

±35kV급 MVDC 실증 시스템 구축 및 실증 계획

한국전력공사에서는 새로운 에너지신산업의 기술개발 및 실증을 목적으로 나주 혁신산단에 에너지신기술연구원을 '22년 1월에 개원하였다. 에너지신기술연구원은 수소에너지연구실, 대용량 ESS연구실, 신재생 실증연구실, 에너지신소재 연구실과 대외협력실의 5개 실로 구성되어 있다. 이 중 에너지신소재연구실은 MVDC등 차세대 그리드 연구개발 및 실증과 전력반도체 응용분야의 연구를 담당하고 있다. 본 원고에서는 에너지신소재연구실에서 진행하고 있는 MVDC 연구에 대해 소개하고자 한다.

1. 서론

전기에너지는 청정한 에너지로 CO₂ 저감을 위한 에너지원으로 각광받고 있다. 특히 탄소저감이라는 전 세계적인 이슈와 맞물리면서 기존 전기부하뿐 아니라 수송부문에 이르는 다양한 분야에서 전기수요가 급증하고 있다. 하지만, 전기를 생산하는 방식에서 많은 CO₂가 발생하면서 이를 대체하기 위한 신재생에너지원에 대한 필요성도 같이 증가하였다.

이러한 상황에 따라, 국내의 경우 '17년 12월 재생에너지 3020 이행계획(안)을 시작으로 '20년 12월 제5차 신·재생 에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획까지 정부차원에서 지속적으로 확대 보급을 위한 계획을 수립하였다. 정부의 적극적인 신재생에너지 보급 정책에 따라 신재생에너지 원 발전량은 2010년 1.7%(약8,160GWh)에서 2021년 7.5%(약 43,096GWh)로 급증하였다¹⁾.

신재생에너지원의 경우 청정발전이라는 장점을 갖지만 기후조건에 따른 변동성이 커서 계통을 운영하는 입장에서는 큰 부담이 되고 있다. 또한 신재생에너지원의 계통연계를 위한 신규선로 추가에 따른 비용문제와 주민 수용성 문제가 발생하고 있다.

한국전력공사에서는 이러한 신재생에너지 문제를 극복하기 위하여 다양한 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구들 가운데 신재생 분산전원 연계를 위한 배전선로 용량 및 이용률 증

대와 계통 안전성 보장을 위하여 '19년 DC배전 기술개발 및 확대 기본계획을 수립하였다.

이에, 전력연구원은 '20년부터 중소기업벤처부에서 지원하는 전남 에너지신산업 규제자유특구사업에 “MVDC 실증을 통한 운영기술 확보”과제로 참여하고 있으며, 이를 통해 사업 참여기관과 공동으로 MVDC 실증시스템 구축을 완료하였다.

2. 직류배전 개요

1880년대 후반 Current War라 불리는 에디슨과 테슬라로 시작된 AC와 DC의 전력시스템은 변압기를 활용한 전압의 승압/강압의 편리함으로 인해 AC시스템이 결국 전력계통 시장을 장악하게 되었다. 하지만, 현재에 이르러서는 신재생에너지원의 직류발전 및 EV와 같은 DC부하의 증가로 다시 DC 전력망에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. AC배전과 DC배전의 장단점은 표 1을 통하여 알 수 있다.

한국전력공사에서는 전력망에 이미 HVDC와 LVDC를 활용하고 있다. HVDC의 경우 대용량 송전시스템에 사용하고 있으며, LVDC는 강원도 산간지역에 전력을 공급하는데 사용하고 있다. 배전계통에 연계되는 수MW급 분산전원을 연계 하기에 HVDC는 시스템이 비대하고, LVDC는 전력전송 가능

표 1 AC 배전과 DC 배전의 비교

구분	교류	직류
DC전압 변환	변압기, 정류기, 전력변환장치 필요	DC/DC 변환장치 필요
절연 비용	직류의 1.4배	교류보다 저렴
계통 연계성	위상, 주파수, 크기 등 동기화 필요	전압 크기만 동기화 필요
분산전원 연계	계통 연계 복잡	분산전원 시스템과 계통연계 용이
전자기파 영향	유기 기전력 발생	유기 기전력 발생 없음
보호 기기	아크 소호에 유리	아크 소호에 불리

표 2 전압 크기별 직류 시스템 구분(CIGRE)

	LVDC	MVDC	HVDC
전압	1.5kV 이하	1.5kV~100kV	100kV 이상
주목적	직류의 1.4배	중규모 계통 연계	지역 간 대용량 송전

용량이 작아 MVDC가 적합하나 아직 전압크기에 대한 표준이 없는 상황이다. 다만, CIGRE에서 진행중인 MVDC 관련 타당성 보고서에 따르면 LVDC와 HVDC의 사이 전압인 1.5kV에서 100kV 사이의 전압으로 정의하고 있다¹²⁾.

