

# 제주지역 계통특성을 고려한 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템 운전 방안에 관한 연구

## A Study on the Operation Strategies of Multi-Infeed HVDC System in Jeju Island Power System

이 승 엽\* · 윤 민 한†  
(Seung-Yeup Lee · Min-Han Yoon)

**Abstract** - As recently the demand on electric power has been increasing, the requirement of power supply reliability has been increased. Accordingly, the number of HVDC transmission systems in the world has been steadily increased, which have been installed in the power system to transmit a large capacity power to the long distant and interconnect the power grid between different countries, etc.

#1 HVDC Transmission System was installed between Haenam and Jeju island in 1998, which is the first HVDC system furnished in Korea, and has been operated until now. Before #1 HVDC Transmission System being installed, the power system of the Jeju Island is a isolated power system from that of Korea mainland. After the construction of #1 HVDC the system has made the Jeju power system more reliable and also been able to supply the mainland power, which was cheaper than that of Jeju island, to Jeju island. The construction of additional HVDC transmission system between mainland and the Jeju Island has been currently underway to cope with recent changes of the power market of the Jeju island, for examples the increase of power demand and the capacity of wind power generation, etc.

#2 HVDC Transmission System construction was completed in 2012. #3 HVDC Transmission System will be also installed according to the plan.

If all goes as planned, the Jeju power system will be operated with Multi-Infeed HVDC system connected to mainland power system. So the additional studies are needed in order to maintain the stability of the Jeju power system and get the efficiency of the Multi-Infeed HVDC system. Therefore, in this paper, the optimal operation strategies of the Multi-Infeed HVDC system between the mainland of Korea and the Jeju are suggested to ensure the stability of the power system in Jeju Island when the Multi-Infeed HVDC system is operated between two power system.

**Key Words** : HVDC, Multi-infeed, Power System Stability, Power System Reliability

### 1. 서 론

세계 각국은 전력수요의 증가와 전력시장의 개방, 그리고 전력 공급 신뢰도 향상에 대한 요구의 증가 등으로 인하여 국가간 전력계통의 연계나 원거리 전력전송 등을 통한 전력공급의 원활화를 위하여 지속적인 노력을 기울이고 있다. 이러한 전력시장을 둘러싼 환경변화는 전력계통의 구성과 운영의 극대화에 대한 중요성을 더욱 높이고 있다.

지금까지의 전력전송은 기존의 AC계통과 그대로 연계하는 교류(AC)방식과 AC-DC 변환장치를 이용하여 AC와 DC의 상호 변환을 통하여 전력을 전송하는 직류(DC)방식으로 나눌 수 있다.

현재까지의 전력전송은 대부분 AC송전방식에 의해 이루어졌지만 근래에 와서 DC송전방식이 가지고 있는 장점과 대용량 전력전송 소자 및 관련기술의 개발로 인하여 장거리, 대용량 전력전송과 주파수가 상이한 전력계통간 연계 등을 위한 개소에 대하여 세계적으로 그 적용 사례가 늘어나고 있는 추세이다[1].

국내에서는 최초로 1998년 육지(해남)와 제주간에 #1 HVDC 송전시스템이 설치되었고 2012년 #2 HVDC가 진도와 서제주 간에 추가로 투입되어 현재까지 운전 중에 있다. 육지-제주 간 송전시스템의 운전은 그 이전까지 독립계통이었던 제주계통과 상대적으로 규모가 큰 육지계통과의 연계 운전을 가능하게 하였고 이로 인해 제주지역의 전력공급 신뢰도 향상시킬 수 있었다. 아울러 육지계통의 발전력으로 상대적으로 비싼 제주계통의 발전력을 대체함으로써 경제적인 효과 또한 달성할 수 있었다. 향후 계획대로 #3 HVDC 송전시스템이 추가 건설, 운전될 경우 육지계통과 제주계통의 연계운전을 통해 얻어지는 효과는 더 증가될 것으로 예상된다[2,3].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
Tongmyong University, Korea.  
E-mail: minhan.yoon@gmail.com

\* Korea Electric Power Corporation, Korea.

