

제주 ±80kV 60MW HVDC 협조 제어 방안 연구

A cooperative control study of Jeju ±80kV 60MW HVDC for voltage stability enhancement

윤 중 수[†] · 서 보 혁^{*}
(Jong-Su Yoon · Bo-hyeok Seo)

Abstract - This paper describes CSC(Current Sourced Converters)-based HVDC operational strategy for voltage stability enhancement in the power system. In case of CSC-based HVDC system, rectifier and inverter consume reactive power up to about 60% of converter rating. Therefore, CSC-based HVDC is basically not useful system for voltage stability even if AC filters and shunt capacitors are attached. But, If the particular power system condition is fulfilled, CSC-based HVDC also can be the rapid reactive power source for voltage stability enhancement using a cooperative control with converter and AC filters/Shunt Capacitors. In this paper, the cooperative control algorithm is presented and simulated to ±80kV 60MW HVDC system in Jeju island.

Key Words : HVDC(High Voltage Direct Current), Operation strategy, Voltage stability

1. 서 론

전류형 HVDC 시스템의 경우 DC 전력전송량을 증가시킬수록 이와 비례하여 컨버터에서 많은 무효전력을 소모한다. 이는 정류기와 인버터가 동일하며 컨버터 용량의 50~60%까지 무효전력을 필요로 한다. 따라서, 약한 AC 계통의 경우에는 전압 저하와 전압안정도에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 전류형 HVDC의 경우 컨버터에 연계할 무효전력 공급 장치가 필요하다. 무효전력 공급 장치는 AC 필터, 병렬 커패시터, 동기 조상기, SVC(Static Var Compensator), STATCOM(STatic synchronous COMPensator)까지 다양하다. 그러나 대부분 HVDC 경우 차단기로 연계되는 단단계 AC 필터 또는 병렬 커패시터를 사용한다. AC 필터의 경우 컨버터 고조파 제거용이지만 주된 요소가 병렬 커패시터이므로 무효전력공급 장치의 역할도 함께 수행한다. 이와 같이 AC 필터나 병렬 커패시터로 컨버터에 필요한 무효전력량을 공급할 경우 HVDC 운전량에 비례하여 AC필터나 병렬 커패시터를 단계적으로 투입 또는 제거하여 컨버터가 필요하는 양을 보상한다. 이러한 방식은 컨버터 동작에 따른 AC 계통의 피해를 최소화 하는데 목적이 있으며 전압안정도를 위한 무효전력 예비력 확보 차원의 것은 아니다. 그러나 만일 HVDC 전력제어가 계통에 미치는 영향이 크지 않은 경우, HVDC 운전량의 신속한 감발과 AC필터나 병렬 커패시터와의 협조 제어를 통하여 전류형 HVDC를 전압안정도 향상을 위한 순동 무효전력원으로 활용하는 것을 고려해볼 수도 있다. 본 논문은 컨버터와 AC 필터간의 적절한 협

조 제어를 통하여 HVDC가 전압안정도 향상에 활용되는 방안을 제시하고 2012년 하반기에 실증 예정인 제주 금악 변환소와 한림 변전소간 ±80kV 60MW Bipole HVDC 시스템을 대상으로 검토한 내역을 기술하였다.

2. 제주 ±80kV 60MW HVDC 구성

그림 1은 제주계통에 설치되고 있는 ±80kV 60MW Bi-Pole HVDC 시스템에 대한 계통 구성도이다. 본 시스템은 국내 기술로 설계된 최초의 HVDC 설비로써 정류기가 설치되는 금악 변환소와 인버터가 설치되는 한림 변환소 사이 약 5km거리를 DC 가공선로 및 지중선로로 연계하고 있다. 당초에는 서제주 변전소와 한림 복합화력 사이에 대규모 풍력단지가 건설되어 풍력단지 전력을 한림 복합화력으로 송전하는 것을 목적으로 하였으나, 풍력단지 계획이 불투명해짐에 따라 그림 1과 같이 계통을 구성하고 HVDC 설비 실증 시험을 위주로 하는 것으로 변경 하였다. 이를 위하여 금악과 한림 변환소 사이에 AC 선로 1회선을 병가하여 HVDC 실증에 따른 계통 신뢰도를 확보하도록 하였다. 현재 본 시스템의 적용 목적이 HVDC 실증 시험이지만, 실제 계통에 적용되는 점을 감안하면 계통에서의 활용방안 역시 필요할 것으로 예상된다. 따라서, 본 논문은 ±80kV 60MW HVDC를 단단계 AC 필터와 연계하여 계통사고시 전압안정도 향상을 위한 순동 무효전력원 기능을 수행하도록 하는 방안에 대하여 검토하였다.

