

# 비상상태에서의 제주 ±80kV 60MW HVDC 운전 방안 연구

## ±80kV 60MW HVDC Operational Strategy in Abnormal State

윤종수<sup>†</sup> · 서보혁\*  
(Jong-Su Yoon · Bo-hyeok Seo)

**Abstract** - This paper presents the operation strategy of KEPCO(Korea Electric Power COporation) ±80kV 60MW Bipole HVDC system that will be applied between Guemak C/S(converter station) and Hanlim C/S in Jeju island. Unlike intertie HVDC system, this system is located in AC power grid inside. Therefore, the enhancement of system security related with line flow and bus voltages can be major operation strategy. In this paper, in particular, the optimal operation algorithm in the abnormal(not steady state) power system is presented and simulated.

**Key Words** : HVDC(High Voltage Direct Current), Operation strategy, System security

### 1. 서론

최근 국내에서 전류형 HVDC 시스템에 대한 국산화 개발 및 적용 연구가 활발하다. 2012년 하반기에는 제주-진도간 ±250kV 400MW Bipole HVDC 시스템이 상용 운전을 시작할 예정이며, 제주 금악 C/S와 한림 S/S간에는 ±80kV 60MW Bipole HVDC 시스템이 설치되어 실증시험을 수행할 예정이다. ±80kV 60MW HVDC는 국내 기술로 설계되는 최초의 HVDC 시스템이라는 점에서 큰 의미가 있으며, 실증시험을 통하여 설비의 신뢰성과 제어 성능을 평가할 예정이다. 당초 본 설비는 Pilot Plant로서의 설비 신뢰성 검증이외에 한림 풍력단지 연계를 목적으로 하였으나, 최근 풍력단지 건설이 불투명해짐에 따라, 실증시험 이후의 계통에서의 활용방안이 필요하게 되었다. 기존의 육지와 제주를 연계하는 HVDC와 같이 섬 계통에 전력전송을 목적으로 운전되는 경우 발전비용 저감효과를 고려하여 안전도가 허용하는 한 많은 전력을 송전하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 그러나 금악 C/S와 한림 C/S사이에 설치되는 HVDC와 같이 AC 계통내에 위치할 경우 다양한 측면의 AC 계통 운용 효과를 고려하여 설비를 운전할 필요가 있다. 본 논문은 금악 C/S와 한림 C/S간 연계되는 ±80kV 60MW HVDC 시스템에 대하여, 계통 고장이 지속되거나 계통 조건이 변경된 비정상 계통 상태에서의 HVDC 운전 전략을 도출하고 이에 대한 해석 결과를 기술하였다. 계통의 외란에 따른 과도상태에서는 HVDC 시스템내의 컨버터 제어기가 신속히 동작하므로 계통 차원의 특별한 제어 전략이 요구되지 않을 수 있으나, 계통 고장이 지속되거나 계통 운용 조건의 변경시 이에 적합한 계통 차원의 HVDC 운전방안이 필요하다. 본 논문은 계통 안전도(Security)의 관점에서 HVDC 운용방안을 도출

하고 제주 ±80kV 60MW HVDC 시스템을 대상으로 분석을 수행하였다.

### 2. 제주 80kV 60MW HVDC 구성

그림 1은 제주계통에 설치될 ±80kV 60MW Bipole HVDC 시스템에 대한 계통 구성도이다. 그림에서와 같이 정류기인 금악 C/S와 인버터인 한림 C/S 사이 약 5km를 DC 연계하였다. 당초에는 서제주 S/S와 한림 C/C 사이에 대규모 풍력단지가 건설되어 풍력단지 전력을 한림 C/S로 송전하는 것을 목적으로 하였으나, 풍력단지 계획이 불투명해져 그림 1과 같은 형태로 계통이 구성되게 되었다. 금악 C/S와 한림 C/S사이에 AC 1회선 선로를 병가한 것은 본 설비가 Pilot Plant 설비임을 감안하여 계통 신뢰도 확보 측면에서 구성하였다. 금악과 한림 C/S에는 고조파 제거와 무효전력 보상을 위하여 17MVar AC 필터 각 2대씩을 설치하였다. AC 필터는 컨버터에서 발생하는 11차, 13차 및 24차 이상 고조파를 제거하며, AC 필터내에 커패시터로 인하여 HVDC 전력 조류량에 비례하여 소비되는 무효전력을 공급한다. AC 필터를 통한 무효전력 보상을 위하여 DC 전력 조류 제어량의 25%, 75% 시점에서 AC 필터를 다단계로 투입한다[1].