3. ±35kV MVDC 실증 시스템

3.1 실증 시스템 설계

3.1.1 애자 선정

MVDC 실증 시스템은 기존 배전선로의 최대 용량인 15MVA의 2배인 30MW의 전력전송을 실증할 수 있게 설계되었다. 본 실증설비의 가장 큰 특징은 기존 AC배전선로에 MVDC를 적용하여 선로용량을 증대시키는 것이다. 때문에 설계당시 가공선로의 최대 허용전류의 한계로 인하여 실증전

표 3 AC배전선로 LP애자 특성

항목	특성값
상용주파 건조섬락 전압 [kV]	110
상용주파 주수섬락 전압 [kV]	85
뇌충격 내전압 [kV]	166 (정극성)
	189 (부극성)

압은 ±35kV를 선정하였는데, 이 전압은 AC배전망 구성설비의 절연내력을 기준으로 선정하였다. 일반적으로 DC의 경우 20mm/kV의 누설거리가 필요한 것으로 알려져 있다. AC배전망 구성설비 중 염해용 라인포스트 애자(이하 LP애자)의 경우 최소 누설거리가 712mm로 ±35kV의 경우 대지간 전위차 35kV를 감안하면 누설거리가 700mm로 MVDC 선로 적용에 적합한 것으로 판단하였다.

또한, LP애자의 MVDC 적용 가능성을 검증하기 위하여 섬락시험을 진행하였으며, 섬락시험 환경은 건조시험과 주수시험을 진행하였으며, 주수시험 분부량은 IEC 60060규격을 준용하여 진행하였다. 섬락시험의 전압은 IEC 60243을 기준으로 산정하였으며, 시험 방식은 Ramp 방식과 Step방식 2가지로 진행하였다. Ramp 방식은 시험 대상의 절연파괴 혹은 섬락이 발생할 때까지 0V에서 일정한 전압 상승률로 전압을 상승시키는 방식이고, Step방식은 시험전압의 75%에 해당하는 전압까지 상승 시킨 이후 10kV씩 상승시킨 이후에 1분간 유지하여 섬락이 발생할 때까지 반복하여 수행하는 방식이다.

표 4는 기존 AC배전선로의 LP애자에 대한 DC섬락전압 시험을 건조 및 주수조건에서 수행한 결과를 보여준다. AC시험 기준전압은 22.9kV를 기준값으로 DC시험전압은 35kV를 기준값으로 p.u로 환산하였다.



그림 1 DC 기준 섬락전압 도출 시험 구성

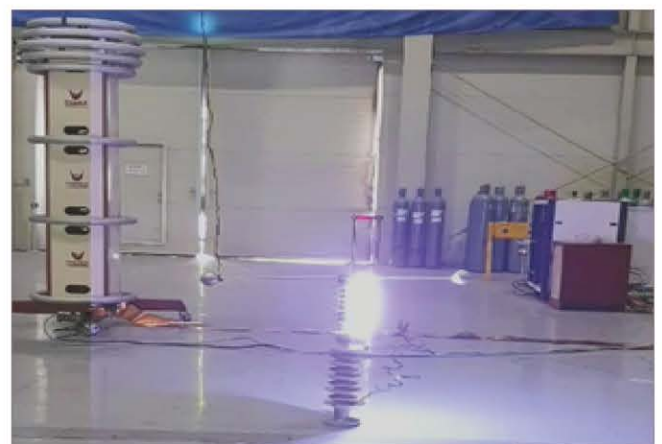


그림 2 폴리머 애자 기준 섬락 발생

표 4 LP애자의 AC시험 기준전압 및 DC시험결과 비교

조건	LP애자 AC시험전압[p.u]	DC시험 결과값[p.u]	
		자기 LP애자	폴리머 LP애자
건조	4.80	4.62 ~ 4.86	4.79 ~ 5.28
주수	3.71	3.00 ~ 3.40	4.03 ~ 4.06

자기 LP애자와 폴리머 LP애지는 건조조건에서는 DC접락 전압이 AC시험기준전압과 유사한 결과를 나타내었지만 주수조건에서는 자기 LP애자의 DC접락전압이 AC시험기준전압보다 낮은 것을 확인하였다. 이러한 시험결과를 바탕으로 MVDC 실증 시스템에는 폴리머 LP애자를 적용하여 가공선로를 구축하였다.