그림 2는 각 변환소내 ±80kV 60MW HVDC 변환설비 구성도를 나타낸다. 각 변환소는 30MW용량의 컨버터 Pole 2대와 무효전력 보상 및 고조파 제거를 위한 17MVar AC 필터 2대로 구성되어 있다. AC 필터는 DC 전력 조류 제어량과 연동하여 투입 및 제거된다. DC 출력을 증가시킬 경우 총 전송용량 60MW의 25%인 15MW, 75%인 45MW시점에서 17MVar AC 필터를 각각 투입하도록 되어있으며, DC

* 교신저자, 정회원 : 한전전력연구원 선임연구원

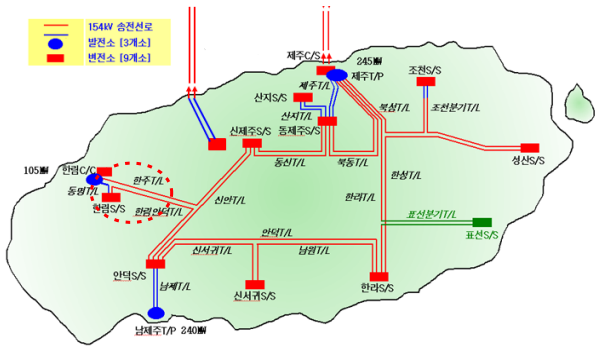
E-mail : yoonjs@kepri.re.kr

* 정 회 원 : 경북대학교 전기공학과 교수

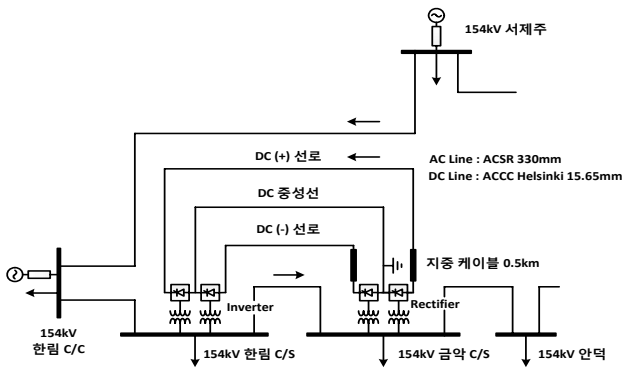
접수일자 : 2012년 2월 8일

최종완료 : 2012년 8월 21일

출력을 감소시킬 경우 투입과 반대 순서로 AC 필터들의 탈락이 이루어진다 [1].



(a) 제주 계통도



(b) ±80kV 60MW HVDC 적용 계통

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

문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우 특정 저전압 한계에 도달하기 전에 신속히 계통내 일부 부하를 탈락시키거나 순동 무효전력원을 투입하는 것이 필요하다. 전류형 HVDC의 경우 DC 전력전송량에 비례하여 무효전력이 소모되므로 AC 계통의 전압 안정도 향상에 기여하기 힘든 설비이다. 이는 컨버터가 기본적으로 무효전력을 소모하는 설비이며, 이와 연계된 AC 필터 또는 병렬 커패시터들은 단지 이를 보상해 주는 것을 목적으로 하고 있기 때문이다. 그러나 만일 전류형 HVDC의 DC 전력조류 제어에 따른 계통 과급효과가 크지 않는 경우, 전압 안정도에 심각한 영향을 주는 계통의 사고 발생시 HVDC를 순간적으로 최대 출력의 10%까지 고속 감발하거나 밸브를 차단(Blocking)시켜 컨버터에서 소비되는 무효전력을 순간적으로 0으로 함과 동시에 AC 필터뱅크들의 투입 또는 투입상태를 지속시켜 순동 무효전력원으로 동작하게 할 수 있다. 이는 HVDC가 전력전자 설비이기 때문에 가능하며 결과적으로 SVC와 유사한 순동 무효전력원의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 이는 HVDC 전력제어를 최소화 하므로 적용할 수 있는 계통의 특성에 대한 판단이 필요하다. 그림 3은 본 논문에서 제시하는 전압 안정도 향상을 위한 HVDC 컨버터 및 AC 필터 협조제어 알고리즘을 나타낸다. 본 알고리즘 적용을 위해서는 조류계산 데이터를 대상으로 상정사고와 HVDC 제어를 통한 HVDC의 전력조류 제어효과를 평가하여 본 알고리즘의 적용 가능 계통 유무를 판단하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위해 식 (1)의 선로 부하지수(J_p)[2]를 이용한다.