### 3. 80kV HVDC 비상상태 운영 알고리즘

전력 계통의 안전도는 발전기나 송전선로 사고 등의 비상 상태에서 전력계통이 잘 견디어 내는 지표로 활용될 수 있다. 이러한 안전도 지수는 상정사고에 대해 전력계통의 여러 조건(선로 과부하, 전압 강하, 주파수 변동 등)들이 운전 한계를 벗어나는가를 점검함으로 구할 수 있다[2]. 본 논문에서는 계통의 조류 안전도 지수와 모션 전압 안전도 지수로 목적함수를 구성하고, 최적화 기법을 통하여 비상 계통

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 전력연구원 선임연구원

E-mail : yoonjs@kepri.re.kr

\* 정 회원 : 경북대학교 전자전기공학부 교수

접수일자 : 2012년 2월 8일

최종완료 : 2012년 3월 28일

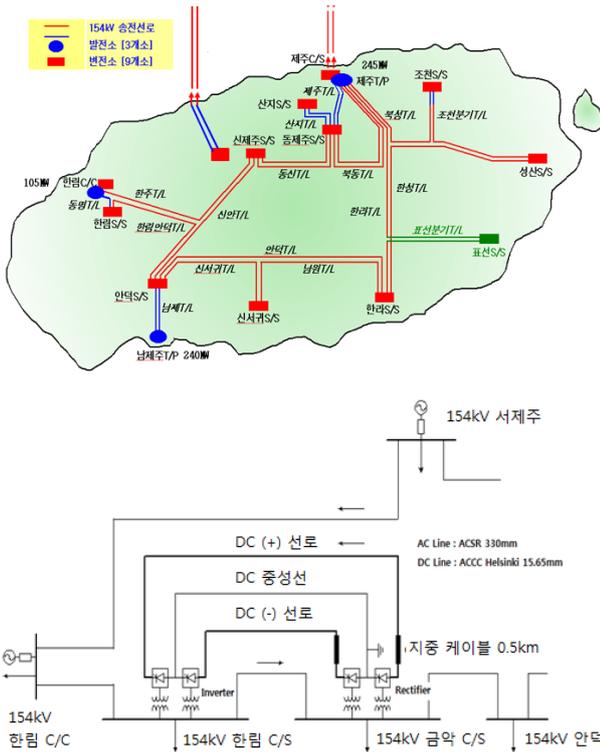


그림 1 제주 ±80kV 60MW HVDC 시스템 적용 계통 및 계통 구성도  
 Fig. 1 ±80kV 60MW HVDC system configuration

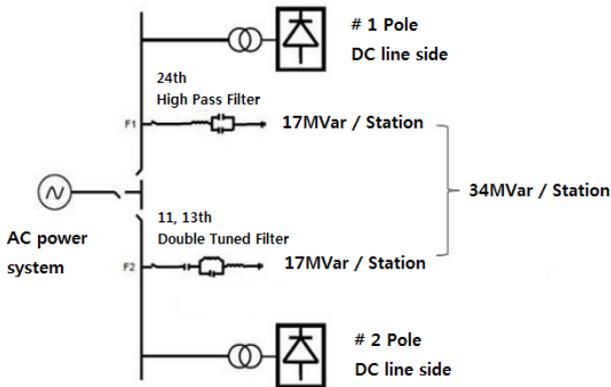


그림 2 금악 및 한림 변전소 구성도(AC 필터 포함)  
 Fig. 2 Geumak and Hanlim converter station(C/S) configuration

상태에서의 제주 ±80kV 60MW HVDC 최적 운전값을 도출하였다. 본 시스템이 전력제어기로 운전됨을 고려할 때 이는 비상 계통 상태에서의 운전 전략이 될 수 있다.