3.1.2 MVDC 실증망 설계

MVDC 실증망은 기존 AC 선로의 기자재를 활용하여 설계하였으며, 선로 구성방식은 국외 논문을 참조하였고^[3], 가공케이블의 허용전류를 고려하여 선로를 구성하였다. MVDC 실증망은 총 4개의 실증구간으로 구성하였으며, 각 실증구간의 특징은 다음과 같다.

- ① 지중케이블 실증구간
 - 기존 AC케이블 및 신규 DC케이블(PP) 활용 DC 전력 전송 실증
- ② 160mm² × 4선 구간
 - 1개 도체를 추가하여 30MW 전력전송 실증 및 선로높이 변경(6~15m)을 통한 전자계 분석
- ③ AC/DC 병가 구간
 - 기존 AC 1회선 설치구간 전주 활용, MVDC선로 신설 실증을 위하여 AC 22.9kV(240mm²) 상단, DC ±35kV(160mm² × 4선) 하단에 설치하여 실증
- ④ 240mm² × 2선 구간
 - 기존 대용량 배전선로에 추가 설치 없이 MVDC를 적용하여 선로용량 증대 실증

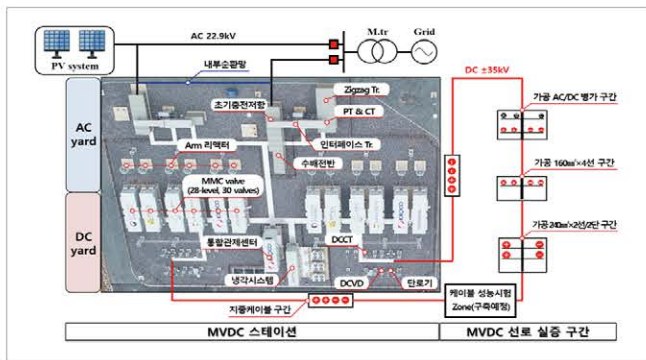


그림 3 MVDC 실증시스템 구성도

표 5 전계해석 물성치

구분	유전율	도전율 [S/m]
Air	1	10 ⁻¹³
XLPE	2.3	10 ⁻¹⁶

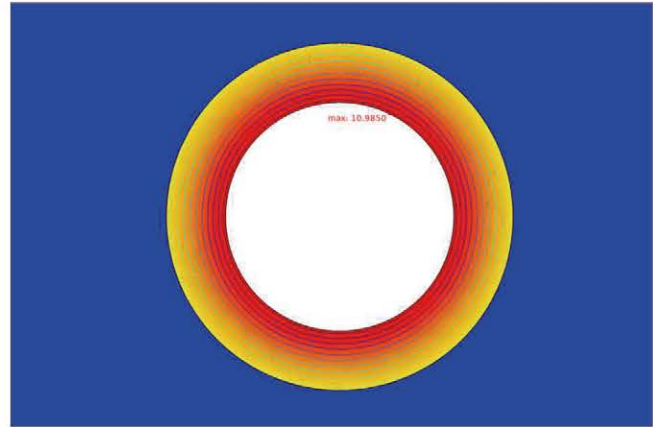


그림 4 1단 4선 방식 전계해석 결과

160mm² × 4선 구간의 경우 기존 선로대비 가공전선의 이격거리가 짧기 때문에 DC 전계해석을 수행하였다. 전계해석 결과 등전위선이 모두 절연층 내부에만 존재하는 것을 확인하였는데, 이는 표 5와 같이 공기와 XLPE의 유전율이 2.3배 차이가 나지만 도전율은 1000배 차이가 나기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 최대전계강도가 10.98kV/mm로 나타나 XLPE의 DC 절연내력인 100kV/mm보다 우수한 특성을 보여서 1단에 4선 적용은 가능한 것으로 판단하였다.