Received : August 7, 2017; Accepted : November 20, 2017

이와 같이 #2 HVDC 송전시스템 건설 후 #1 HVDC 송전시스템과 동시에 운전될 경우 육지계통과 제주계통은 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템을 통해 연계 운전하게 된다. 이렇게 될 경우 제주계통과 HVDC 송전시스템의 안정적 운전을 위해서는 다기 HVDC 송전시스템의 특성을 고려한 계통검토와 그 결과를 바탕으로 한 다기 HVDC 송전시스템을 구성하는 각 HVDC 시스템의 운전전략 수립의 필요성이 증가될 것이다[4]. #3 HVDC 송전시스템이 추가로 건설될 경우 제주계통은 육지계통과 역송까지 고려한 다기 HVDC 송전시스템에 통하여 연계운전하게 되며 이로 인해 제주계통의 전력공급신뢰도뿐만 아니라 경제적인 이득도 현재와 비교하여 증가될 것으로 예상된다[5]. 지금까지의 계획에 의하면 향후 추가될 #3 HVDC 송전시스템은 그 기본사양과 시스템 형식 등이 현재 운전중인 전류형 HVDC 송전시스템과 상이할 것으로 예상되며 이로 인해 각 HVDC 송전시스템별 운전조건도 제주계통의 여러 가지 여건에 따라 달라질 것으로 예상된다[6]. 또한 육지-제주 다기 HVDC 송전시스템의 운전 효과 증대 측면에서는 다기 HVDC 송전시스템을 통한 송전용량이 증가할수록 유리하겠지만 사고 등을 포함한 제주계통에 발생할 수 있는 문제를 고려할 경우 다기 HVDC 송전시스템을 통해 송전할 수 있는 송전한계량이 존재하게 된다[7]. 그렇기 때문에 다기 HVDC 송전시스템내 각 HVDC 송전시스템간의 상호작용과 제주계통의 특성 등에 의한 송전한계량이하의 HVDC 송전시스템의 최적 운전용량 산정이 필요하다[8].

따라서 본 논문에서는 향후 육지-제주 HVDC 시스템의 추가 건설과 미래 제주지역 전력계통 특성을 고려한 육지-제주간 다기 HVDC 시스템의 효율적인 운전방안 수립을 위한 각 HVDC 송전시스템의 최적운전용량 산정방안 설정 및 이를 통한 각 HVDC 송전시스템의 최적 운전용량을 제시하고자 한다.

## 2. HVDC 시스템 안정운영 지수

HVDC 송전시스템에서 컨버터는 AC↔DC 전력의 상호변환을 수행하는 핵심적인 부분으로 전력전자소자들로 구성되어 있다. 이러한 컨버터를 구성하는 전력전자 소자의 특성에 따라 HVDC 시스템은 전류형(LCC or CSC) HVDC와 전압형(VSC) HVDC로 구분할 수 있다. 그 중 전류형 HVDC는 전통적인 HVDC 송전시스템을 말하며, LCC-HVDC 또는 CSC-HVDC라고 표기한다. 전류형 HVDC 송전시스템은 주로 Thyristor 소자로 구성된 Valve를 사용하기 때문에 전류형 HVDC 송전시스템에 의한 교류전류는 항상 교류전압보다 위상이 뒤지게 된다. 이러한 특징으로 인하여 전류형 HVDC 송전시스템 운전시에는 반드시 무효전력의 소비가 일어나는 특징을 가지고 있다. 따라서 전류형 HVDC 시스템의 정상적인 운전을 위해서는 DC전력 송전량의 약 50%~60%에 해당하는 무효전력을 계통으로부터 공급받아야 한다. 이러한 무효전력 공급량은 DC전력 송전량이 커질수록 증가하게 되고 이는 HVDC 시스템과 연계되는 AC계통을 포함한 전체 계통에 악영향을 줄 수도 있다. 따라서 AC 필터, 병렬콘덴서, 동기조상기, FACTS 기기 등을 이용하여 전류형 HVDC 송전시스템 운전이 필

요한 무효전력 보상이 반드시 이뤄져야 한다[9].

### 2.1 SCR(Short Circuit Ratio), ESCR(Effective short Circuit Ratio)

HVDC 송전시스템에 의하여 계통이 연계될 경우 배후 AC계통의 강건도가 HVDC 송전시스템 운전에 영향을 미치게 된다. 특히 전류형 HVDC의 경우 정류실패(Commutation Failure)에 대한 문제를 항상 고려해야 하기 때문에 이는 배후 AC 계통의 강건도와 밀접한 관련이 있다. 배후AC계통의 강건도는 계통의 테브난 등가 임피던스에 의해 결정되기 때문에 만약 테브난 등가임피던스가 크면 과도상태에서 계통 안정도에 문제를 일으킬 수 있다. 이와 같이 AC계통의 강건도는 HVDC 송전용량 대비 AC계통고장용량의 비율인 SCR(Short Circuit Ratio)로서 나타난다. 이 파라미터는 컨버터가 연결될 지점에서의 고장용량 식(1)과 HVDC 운전용량의 비로 나타내며 식 (2)와 같이 계산된다. 전체 계통의 안정도 확보 측면에서는 HVDC 송전시스템이 연계되는 AC계통의 두 파라미터가 클수록 유리하며 기준치보다 작을 경우 전체 전력계통의 안정적 운전을 위해 추가적인 계통보강이 필요하게 된다 [10].

$$SCC = \frac{V_{ac}^2}{Z_{ac}} \tag{1}$$

$$SCR = \frac{SCC}{P_{dc}} \tag{2}$$

$$ESCR = \frac{SCC - Q_C}{P_{dc}} \tag{3}$$

여기서,

- $V_{ac}$  : 컨버터 접속 모선 전압
- $Z_{ac}$  : 컨버터 접속 모선 등가임피던스
- $P_{dc}$  : HVDC시스템 송수전전력 (DC Power)
- $Q_C$  : HVDC시스템이 연계되는 AC Bus에 접속된 캐패시터, 필터 등의 용량

특히, ESCR(Effective short Circuit Ratio)은 HVDC AC 시스템에 추가되는 캐패시터나 필터의 영향을 고려하기 위한 파라미터로서 캐패시터나 필터의 용량을  $Q_C$ 라 하고 이것을 테브난 등가임피던스에 포함시켜 식 (3)과 같이 계산하며 그 값은 SCR 보다 감소하게 된다.