### 3.1 목적 함수

80kV HVDC 비상상태 운전을 위하여 목적 함수를 아래와 같이 구성하였다.

$$J_T = \alpha \sum_{i=branch} \left( \frac{P_i}{P_{i_{Max}}} \right)^2 + \beta \sum_{i=bus} \left( \frac{V_i - V_{ref}}{\Delta V_m} \right)^2 \quad (1)$$

여기에서 첫 번째 항은 조류 안전도 지수( $J_p$ )를 의미하고, 두 번째 항은 전압 안전도 지수( $J_v$ )를 의미한다.  $P_{max}$ 는 송전 선로의 송전용량이고,  $\Delta V_m$ 은 모선의 전압 변동 허용 범위,  $P_i$ 는 유효전력조류 측정값,  $V_i$ 는 모선전압 측정값이며  $\alpha, \beta$ 는 계통 운전 목적에 맞추어 조정하는 가중치인데 본 논문에서는 각각 1로 주어졌다. 조류 안전도 지수의 경우 각 선로에 흐르는 유효전력의 분포가 각 선로의 유효전력 용량에 대해 균일하다면 작은 값을 갖게 될 것이고, 만약 특정 선로에 흐르는 조류가 선로 용량에 이르게 되는 선로 과부하가 발생하게 되면 안전도 지수 값은 크게 증가하게 된다. 또한, 과부하 선로가 많아지면 많아질수록 전력 조류에 대한 지수 값도 이에 따라 증가하게 된다. 전압 안전도 지수는 부하 모선의 전압이 기준 전압의 크기로부터 얼마나 벗어나 있는가를 나타낸다. 따라서, 식 (1)을 최소화함으로써 송전 계통의 여유분을 확보할 수 있고, 전압 강하를 최소로 할 수 있다. 전류형 HVDC 운전에서 전압 안전도 지수를 고려하는 것은 변환소 양단에 설치되는 커패시터 또는 다단계 AC 필터의 동작과 관계가 있다. 전류형 HVDC는 컨버터의 특성상 전력 제어량에 비례하여 무효전력(컨버터 용량의 50~60%)을 소비하는데, 이를 보상하기 위하여 커패시터 또는 AC 필터를 운용한다. 따라서, HVDC 조류제어는 커패시터 또는 AC 필터 동작과 연동되어 동작하며 AC 계통의 무효전력 수급에 영향을 주므로 HVDC 운전에서 전압 안전도 지수를 검토할 필요가 있다. 본 논문에서는 이와 같은 점을 고려하여 비상상태 HVDC 운전 알고리즘을 구성하였다.

### 3.2 80kV HVDC 운전 영향

본 논문에서 제시하는 최적화 알고리즘을 적용하기 이전에 우선 HVDC 제어량 변화에 따른 각각의 안전도 변화량을 검토하였다. 그림 3은 2012년 최대 부하시 제주 계통에서 각 선로 1회선 고장시 80kV HVDC의 전력조류 제어(Pole 당 0~30MW)에 따른 조류( $J_p$ ) 및 전압 안전도( $J_v$ )를 나타낸다. 그림에서 안전도 지수값이 큰 경우 상대적으로 심각한 선로 고장임을 나타내고, 기울기 변화가 큰 경우 80kV HVDC 운전량 변화에 따른 과급효과가 큼을 나타낸다. 그림 3에서 제주 C/S-제주 TS, 제주 C/S-포산, 제주 TP-조천간 1회선 사고의 경우 타 고장에 비하여 상대적으로 큰 조류 안전도 지수를 나타내었으며, 그 다음으로는 제주 TS-동제주간 1회선 고장의 지수가 크게 나타났다. 그러나 80kV HVDC 운전제어에 따른 안전도 지수의 영향(기울기 변화)은 크지 않았다. 그 밖에 상당수의 다른 상정고장에 대하여 조류안전도 개선에 대한 80kV HVDC의 운전제어 효과는 크지 않았다. 전압 안전도의 경우 80kV HVDC의 운전량에 따른 AC 필터 입출력 효과가 뚜렷이 나타났다. 금악 C/S, 한림 C/S 변환소의 경우 80kV HVDC 변환설비의 무효전력 보상을 위한 17MVar AC 필터(Sh-C) 2대씩이 적용되어 있는데, HVDC의 운전량 증가에 따른 전압 안전도의 향상과 필터의 투입시점(운전량의 25%, 75%)이후의 전압 안전도 개선 효과를 반복적으로 보여주고 있다. 그러나, 전반적으로 80kV HVDC의 운전에 따른 안전도 개선 효과가 크지 않는데, 이는 한림-금악 C/S간에 80kV HVDC와 함께 AC 선로가 병렬 연계되기 때문이다.