3.2 시뮬레이션을 통한 계통 영향도 평가

MVDC 실증시스템에 필요한 전력은 신재생에너지 접속이 많은 한국전력공사의 배전선로에서 공급받아 30MW 전력전송 실증을 한 이후에 변전소로 송전하게 구성되어 있다. 안전한 MVDC 실증을 위해서는 실증에 따른 배전선로의 영향도 평가 및 사고전류에 대한 해석이 필수적이다. 이를 위하여 MVDC 스테이션 제작사인 효성과 협업을 통하여 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션을 위한 MVDC 스테이션 모델은 제작사인 효성측에서 제공하였으며, MVDC 실증시스템에 연계되는 배전선로 및 태양광 발전원은 선로에 접속되어 있는 용량 및 접속 위치를 고려하여 모델링을 진행하였다. 또한, MVDC 실증망은 실제 도면을 바탕으로 모델링을 진행하였다. 표 6은 시뮬레이션 조건을 보여주며, 그림5는 개발된 PSCAD/EMTDC 모델이다.

MVDC 실증망의 정상상태 운전특성을 나타내면 그림 6과 그림 7과 같다. 여기서, 그림 6은 내부 순환선로 전력(A) 및

표 6 시뮬레이션 조건

항목		내역		
MMC	DC공급방식	Symmetrical monopole 방식		
	정격용량	30[MW]		
	정격전압 및 전류	AC	22.9[kV], 756[A]	
		DC	±35[kV], 429[A]	
밸브 레벨 수	28-level			
인터페이스 변압기	결선방식	Yg-Δ		
	전압비	22.9/28.92[kV]		
	용량	34.2[MVA]		
	%임피던스	8[%]		
태양광전원	발전 용량	15[MW]		
	연계지점	D/L#1 - 11[km]		

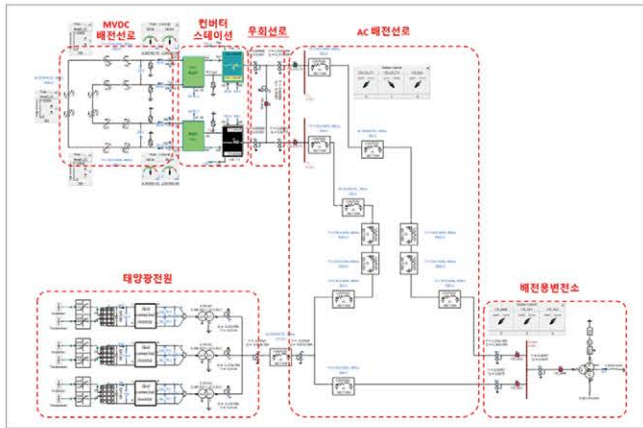


그림 5 MVDC 실증시스템 PSCAD/EMTDC 모델

MVDC 선로 전류(B) 특성을 나타낸 것으로, MVDC 스테이션의 정격 전송용량(30[MW]) 시험운전시, 29.41[MW](98%)의 전력이 내부 순환선로를 통해 전력흐름을 형성함을 알 수 있고, MMC의 제어에 따라 (+)와 (-) 양방향으로 공급이 가능함을 알 수 있다. 또한, 그림 7은 MVDC 실증망 정상상태 운전특성을 나타낸 것으로, D/L #1에서 MVDC 스테이션측으로 공급되는 전력은 589[kW]이고, D/L #2로 나가는 출력은 71[kW]로, 선로용량인 15[MVA]의 4% 미만이므로, 30MW의 정격운전 시 배전선로 용량초과 문제가 발생하지 않고, 변전소측에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

표 6의 시뮬레이션 조건에 따라, MVDC 선로에서 Pole-to-Pole 단락이 발생한 경우의 MVDC 스테이션 AC측 단락사고 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서 (a)는 유효 및 무효전력 특성이며, (b)는 AC 순시 전압, (c)는 AC 순시 전류특성이다. 그림에서와 같이, 사고발생 시 무효분이 크게 증가하고,