여러 기의 HVDC 송전시스템이 동일한 AC계통에 연계되어 동시에 운전되는 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템의 ESCR은 각 HVDC 시스템 상호간의 영향을 고려해야 하며 이를 위해 단독(Single-Infeed) HVDC 시스템의 ESCR에 대응하는 MIESCR (Multi-infeed Effective Short Circuit Ratio)을 계산하여 적용한다.

### 2.2 유효관성정수 ( $H_{dc}$ )

유효관성정수(Effective Inertia Constant,  $H_{dc}$ )는 AC계통의 회

전관성에 의해 전력계통의 주파수를 유지할 수 있는 능력을 말한다.

IEEE Standard 1204-1997에 따르면 HVDC 송전시스템의 안정적인 운전을 위해서 유효관성정수가 2.0 이상일 것을 요구한다. 일반적으로 계통의 주파수 감소를 야기할 수 있는 상황으로는 다음과 같은 경우들이 있을 수 있다.[10]

- HVDC 송전시스템 전류 실패 (Commutation failure)  
(MIIF가 0.6 이상인 모션 간에는 동시적인 전류 실패를 고려)
- HVDC 송전시스템 송전단 또는 수전단의 사고
- HVDC 송전 선로 사고

유효관성정수( $H_{dc}$ )가 “2” 이상이라는 의미는 가장 가혹한 상황의 계통 사고로 HVDC 시스템만으로 계통에 전력을 공급하다가 모두 탈락한 후 0.2초 후에 계통사고에서 복구될 때, 주파수 변동을 5% 이내로 유지하고 싶을 때의 수치이다. 아래의 식 (4)와 식 (5)는 주파수변화와 관성정수와의 관계를 나타낸 것이다.

$$df = \frac{(P_m - P_e) \cdot f_0 \cdot dt}{2 \cdot H} \quad (4)$$

또는,

$$H = \frac{(P_m - P_e) \cdot f_0 \cdot dt}{2 \cdot df} \quad (5)$$

여기서,

- $f_0$  : 정격주파수
- $df$  : 주파수 변화량
- $H$  : 발전기의 관성정수
- $P_m$  : 발전기 기계적 입력
- $P_e$  : 발전기 전기적 출력

위의 식에서 관성정수(H)를 DC power 을 기준으로 나타낸 것을 유효관성정수( $H_{dc}$ )라고 하며 일반적으로 HVDC 송전시스템 및 계통의 안정도를 고려하여 권장되는 유효관성정수의 값인 2.0은 다음의 식 (6)에 의하여 계산된다.

$$H_{dc} = H \cdot \frac{\text{Rating of the Machine [MVA]}}{\text{Rating of the DC System [MW]}} \quad (6)$$

### 3. 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템 안정운영 지수

앞서 설명했듯이 전력시장 개방의 확산과 함께 전력계통의 신뢰도 확보와 전력조류 제어의 필요성이 과거 어느 때보다 높아지고 있다. 이로 인해 세계적으로 HVDC 송전시스템에 대한 적용 사례도 증가하는 추세이다. 이러한 HVDC 송전시스템의 지속적인 증가로 인하여 동일한 AC계통내 2개 이상의 HVDC 송전시스템이 동일한 지역에 적용되는 사례가 늘고 있다. 이와 같이 계통에 적용되는 HVDC 송전시스템이 동일한 AC계통의 변전소 모선에

연결되거나 연계되는 지점간의 전기적인 거리가 근접하는 사례가 발생하게 된다. 이와 같은 2기 이상의 HVDC 송전시스템을 다기 HVDC 송전시스템이라고 말한다. 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템의 정상적인 운전을 위해서는 단독(Single-Infeed) HVDC 시스템과 달리 배후 AC계통과의 상호작용뿐만 아니라 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템을 구성하는 각 HVDC 송전시스템간의 상호작용에 대한 검토도 필요하다. 이러한 특징으로 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템에 대한 계통 검토시는 배후 AC계통과 각각의 HVDC 송전시스템 상호간의 영향을 고려하기 위해 단독(Single-Infeed) HVDC 시스템 검토시 적용되는 기존의 파라미터외에 별도의 파라미터들에 대한 검토가 필요하다[11].