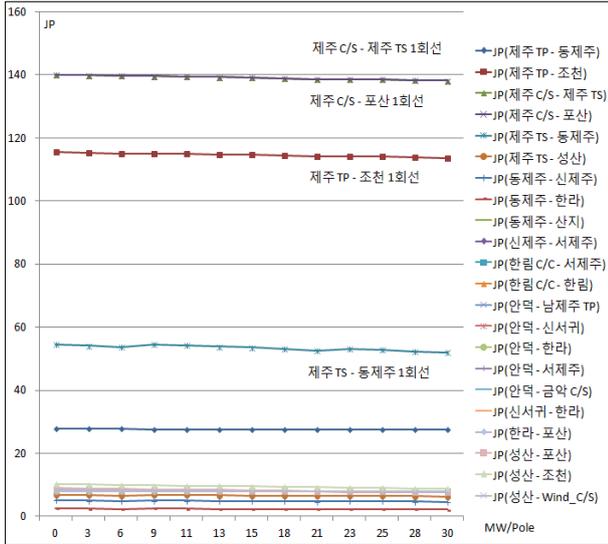


그림 3 2012년 Peak 계통에서의 ±80kV HVDC 운전에 따른 안전도 변화량  
 Fig. 3 Security variation according to ±80kV 60MW HVDC operation(2012 peak load case)

그림 4는 동일 계통에서 금악-한림 C/S간의 AC 병렬 선로가 없는 경우이다. 그림 3의 결과와 비교하면 80kV HVDC의 효과(기울기의 변화)가 보다 분명히 나타난다. 그림 3에서 안전도 지수가 큼에도 80kV HVDC의 효과가 나타나지 않았던 제주 C/S-제주 TS, 제주 C/S-포산, 제주 TP-조천, 제주 TS- 동제주, 제주 TP-제주C/S, 제주TP-동제주간에도 80kV HVDC의 조류제어 효과가 크게 나타났다. 그밖에 안전도 지수는 크지 않았지만 제주 TS- 성산, 동제주-신제주, 동제주-한라, 성산-포산, 성산-조천, 성산-Wind C/S간 1회선 고장에 대해서도 HVDC 운전에 따른 지수 개선이 나타나고 있다. 그러나 그밖에 80kV HVDC 조류 제어와 관계없는 조류방향에 대해서는 조류안전도 개선효과가 나타나지 않았다.

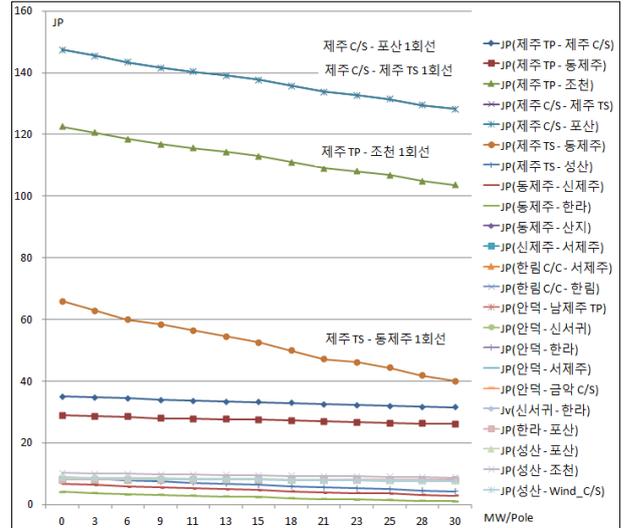


그림 4 그림 3에서 금악 C/S - 한림 C/S간 AC 병렬 선로가 없는 경우  
 Fig. 4 Without an AC transmission line between Geumak and Hanlim C/S in Fig. 3