$$J_p = \sum_{i=branch} \left(\frac{P_i}{P_{i,max}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서 P_i 는 i 번째 송전선로에서 측정되는 유효전력조류이며 $P_{i,max}$ 는 해당 i 번째 송전선로의 최대 송전용량이다(예, 154kV ACSR 330mm²의 경우 172MW). 만일 HVDC 전력제어량 변화를 통하여 각 선로별 유효전력 조류가 변동되면 J_p 지수가 변화하므로 HVDC 전력제어에 따른 계통의 영향 정도를 파악할 수 있다. 즉, HVDC 운전량 변화에 따른 J_p 지수의 변동율인 식 (2)를 통하여 본 알고리즘의 적용가능 유무를 판단할 수 있다.

$$\left\| \frac{\Delta J_p}{\Delta P_{HVDC}} \right\| \quad (2)$$

만일 변동율이 작은 경우(즉, $\| \Delta J_p / \Delta P_{HVDC} \| < \epsilon$ 인 경우) HVDC 전력조류제어의 영향이 전체 계통에서 크지 않음을 의미하므로, HVDC가 긴급한 유효전력 감발제어 또는 Blocking과 함께 AC 필터 협조 제어를 수행하여 HVDC를 전압 안정도 향상을 위한 순동 무효전력원으로 활용 가능하다. 만약 이 조건을 만족하지 못하는 경우 기존의 HVDC 운전방식을 유지하여야 한다.

3. HVDC 컨버터 및 AC 필터 협조제어 알고리즘

계통 사고 발생시 계통의 무효전력이 부족한 상황이면 적정 전압을 유지시킬 수 없고, 심할 경우 조상설비의 추가적인 투입에도 계속 무효전력이 부족하게 되는 전압 안정도

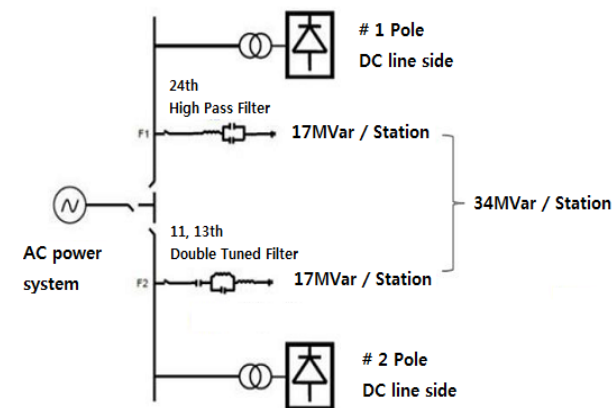


그림 2 제주 ±80kV 60MW HVDC 변환소 구성설비
Fig. 2 Jeju ±80kV 60MW converter station(C/S) configuration

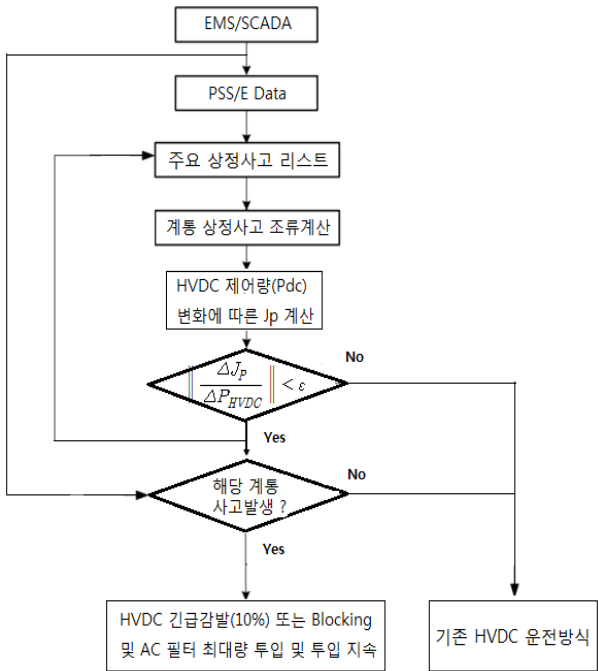


그림 3 HVDC 컨버터 및 AC 필터 협조제어 알고리즘
 Fig. 3 cooperative control of HVDC converter and AC filters