#### 3.1 MIIF(Multi-infeed Interaction Factor)

MIIF(Multi-infeed Interaction Factor)는 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템을 구성하는 각각의 HVDC 송전시스템이 접속된 두 개의 AC Bus간의 상호작용의 정도를 예측하기 위한 파라미터이다. 두 개의 HVDC 송전시스템이 동일한 AC계통에 적용될 경우 Converter 1에서 Converter 2로의 MIIF는  $MIIF_{2,1}$ 로 표시하고 식 (7)과 같이 계산한다[12].

$$MIIF_{2,1} = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \quad (7)$$

다시 말해서  $MIIF_{2,1}$ 는 Converter 1의 전압 강하에 대한 Converter 2의 전압강하의 비를 나타내기 때문에 MIIF의 값이 “1”이라면 Converter가 접속되는 두 AC Bus는 동일한 Bus이고 “0”이라면 각각의 Converter가 접속되는 두 AC Bus가 무한히 멀리 떨어져 있는 Bus를 의미한다. MIIF 파라미터는 다기(Multi-infeed) HVDC 송전시스템에서의 ESCR을 계산하는 기본적인 요소로 쓰인다.

#### 3.2 MIESCR(Multi-infeed Effective Short Circuit Ratio)

MIESCR은 단독(Single-Infeed) HVDC 시스템의 ESCR과 같이 다기(Multi-infeed) HVDC 시스템에서 배후 AC계통의 강건도를 나타내는 파라미터이다. 일반적으로 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템의 MIESCR이 3보다 크면 HVDC 송전시스템이 강한 AC계통과, 2보다 작다면 약한 AC계통과 연계된 것으로 간주하며 통상적으로 계통의 안정도측면을 고려하여 MIESCR은 최소 2.5가 될 것을 권장하고 있다[10].

1기의 HVDC 시스템이 AC계통의 Bus i 에 접속되어 있을 때 이 HVDC 시스템의 MIESCR을  $MIESCR_i$  라 하고 이것은 식 (8)과 같이 계산된다.[12]

$$MIESCR_i = \frac{SCC_i - Q_{c_i}}{P_{dc_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (MIIF_{j,i}) \times P_{dc_j}} \quad (8)$$

여기서,

- $SCC_i$  : HVDC가 접속된 Bus\_i의 고장용량
- $Q_{C_i}$  : Bus\_i에 접속된 캐패시터, 필터의 용량
- $P_{dc_i}$  : Bus\_i에 접속된 HVDC 송수전용량(DC power)
- $P_{dc_j}$  : Bus\_i이외 Bus에 접속된 HVDC의 송수전용량 (DC Power)
- $MIIF_{j,i}$  : HVDC\_i에서 HVDC\_j로의 MIIF

#### 4. 다기 HVDC 안정 운전점 추정 방안

##### 4.1 기존 1기(Single-infeed) HVDC시스템 운전방식

제주지역에 대한 전체 전력공급량에서 #1 HVDC 송전시스템에 의한 전력공급량이 차지하는 비중은 #2 HVDC가 운전하기 전 평균 약 30%정도를 차지하고 있었다. 또한 #1 HVDC 송전시스템의 운전용량은 제주지역 전체발전설비용량에서 차지하는 비중이 2011년도 기준으로 약 26% 정도로서 제주지역 전체 전력계통에서 #1 HVDC 송전시스템이 차지하는 비중이 작지 않다. 이로 인하여 #1 HVDC 송전시스템이 운전 중 여러 요인에 의하여 운전이 정지될 경우 전체 제주계통의 안정도에 영향을 줄 가능성이 크다. 이러한 점 때문에 제주계통에 대한 총 전력공급량 중 #1 HVDC 송전시스템을 통한 전력 공급량에 대하여 제약조건을 설정하고 시스템을 운전하고 있다.

이러한 제약조건은 정상상태에서의 #1 HVDC 송전시스템을 통한 전력 공급량을 제주지역 총 전력수요의 50%와 150[MW] 중 적은 값으로 제한하고 있다. 이러한 제약조건을 식으로 나타내면 다음식과 같다.

$$P_{HVDC} = \min [150MW, 0.5 * P_{제주부하}] \tag{9}$$

이는 운전중 #1 HVDC 송전시스템 고장으로 인한 제주계통에 대한 영향을 최소화하기 위한 것으로서 동기조상기 운전제약 등과 같은 제주계통 운영환경 변경시에도 HVDC 송전시스템을 통한 공급전력을 조정하고 있다. 정상상태에서 #1 HVDC 시스템은 정주파수 모드로 운전하고 있다.

##### 4.2 다기(Multi-infeed) HVDC 시스템 운전점 추정 알고리즘

본 논문에서 적용한 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템내 각 HVDC 송전시스템의 최적운전용량은 그림 1의 알고리즘을 이용하여 산정되었다. 이것은 먼저 제주지역의 부하상황에 따른 최소발전기 제약 Case를 구분하고 각 Case별로 안정운전제약 조건인 MIESCR과 유효관성 정수에 대한 각각의 기준치 만족여부를 검토하여 이들 제약조건 둘 다를 만족하는 경우 #1, #2 HVDC 송전시스템 각각의 운전용량을 산정하는 알고리즘이다.