그림 5와 6은 2012년 경부하(60% 부하) 계통의 경우이다. 그림 5의 경우 금악-한림 C/S간 AC 병렬 선로가 있는 경우이고, 그림 6의 경우 금악-한림 C/S간 AC 병렬 선로를 개방한 경우이다. 이 경우도 그림 3과 4의 경우와 유사한 결과가 나타났다. 그리고 조류 안전도 변화보다는 전압 안전도 변화가 크게 나타났다. 이는 HVDC 운전에 따른 AC 필터의 투입/개폐가 최대 부하 계통 보다 상대적으로 크게 영향을 미치기 때문이다.

3.3 HVDC 비상상태 운전 알고리즘

3.2의 HVDC 운전영향 분석으로 도출한 제주 80kV 60MW HVDC 비상상태 운영 알고리즘은 그림 7과 같다. 그림 3~6에서 알 수 있는 것 처럼 HVDC 운전에 따라 조류 안전도 지수는 선형적인 특성을 나타내지만, 전압 안전도의 경우 HVDC 운전량에 따른 다단계 AC 필터의 동작으로 비선형특성을 가진다.

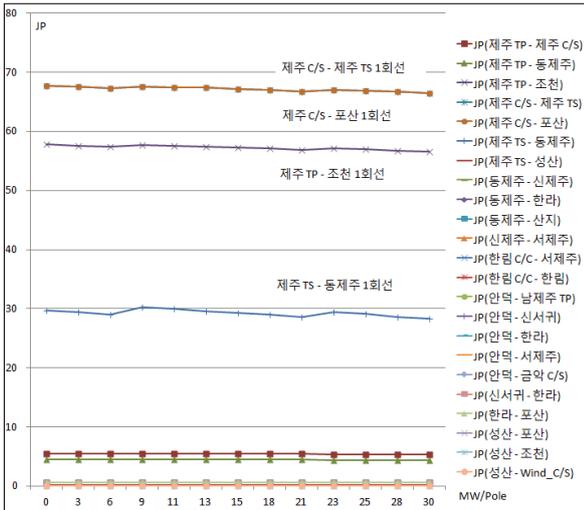


그림 5 2012년 경부하(60%) 계통에서의 80kV HVDC 운전에 따른 안전도 변화량  
 Fig. 5 Security variation according to ±80kV 60MW HVDC operation(2012 light load case)

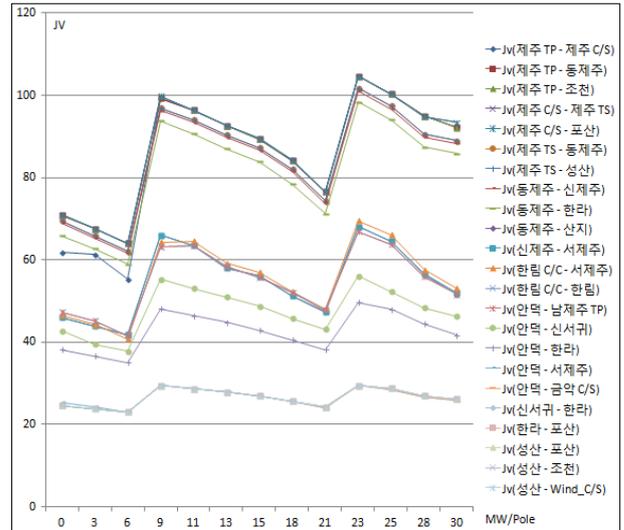
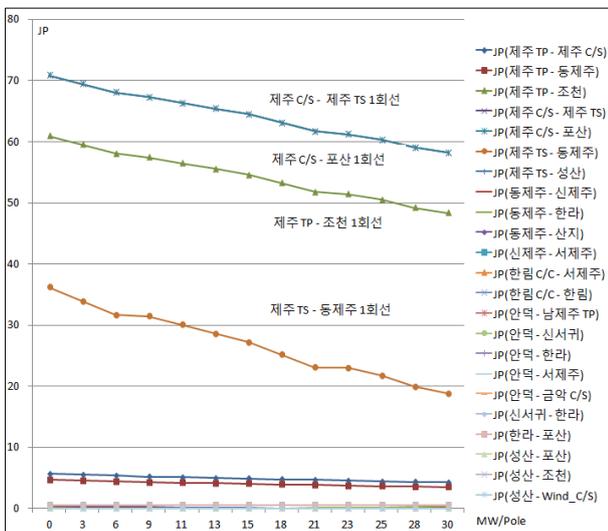


