효 전력 보상장치가 없으면 언제나 계통 안정도와 전압 안정도가 깨진다. DC 전송의 경우에 대하여 비교해 보면 DC 시스템의 최대 허용 전력은 수전 단의 AC 시스템의 강도 뿐만 아니라 컨버터가 높은 전류 상태에서도 안정적으로 동작하게 만드는 컨버터에 의해서 결정된다. 최근에는 여러 가지 소자를 이용한 동기 조상기가 많이 사용되고 있다. 앞으로 위에서 논한 여러 설비를 AC 시스템에 추가하는 경우에는 시스템의 유연성과 최대 허용 전력이 늘어날 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] Kunder, "Power system stability and control", 1993.
- [2] 제주-해남 HVDC 매뉴얼, Alstom, U.K, 1993.
- [3] Kimbark, "DC Transmission", 1971, U.S.A
- [4] Ainsworth, "The influence of HVDC on AC Power system", Science and Technology, vol.44,no.1, 1977.