다기 HVDC 시스템내 각각의 HVDC 송전시스템별 운전용량은 각 HVDC 송전시스템별 수전단(Inverter측) 모선의 MIESCR치를 최소화 시키는 최적화 기법을 이용하였다. 이는 필터 동작 등으로 인해 HVDC 송전시스템의 운전용량 대비 MIESCR 수치가 비

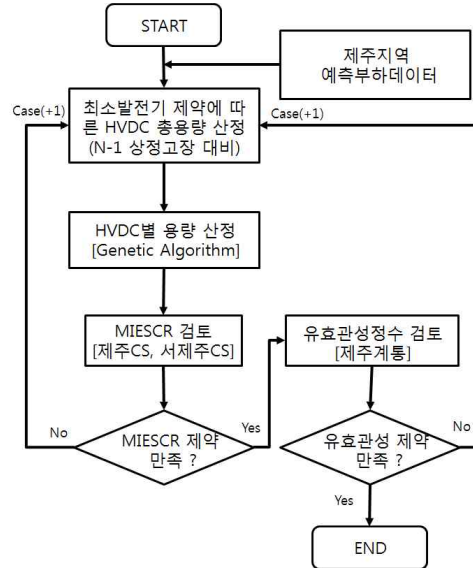


그림 1 다기 HVDC 최적 운전용량 산정 알고리즘

Fig. 1 Optimal operation point tracking algorithm of multi-infeed HVDC systems

선형적인 함수관계를 갖기 때문에 최적화 기법 중 하나인 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하여 각 HVDC 송전시스템별 최적의 운전용량을 산정하였다.

유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 자연선택과 유전법칙에 따라 이뤄진 생태계의 진화과정을 모방한 확률적 최적해 탐색 기법이다. 생태계 진화과정은 주어진 환경에 잘 적응한 개체는 살아남아 후손을 남기고 그 후손은 우수한 유전자를 물려받아 다시 환경에 적응하고 반대로 환경에 적응하지 못한 개체는 도태되는 과정으로 이뤄진다. 이러한 과정이 몇 차례 반복되면서 결국 주어진 환경에 가장 적합한 개체만 살아남게 된다. 이러한 개념을 적용한 유전알고리즘은 우선 최적화하려는 해들의 여러 조합을 통해 만들어진 다수의 개체들로 이뤄진 모집단(Population)과 각 개체들에 대하여 최적화의 목적에 대한 적합도를 평가하기 위한 적응도 함수(Fitness function)를 설정하게 된다. 이렇게 설정된 모집단의 각 개체들에 대하여 적응도 함수를 통하여 각각의 적응도가 평가되고 이를 기준으로 다음세대로 유전되는 개체가 선택된다. 이렇게 선택된 개체들에 대한 적응도 평가가 반복적으로 이뤄지면서 보다 더 적응도가 높은 새로운 개체가 생기는 과정이 반복되면서 최종적으로 적응도가 가장 높은 개체, 즉 최적해를 찾아내는 과정으로 이뤄져 있다[13].

본 논문에서 적용된 유전알고리즘의 설정치 및 관계식은 다음과 같으며, 컨버터 스테이션 접속 모선의 MIESCR 마진을 균등하게 최적화하는 목적함수를 설정하였다.

- 변수 :  $P_{HVDC1}, P_{HVDC2}$
- 목적 함수 : 
$$\min |MIESCR_{제주CS} - MIESCR_{서제주CS}| \tag{10}$$
- 제약 조건 :

$$P_{HVDC1} + P_{HVDC2} = 400$$

$$MIESCR_{제주CS} \geq 2.5$$

$$MIESCR_{서제주CS} \geq 2.5$$

$$30 \leq P_{HVDC1} \leq 150$$

$$40 \leq P_{HVDC2} \leq 400$$

### 5. 사례연구

#### 5.1 사례연구 조건

#2 HVDC 송전시스템이 투입된 이후 육지와 제주계통은 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템에 의한 연계운전이 이뤄지기 때문에 다기 HVDC 시스템의 운전은 기존의 고정적인 운전방안이 아니라 제주지역의 부하상황과 공급신뢰도, 그리고 계통안정도 등을 고려한 새로운 운전방안의 수립이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 현재 운전 중인 #1 및 #2 HVDC 송전시스템의 기지(既知) 사양을 반영하여 육지-제주간 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템의 최적 운전방안 산정을 위한 연구를 진행하였다. 또한 사례연구의 대상인 일일 부하 예측 데이터의 경우는 그림 1과 같이 제주지역 전력수급 실적 중 최대부하가 발생한 하계부하 데이터와 최저 부하가 발생한 추계부하 데이터, 그리고 일간 부하 레벨의 분산이 가장 적은 동계부하 데이터 세 가지 경우를 이용하여 시뮬레이션을 위한 일일부하를 산출하였다[14].