그림 6 그림 5에서 금악 C/S - 한림 C/S간 AC 병렬 선로가 없는 경우  
 Fig. 6 Without an AC transmission line between Geumak and Hanlim C/S in Fig. 5

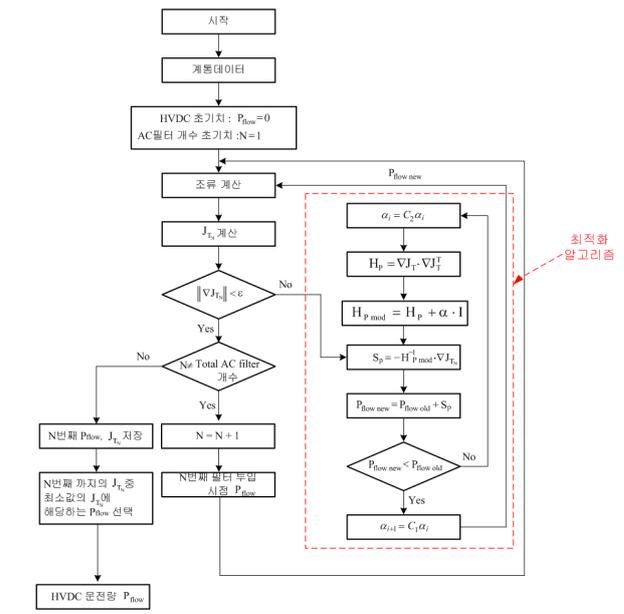


그림 7 식 (1)의 최적화를 위한 HVDC 운전 알고리즘  
 Fig. 7 Optimization algorithm for increase the system security

따라서 목적함수 식 (1)은 비선형, Non-Convex 함수가 되며, 이 경우 최적화 알고리즘을 사용하기가 쉽지 않다. 따라서, 최적화 알고리즘 적용을 위하여 본 논문에서는 AC 필터가 한 개의 Bank씩 투입되는 구간을 나누어, 이 구간별로 최적화 알고리즘을 적용하는 기법을 사용하였다. 이러한 경우 AC 필터가 투입되는 구간에서는 식 (1)이 Convex한 함수가 되므로 최적화 알고리즘의 적용이 가능하다. 최적화 알고리즘의 경우 그림 7에서는 Gradient Descent 알고리즘과 Gauss-Newton 알고리즘을 혼합한 Levenberg-Marquardt Algorithm를 사용하였으나 다른 기법을 사용하여도 무방하다.

### 4. 비상 상태 80kV HVDC 최적 운전

그림 8은 2012년 Peak 계통에서의 제주계통 각 선로 고장에 따른 ±80kV 60MW HVDC Pole당 최적 운전값(MW)을 나타낸다. 한림-금악 C/S간 AC 병렬 선로 유무에 따라 안전도 향상을 위한 최적 운전값이 약간 달라진다. AC 병렬 선로가 있는 경우 Pole 당 약 25MW, AC 선로 개방후 Pole 당 30MW 또는 25MW 정도로 운전하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

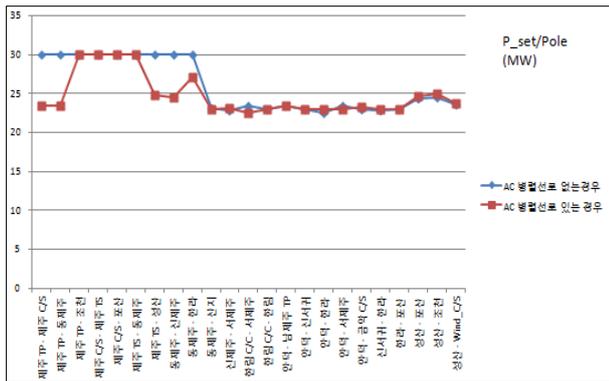


그림 8 2012년 최대부하 계통에서의 제주계통 각 선로(1회선) 고장에 따른 ±80kV HVDC 최적 운전값(MW)