4. 제주 ±80kV 60MW HVDC 적용효과 분석

4.1 제주 계통 운영 현황

그림 3의 알고리즘을 제주 계통에 설치될 ±80kV 60MW HVDC 시스템을 대상으로 효과를 검토하였다. 그림 4는 2012년 제주-진도간 #2 HVDC설비가 투입된 경우의 계통 단선도이고, 표 1은 이에 따른 계통 운영조건을 설정한 것이다.

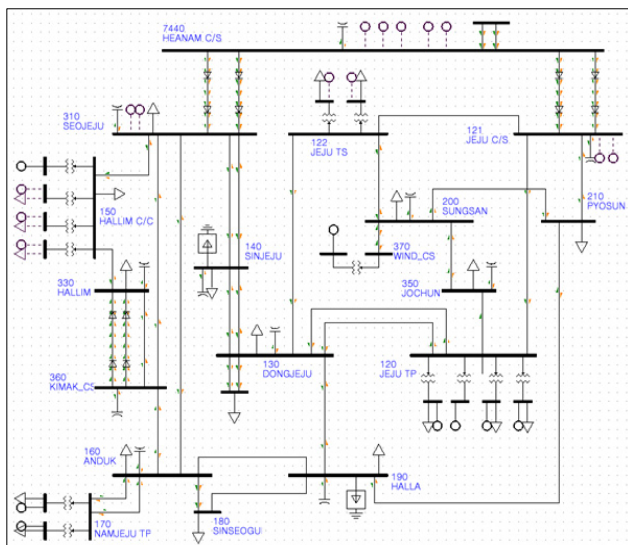


그림 4 제주 계통 PSS/E 단선도
 Fig. 4 PSS/E single line diagram of Jeju power system

표 1 2012년 제주계통 발전력 배분안

Table 1 Generation dispatch of Jeju power system

제주TP측		남제주TP측	
발전기명	유효발전력	발전기명	유효발전력
제주 TP2	50 MW	남제주 TP3	75 MW
제주 TP3	50 MW	남제주 TP4	75 MW
제주 DP1	20 MW	-	-
제주 DP2	0 MW	-	-
합계	120 MW	합계	150 MW

제주계통에서 유효발전력이 탈락하는 사고가 발생하게 되면, 발전기에 비해 HVDC의 응답속도가 빠르기 때문에 부족한 유효발전력을 제주 #1,2 HVDC에서 거의 담당하게 될 것이다. 그리고 제주 #1,2 HVDC의 전송 유효전력이 증가함에 따라 인버터단에서 소비되는 무효전력은 증가하게 될 것이다. 만일 가장 큰 발전원인 남제주TP로의 2회선 사고(남제주T/P~안덕S/S)가 발생한다면 150MW의 유효발전력이 탈락하게 되고, 그만큼을 제주 #1,2 HVDC에서 추가로 전송해야 한다. 제주 #1,2 HVDC의 전송량이 400MW에서 550MW로 증가함에 따라 필요한 무효전력은 229Mvar에서 290Mvar로 61Mvar가 증가하게 된다.

표 2 남제주T/L Trip시 제주 #1,2 HVDC의 전송량 변화

Table 2 Jeju #1,2 HVDC power change at Namjeju transmission line trip

	정상상태시	남제주T/L Trip시
제주 부하 (MW)	670.00	670.00
#1 HVDC 운전(MW)	150.00	210.00
#2 HVDC 운전(MW)	250.00	340.00

이때, 만일 발전기 탈락사고가 발생한다면, 제주 #1,2 HVDC의 전송량 증가에 따라 추가로 필요한 무효전력뿐만 아니라 무효발전력 탈락분까지 응답속도가 빠른 순동 무효전력원인 동기조상기(75MVar 2대)와 STATCOM(한라 50MVar, 신제주 50MVar)이 감당해야 한다. 그런데 동기조상기와 STATCOM에서 공급하는 무효전력이 #1,2 HVDC 및 제주 지역 발전기 무효전력 여유분 보다 큰 경우 계통내의 무효전력이 부족한 상태가 되어 전압안정도 문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우 ±80kV 60MW HVDC 설비에 대한 순동 무효전력원 기능을 수행할 수 있는 방안이 필요하다.