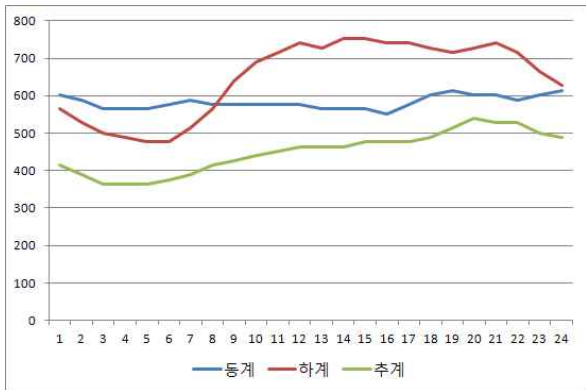


그림 2 제주지역 부하예측 데이터 그래프  
 Fig. 2 Estimated load curve of Jeju island power system

또한 제주지역 전력계통의 전력공급 신뢰도 확보를 위하여 HVDC 송전시스템 사고시도 전력계통 운영에 문제가 없도록 여유용량을 가지고 운전해야만 한다. 이때의 여유용량 산정은 N-1 계통신뢰도 기준을 적용하여 제주계통의 발전력 중 가장 큰 발전력인 #1 HVDC Bipolar 정지를 고려하여야 한다. 보통의 Bipolar HVDC 송전시스템과 달리 #1 HVDC 송전시스템의 경우 Bipolar 시스템 정지를 하나의 N-1사고 케이스로 취급하는 이유는 #1 HVDC 시스템 특성상 DC라인의 Busbar 사고시 두 폴(pole)이

동시에 운전을 멈출 수 있기 때문이다. 따라서 #1 HVDC와 #2 HVDC 시스템이 동시에 운전될 경우 HVDC 송전시스템에 의한 총 운전가능용량인 700[MW] 중 #1 HVDC 시스템의 Bipolar고장을 대비하여 #1 HVDC의 운전용량인 300[MW]를 사고대비 여유용량으로 고려해 운전할 경우 두 HVDC 송전시스템의 한계운전용량은 400[MW]가 된다.

결론적으로 N-1계통신뢰도 기준에 의한 전체 HVDC 송전시스템의 한계운전용량은 아래와 같으며 이 한계용량은 육지-제주 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템의 적정운전용량 산정을 위한 하나의 제약조건이 된다.

HVDC 총 용량	700	MW
여유 마진	300	MW
-----		
HVDC 최대 운전용량 ≤	400	MW

\*) 400 MW : #1 HVDC + #2 HVDC

HVDC 시스템의 안정운전을 위해서는 앞에서 언급한 N-1신뢰도 기준을 고려한 여유용량 확보와 함께 제4장에서 설명한 MIESCR과 유효관성정수에 대한 기준치 또한 만족하여야 한다. 따라서 이 두 파라미터의 기준치는 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템의 안정운전을 위한 또 다른 제약조건이 된다. 이 두 파라미터에 대한 제약조건의 만족여부를 검토를 위해서 제주계통 내 발전기 운전 시나리오별 각 HVDC 송전시스템의 변환소 모선의 단락용량과 제주계통의 AC 관성값을 알아야만 한다.

#### 5.2 사례연구 결과

먼저 각 구간별 HVDC 송전시스템의 운전용량 산정을 위해 N-1 계통신뢰도 확보 용량을 HVDC 운전용량 제한치로 하여 발전기 운전 시나리오 별로 최소발전기 제약을 검토하였다. 그 결과 표 1과 같이 Case1이 MIESCR 안정도 제약조건을 만족하지 못했다.

표 1 2기 HVDC 시스템 발전기 운전 시나리오별 안정운영 지수 검토

Table 1 Stable HVDC operation estimation based on generation scenario

발전기	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
#1 HVDC	150	150	150	150	150	150
#2 HVDC	250	250	250	250	250	250
Total	400	400	400	400	400	400
MIESCR						
제주 CS	2.70	3.02	3.38	5.01	6.18	7.97
서제주 CS	<b>2.31</b>	2.51	2.70	3.94	4.62	6.02
유효관성정수(H <sub>ac</sub> )						
제주지역	2.57	3.32	4.08	6.00	7.31	8.62

다시 말해서 Case1의 발전기 운전 시나리오의 경우 N-1 계통 신뢰도 확보를 고려한 HVDC 송전시스템 운전용량인 400MW에 대해서 안정하지 못한 결과가 나왔다. 그렇기 때문에 Case1의 발전기 운전시나리오에서는 HVDC 송전시스템의 최대 안정운전용량을 추가 검토하였다.

본 논문에서는 MIESCR 제약조건을 만족하는 최대 운전용량을 산정하기 위하여 HVDC 송전시스템의 운전용량을 10MW씩 조절한다고 가정하고 400MW부터 순차적으로 모의한 결과, 370MW의 HVDC 시스템 운전용량까지 안정한 결과를 얻을 수 있었다. 그 결과는 그림 3과 같다. 또한 HVDC 송전시스템의 안정운전 제약 조건 중 하나의 계통 유효관성정수에 대해서는 그림 4와 같이 모든 발전기 운전 시나리오에 대하여 안정운전 기준을 만족하였다.