Fig. 8 ±80kV 60MW HVDC operation reference(MW) according to 1-line fault(2012 peak load case)

그림 9의 경우 경부하(60%)에서의 최적 운전값을 나타낸다. 경부하 계통에서는 전압 안전도와 조류 안전도를 동시에 고려할 경우 ±80kV 60MW HVDC가 약 5MW 조류 제어를 수행하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

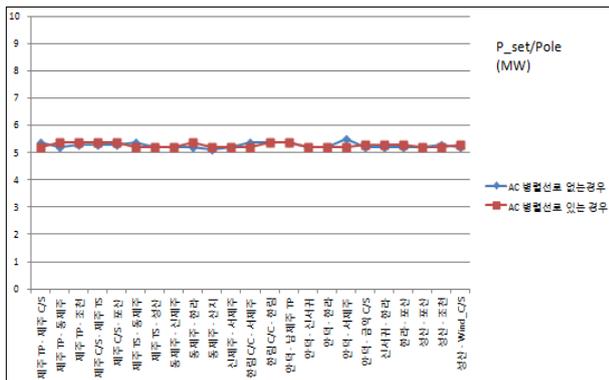


그림 9 2012년 경부하(60%) 계통에서의 제주계통 각 선로(1회선) 고장에 따른 80kV HVDC 최적 운전값(MW)

Fig. 9 ±80kV 60MW HVDC operation reference(MW) according to 1-line fault(2012 light load case)

### 5. 결 론

본 논문은 제주 80kV 60MW HVDC 시스템의 실증시험 이후, 제주 계통의 운용 효율화를 위하여 계통의 비상 상태

시의 HVDC 최적 운용방안을 도출한 결과를 기술한 것이다. 2012년 계통을 대상으로 분석한 80kV HVDC에 대한 운전 방안을 요약하면 비상상태에서는 최대 부하시 ±80kV 60MW HVDC Pole당 약 25MW, 경부하시 HVDC Pole당 약 5MW 출력제어가 계통의 안전도 향상에 최적인 것으로 분석된다. 이때 ±80kV 60MW HVDC 운전효과 증대를 위해서는 HVDC와 병렬 연계되는 금악-한림 C/S간 AC 선로를 개방하는 것이 필요할 것으로 분석된다. 본 운용방안에서 제시된 비상 상태에서의 HVDC 운용방안은 최적화 운용 알고리즘에 의하여 제시되었으므로 향후 타 HVDC의 운용방안 도출에도 활용 가능하다. 특히, EMS/SCADA 차원에서의 On-Line 계통 데이터를 기반으로 운용될 수 있어 기존의 사전 시나리오에 의한 운용방안보다 계통의 환경 변화나 외란에 따른 복구제어에 훨씬 유용한 수단을 제공할 수 있다. 향후 운전자에 의한 설정치 제어를 보조할 On-Line HVDC 운용 시스템 구축에 대한 연구가 지속될 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] "80kV HVDC 시스템 설계 중간보고서", 한전 전력연구원 기술간행물(TM), 2011
- [2] Dong-Woo Lee, Seon-Ju Ahn, Seung-Il Moon, J.S.Yoon, B.H.Chang, S.Y.Kim, S.P.Moon, "UPFC Operation Strategy for Enhancement of System Security", ICEE 2006
- [3] "Power System Stability and Control", P Kunder, 1994, McGraw-Hill 1994.
- [4] "EPRI High Voltage Direct Current Handbook", 1st Edition, EPRI.

### 저 자 소 개



#### 윤 종 수 (尹 鍾 秀)

1968년생, 1996년 경북대학교 대학원 졸업(석사), 2005년 동 대학원 박사과정수료, 기술사, 1996년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.



#### 서 보 혁 (徐 輔 赫)

1952년생, 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수.