4.2 ±80kV 60MW HVDC 협조 운전 효과

그림 3의 알고리즘을 통해 제주 ±80kV 60MW HVDC를 순동 무효전력원으로 동작시키기 위해서는 HVDC 전력조류 제어효과에 대한 분석이 필요하다. 그림 5는 각 상정사고시 ±80kV 60MW HVDC 전력조류량(MW/Pole) 변화에 따른 지수(Jp)의 변화를 나타낸다.

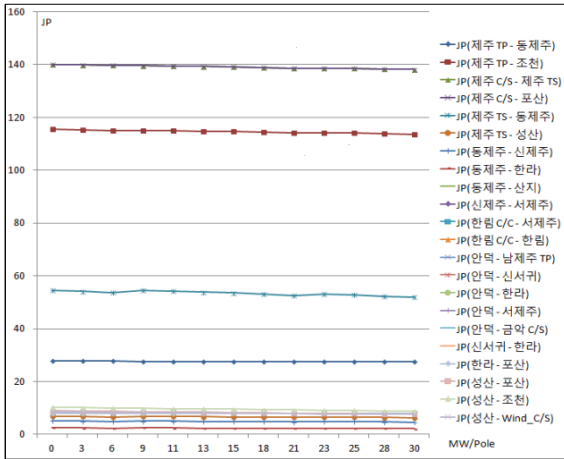
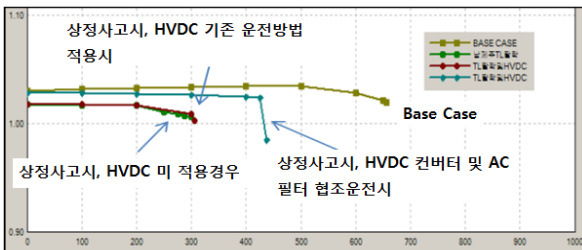


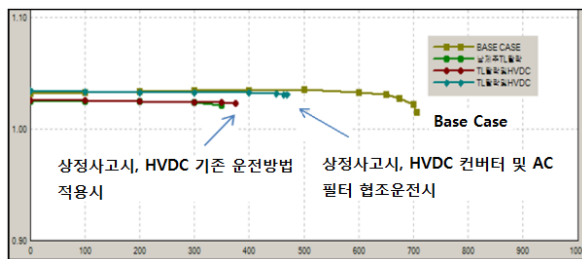
그림 5 제주 계통 송전선로 고장시 HVDC 운전에 따른 선로 부하 지수 변동율($\Delta J_p / \Delta P_{HVDC}$)

Fig. 5 $\Delta J_p / \Delta P_{HVDC}$ at Jeju transmission line trip

그림 5에서 알 수 있듯이 $\pm 80kV$ 60MW HVDC 시스템의 경우 제주 계통내 각 송전 선로사고 Case에 대하여 HVDC의 전력 전송량을 가변하여도 전체 계통에서 지수 J_p 에 큰 변화는 없다. 즉, 그림 3의 알고리즘이 적용가능한 $\| \Delta J_p / \Delta P_{HVDC} \| < \epsilon$ 인 경우에 해당한다. 이러한 경우 남제주 TP-안덕간 송전선로 2회선 사고에 대하여 그림 3의 HVDC 컨버터 및 AC 필터 협조제어 알고리즘을 적용한 결과를 분석하면 다음과 같다. 그림 6은 해당 상정사고시 $\pm 80kV$ 60MW HVDC가 없는 경우, HVDC를 기존 방식으로 운전하는 경우, 그림 3의 알고리즘을 적용하는 경우 등으로 구분하여 P-V 해석을 수행한 결과이다. 제주 계통의 무효전력 분석시 한라 및 신제주 50MVar STATCOM의 역할도 매우 중요하므로 이를 구분하여 P-V 해석을 수행하였다.