이 결과를 바탕으로 하계, 주계, 동계 각각의 일간 부하 변화 예측치에 대한 HVDC 최적 운전용량을 모의한 결과 그림 5, 6, 7과 같았다. HVDC의 최적 운전점은 그림 1의 순서도에 따라 수식 (10)에 나타낸 바와 같이 각 컨버터 스테이션 접속 모선의 MIESCR 마진을 최대로 유지할 수 있도록 유전알고리즘에 의한 결과값을 산출하였다.

그림 5, 7의 하계와 동계 부하 시나리오의 경우 최소발전기 제약에 의한 HVDC 운전용량 감소가 거의 일어나지 않았으나 추계 부하 시에는 최소발전기 제약에 의한 HVDC 운전용량 감소가 일어났으며 각 HVDC의 MIESCR 값을 최대로 하는 운전량은 그

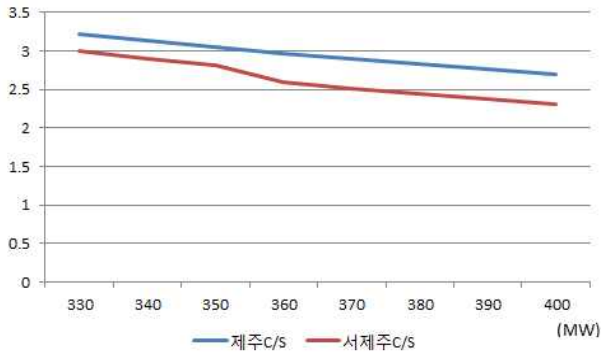


그림 3 Case1 발전기 운전 시나리오 MIESCR 검토  
Fig. 3 MIESCR analysis based on Case 1 scenario

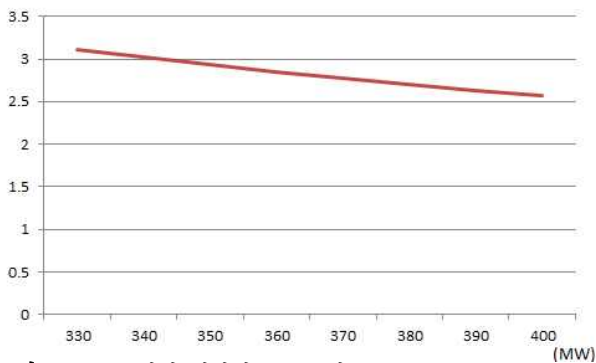


그림 4 Case1 발전 시나리오 H<sub>dc</sub> 검토  
Fig. 4 H<sub>dc</sub> analysis based on Case 1 scenario

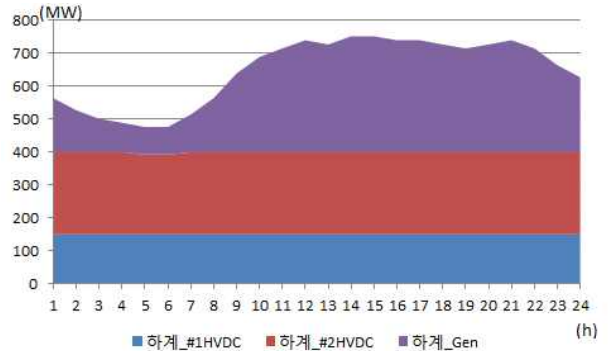


그림 5 2기 HVDC 시스템 하계 부하 시나리오 운영방안  
Fig. 5 HVDC operation point on summer load scenario

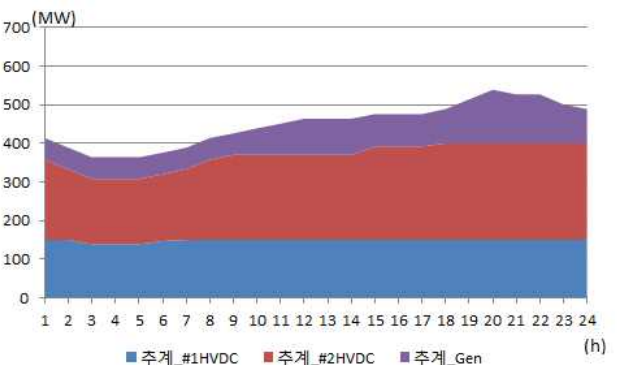


그림 6 2기 HVDC 시스템 추계 부하 시나리오 운영방안  
Fig. 6 HVDC operation point on spring/fall load scenario

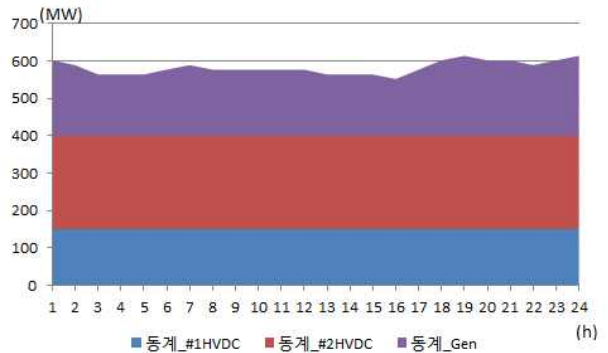


그림 7 2기 HVDC 시스템 동계 부하 시나리오 운영방안  
Fig. 7 HVDC operation point on winter load scenario

림 6과 같다.