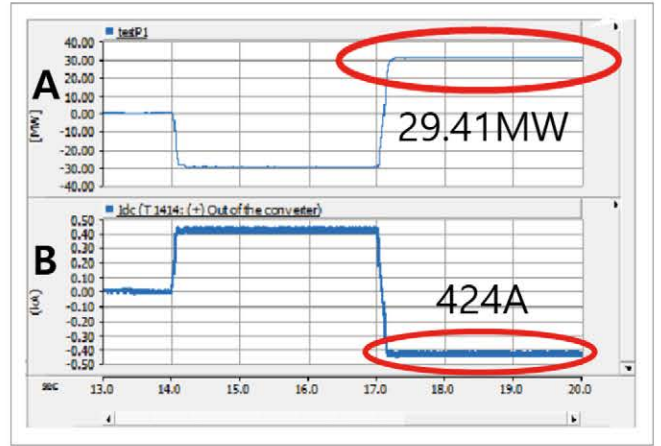


그림 6 내부 순환선로 전력 및 MVDC 선로 전류공급 특성

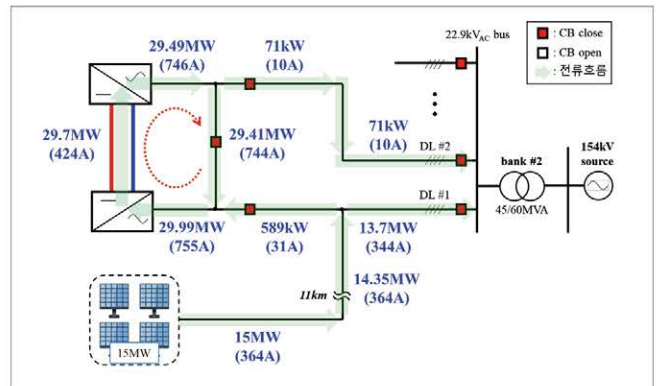


그림 7 MVDC 실증시스템 정상상태 운전특성

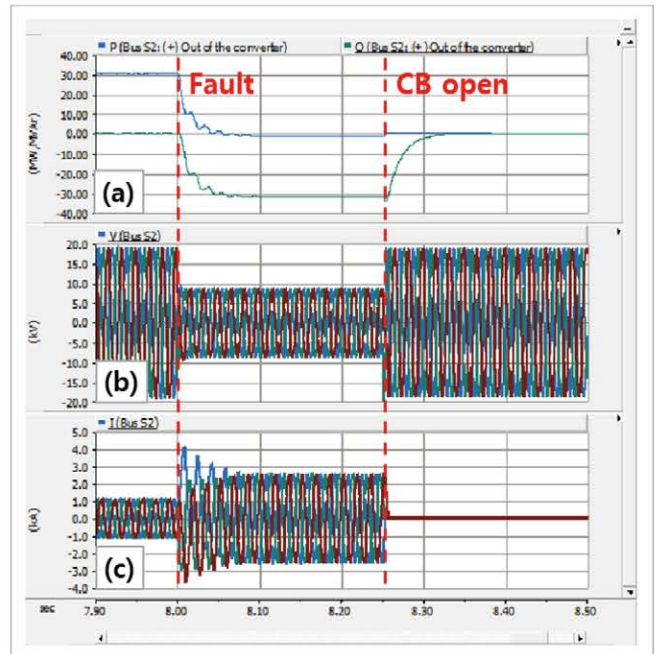



그림 8 MVDC 스테이션 AC측 단락사고 특성

전압은 9[kV] (0.48pu)로 급격하게 감소하였다. 또한, 사고전류는 최대 4.08[kA]까지 발생하여, MVDC 스테이션용 차단기의 차단용량인 25[kA]보다 작아, 실증설비를 보호하는데 큰 문제가 없음을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 한국전력공사에서 수행중인 기존 AC 배전선로 기자재를 활용한 $\pm 35\text{kV}(30\text{MW})$ MVDC 실증 시스템 설계에 대하여 소개하였다. 실증시스템 설계를 위하여 선로 구성에 가장 기본이 되는 애자의 적용 가능성, 실증선로의 구성방법 및 PSCAD/EMTDC를 활용한 계통해석을 수행하였다. 본 실증시스템은 9월 커미셔닝을 시작으로 '23년 12월까지 실증을 진행할 예정이다. 실증 결과를 토대로 MVDC 상용화를 위한 기술기준(안)을 수립할 계획이다.