(a) STATCOM 1대 운전시 (신제주)



(b) STATCOM 2대 운전시 (신제주, 한라)

그림 6 남제주T/P~안덕S/S 2회선 사고시 P-V곡선

Fig. 6 P-V curve at Namjeju-Anduk transmission line fault

그림 6(a)는 고장 개소 주변 신제주 50MVar STATCOM만 투입한 경우인데 $\pm 80kV$ 60MW HVDC가 없는 경우와 $\pm 80kV$ 60MW HVDC를 기존 방식으로 운전하는 것 보다 본 알고리즘을 적용한 경우가 더 큰 전압안정도 여유분을 확보하는 것으로 나타났다. (b)의 경우 신제주, 한라 STATCOM 모두 적용된 경우이며 이 또한 본 알고리즘의 경우가 더 많은 여유분을 확보한다. 표 3은 이를 구체적으로 나타낸다.

표 3 남제주-안덕 T/L고장에 따른 PV 곡선 여유마진 (MW)

Table 3 P-V margin at Namjeju-Anduk transmission line trip

운전조건	Base Case	남제주 - 안덕 선로 고장		
	정상상태	80kV HVDC 미설치	80kV HVDC 기존운전 방식	80kV HVDC 협조운전 방식
STATCOM 미운전	550.00	0.00	0.00	275.00
STATCOM 운전 (신제주)	626.25	300.00	306.25	437.50
STATCOM 운전 (신제주, 한라)	706.25	350.00	375.00	468.75

표 3에서 STATCOM 미운전 상태에서 $\pm 80kV$ 60MW HVDC의 Block 운전시 여유 마진이 275MW이고, HVDC 미설치 상태에서 신제주의 STATCOM을 1대 운전할 때의 여유 마진이 300MW인 것으로 미루어 $\pm 80kV$ 60MW HVDC의 협조운전 효과는 50MVar 신제주 STATCOM의 90% 정도 수준일 것으로 추정된다. 또한 부하 탈락제어를 통한 전압 안정도 개선 효과와도 비교를 수행한 결과, 동제주, 안덕, 신서귀 변전소에서 총 10MW의 부하를 탈락시켰을 때와 $\pm 80kV$ 60MW HVDC의 협조 제어효과가 비슷한 것으로 나타났다. 그림 7은 본 협조 운전 방식이 약 10MW의 부하 탈락 조치와 유사함을 나타내고 있다.

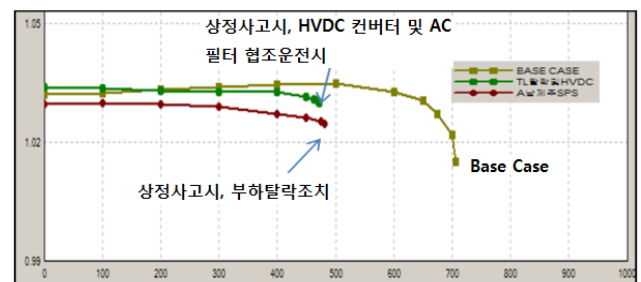


그림 7 남제주T/P ~ 안덕 S/S 2회선 사고시 10MW 부하 탈락시와의 비교

Fig. 7 P-V curve at Namjeju-Anduk transmission line fault including load shedding effect

4. 결론

본 논문은 전류형 HVDC를 전력 감발제어와 AC 필터나 병렬 커패시터와의 협조제어를 통하여 계통 고장시 전압안정도 향상을 위한 순동무효전력원으로 활용가능함을 기술한

것이다. 이를 위해서는 HVDC 운전에 따른 선로 부하지수의 변동율을 통하여 본 협조 제어방식이 적용 가능성을 판단하는 것이 필요하다. 2012년 하반기 계통에 적용될 제주 $\pm 80\text{kV}$ 60MW HVDC 설비의 경우 선로 부하 지수 변동율 분석결과 전력조류 제어효과가 크지 않으므로 본 협조 제어 방식의 적용을 고려할 수 있다. 본 논문은 2012년 제주 계통을 대상으로 $\pm 80\text{kV}$ 60MW HVDC 시스템이 본 협조 알고리즘을 통하여 계통 고장에 따른 순동 무효전력원으로 동작 가능성을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] "80kV HVDC System Design Report", KEPRI Technical Report 2011
- [2] Dong-Woo Lee, Seon-Ju Ahn, Seung-II 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
- [4] "EPRI High Voltage Direct Current Handbook", 1st Edition, EPRI

저 자 소 개



윤 종 수 (尹 鍾 秀)

1996년 경북대 및 동대학원 졸업, 2005년 동 대학원 박사수료, 기술사, 1996년~현재 한전 전력연구원



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 전기공학과 교수.