## 6. 결 론

현재 육지-제주간 #2 HVDC 송전시스템이 건설된 이후 육지와 제주계통이 2기의 HVDC 송전시스템을 통하여 연계 운전하고 있다. 따라서 본 논문에서는 2기 이상의 상이한 사양의 HVDC



송전시스템으로 구성된 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템에 의한 연계운전 상황을 상정하고 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전 시스템의 효율적인 운용을 위한 최적운전용량 산정방안을 검토하였으며 이것을 통하여 최적운전용량 산정 알고리즘을 제시하였다. 또한 미래 제주계통의 부하예측치에 대하여 산정 알고리즘을 이용하여 각 HVDC 송전시스템에 대한 최적 운전용량을 제시하였다.

먼저 제주지역에 대한 전력공급 신뢰도 기준과 제주계통 및 HVDC 송전시스템의 안정운전 제약조건인 MIESCR과 계통 유효 관성정수 기준을 가지고 제주지역 발전기 운전케이스별로 HVDC 송전시스템의 안정운전 한계용량을 산정하였고, 이를 바탕으로 다기(Multi-Infeed) HVDC 시스템을 구성하는 각 HVDC 시스템별 최적운전용량 산정을 위하여 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한 최적운전용량 산정을 위한 알고리즘을 제시하였고 이 알고리즘을 이용하여 계절별 제주지역 부하예측상황에 대하여 다기(Multi-Infeed) HVDC 송전시스템의 안정운전 제약조건을 만족하는 각 HVDC 송전시스템별 운전용량을 산출하였다.

향후 이 결과를 바탕으로 제주계통의 안정도 개선과 제주지역 내 각 발전기의 기동 및 정지 특성을 고려한 HVDC 송전시스템의 운전용량 변화 등에 관한 경제성 평가를 수행할 예정이며 이를 통하여 보다 경제적인 다기 HVDC 송전시스템의 최적운전방안을 검토할 계획이다. 또한 이를 바탕으로 육지-제주 다기(Multi-Infeed)HVDC 송전시스템과 이와 관련된 계통의 운영방안 검토에 활용할 계획이다.

**감사의 글**

본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(NRF-2017R1C1B5018073)

**References**

[1] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim, Seok-Jin Lee, "HVDC TRANSMISSION; Power Conversion Applications in Power Systems", IEEE press  
 [2] 7th Power system planning, 2015.7, MOTIE  
 [3] KEPCO Technical Report, "The Study to Determine the Type of #3 HVDC from Jeju to Mainland", 2012  
 [4] S. Lee, M. Yoon, G. Jang, Estimates of the effects on Power System Stability in Jeju Island with HVDC operation modes, KIEE Conference 2011  
 [5] D. H. Yoon, H. Song, G. Jang and S. K. Joo, "Smart Operation of HVDC Systems for Large Penetration of Wind Energy Resources," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 1, pp. 359-366, March 2013  
 [6] S. Lee, G. Jang, M. Yoon, The Impact Analysis of Multi

Infeed HVDC system to Jeju Power System : Operating Characteristics of different HVDC types in Multi Infeed HVDC, KIEE Conference 2012

[7] M. Yoon, Y. Yoon, and G. Jang, "A Study on Maximum Wind Power Penetration Limit in Island Power System Considering High-Voltage Direct Current Interconnections", Energies, (8), pp. 14244-14259, December 2015  
 [8] KEPCO Technical Report, "A Study on Stable Operation of the HVDC System from Jeju to Mainland", 2012  
 [9] "High Voltage direct Current Handbook", First Edition, EPRI Report  
 [10] IEEE Standard 1204-1997 "IEEE Guide for planning DC Links Terminating at AC Location Having Low Short-Circuit Capacities", IEEE.  
 [11] Michael P. Bahrman, Brian K. Johnson "The ABCs of HVDC Transmission Technologies ", 2007, IEEE power & energy magazine.  
 [12] Xiuyu Chen, "Influence of the MIIF Index on Operation of Multi-infeed HVDC Systems", 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference  
 [13] D.E. Goldberg, B. Korb, and K. Deb. "Messy genetic algorithms: Motivation, analysis, and first results", Complex Systems, 5(3):493 - 530, October 1989.  
 [14] KPX, "A Long-Term View of Power System Operation", 251-268, 2013

**저 자 소 개**



**이 승 엽 (Seung-Yeop, Lee)**

1970년 1월 20일생. 1995년 영남대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2013년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한국전력공사 충북 전력관리처 계통기술부 부장  
E-mail : seungyeop.lee@kepcoco.kr



**윤 민 한 (Min-Han, Yoon)**

1984년 8월 16일생. 2009년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업(공학사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석박사통합). 2015년~2017년 한국전기연구원 선임기술원. 2017년~현재 동명대학교 전기공학과 조교수  
E-mail : minhan.yoon@gmail.com