구축된 MVDC 실증설비는 MVDC 스테이션 진단기술개발 및 MVDC 관련 설비 개발에 활용할 예정이다. 또한, MVDC 스테이션을 활용하여 신재생에너지원의 접속이 많은 배전선로 안정화 기술개발을 계획하고 있다. 

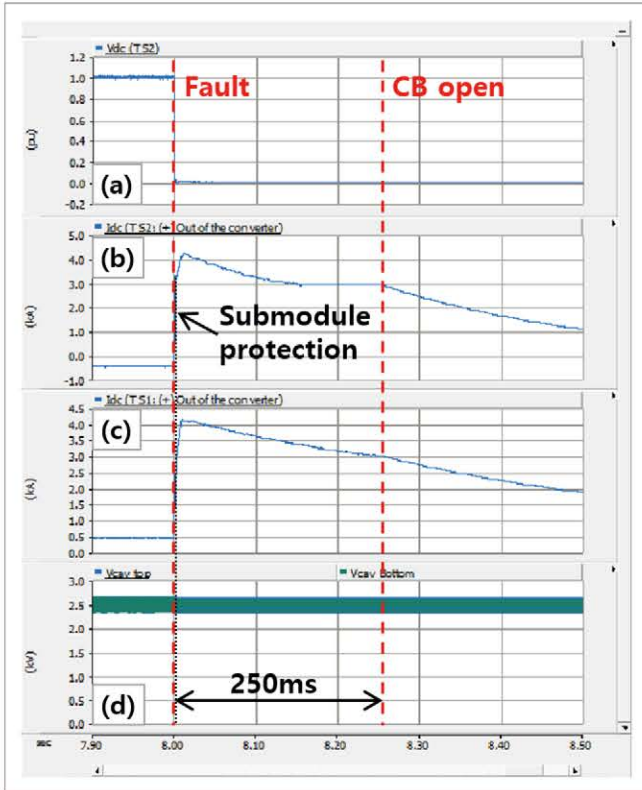


그림 9 MVDC 스테이션 DC측 단락사고 특성

한편, 사고 시 MVDC 스테이션 DC측 단락사고 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서 (a)는 MVDC 선로측 전압이며, (b)와 (c)는 각각 MMC #1과 MMC #2에서 공급되는 DC 전류이고, (d)는 서브모듈의 커패시터 충전전압을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 사고발생 시 DC측 전압은 0.1kV 로 급격하게 하락하며, 반대로 사고전류는 가파르게 상승함을 알 수 있다. 그러나, 수십 μs 만에 서브모듈의 보호회로가 동작하여, 서브모듈 내 커패시터의 방전이 억제되면서 MMC #1과 MMC #2측에서 각각 최대 4.2kA , 4.1kA 정도의 사고전류가 환류다이오드를 통해 유입됨을 알 수 있고, 250ms 이후부터는 차단기가 개방되면서 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서, DC선로측에서 사고가 발생했음에도 불구하고, 그림9의 (d)와 같이 MMC 밸브의 보호동작에 의해 커패시터의 방전이 억제되면서 충전전압이 일정하게 유지됨을 알 수 있으며, 이에 따라 발생한 사고전류의 크기가 DC측 차단기의 차단용량인 25kA 를 초과하지 않아, 설비를 안전하게 보호할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] e-나라지표, 2022.07.22., 산업통상자원부 전력산업정책과
- [2] Study on the Feasibility of MVDC, CIGRE, 2018
- [3] Lu Zhang, Jun Loang, Wei Tang, Gen Li, Yongziang Cai, Wanxing Sheng, "Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and DG penetration" IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 10, pp.1477-1487, Jan, 2018.
- [4] Kang, Seong-Hyun, Lee, Hu-dong, Lee Seong-Doo, Rho, Dea-Seok, "A study on fault analysis of $\pm 35\text{kV}$ MVDC hybrid distribution system using PSCAD/EMTDC", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers 70(8), pp. 1117-1128, Aug. 2021.

강성현 한국전력공사 전력연구원 에너지신소재연구실 선임보연구원
2012년 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2014년~2016년 삼성전기 중앙연구소 선임연구원.
2016년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임(보)연구원.



박병석 한국전력공사 전력연구원 에너지신소재연구실 실장
1995년 한남대 공과대학 대학원 전자공학과(석사).
2012년 한남대 공과대학 대학원 전자정보통신공학과(박사).
1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원.

