

이공학개인기초연구지원사업 최종(결과)보고서

								양식A101
① 부처사업명(대)	기초연구사업					보안등급(보안, 일반)		일반
② 사 업 명(중)	이공학개인기초연구지원사업					공개가능여부(공개, 비공개)		공개
③ 세부사업명(소)								
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초		④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)				비실용화	
⑤ 과 제 명	국 문	ACDC 전력계통의 안정성과 유연성 향상을 위한 HVDC 전력망 설계 및 제어 기반 기술 연구						
	영 문	Design and Control of HVDC for Improving Reliability and Flexibility of AC/DC Power Grid						
⑥ 주관연구기관	연세대학교							
⑦ 협동연구기관								
⑧ 주관연구책임자	성 명	허 건			직급(직위)	부교수		
	소속부서	연세대학교 공과대학			전 공	전기전자공학		
⑨ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y)								
년 도	정부출연금 (A)	기업체부담금			정부외 출연금 (B)	상대국 부담금 (F)	합계 G=(A+B+E)	참여 연구원수
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)				
1차년도	50000			0			50,000	4
2차년도	50000			0			50,000	4
3차년도				0			0	
4차년도				0			0	
5차년도				0			0	
합계	100,000	0	0	0	0	0	100,000	8
⑩ 총연구기간		2016. 11. 01 ~ 2018. 10. 31 (24개월)						
⑪ 다년도협약연구기간		기재하지 않음						
⑫ 당해연도연구기간		2017. 11. 1. ~ 2018. 10. 31. (12개월)						
⑬ 참여기업	중소기업수	대기업수		기타		계		
						0		
⑭ 국제공동연구	상대국연구기관수		상대국연구개발비		상대국연구책임자수			
<p>관계 규정과 모든 지시사항을 준수하면서 국가연구개발사업에 따라 수행 중인 연구개발과제의 최종보고서를 붙임과 같이 제출 합니다.</p> <p style="text-align: center;">2018년 11월 15 일</p> <p style="text-align: center;">주관연구책임자 : 허 건</p> <p style="text-align: center;">주관연구기관장 : 이 원 용</p>								

※ 전자접수이므로 주관연구책임자 및 주관연구기관장 서명(인, 직인)은 생략

양식 A202

※ 표양식 변경 및 삭제불가능하며 이미지, 수식, 표의 삽입을 금지하고 특수문자 기호는 전각기호만을 이용하여 작성함
※ 본 요약문은 정보제공용으로 활용되므로 핵심적인 내용을 중심으로 이해하기 쉽도록 기재하고 한 장 이내로 작성함

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	3
2. 연구수행내용 및 연구결과	3
3. 연구개발결과의 중요성	7
4. 참고문헌	8
5. 연구성과	8

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 필요성

8차 전력수급기본계획에 따르면 정책성 전원인 신재생에너지는 3020 계획에 따라 기준 발전량 비중 20%, 발전설비 비중 33.7%까지 확대될 예정이며, 그 중 풍력과 태양광 비중이 전체 신재생전원의 약 87.6%를 차지할 전망이다. 이런 변화로부터 신재생 발전기와 HVDC, FACTS 등 능동형 전력전자를 사용한 전력기기가 증가할 것으로 예상된다. 한편, 신재생 에너지 발전의 증가는 출력 변동성에 따른 계통 운영의 불확실성과 복잡성을 증대시키고, 제어 응답성이 높은 kHz 단위의 고주파 스위칭의 컨버터를 기반으로 하는 발전기의 확대에 따른 전력 품질 및 안정도 관점에서 계통 동적특성의 큰 변화를 야기할 것으로 예상된다. 따라서 AC와 DC 시스템이 혼재된 하이브리드 전력계통에 대한 체계적인 분석과 모델링, 제어 및 운영 기법을 개발해야 한다.

나. 가설 및 최종목표

- 가변 전원의 증가로 인한 복잡한 AC/DC 하이브리드 전력계통의 SCR 변화가 초래될 것임
 - AC/DC 하이브리드 미래전력계통 모델링 및 상호간섭 분석
- 능동형 전력전자 기반의 특수설비로 인한 기존 계통과의 상호영향성이 증가할 것임
 - 안정적인 미래전력계통 운영이 가능하도록 SSTI 현상 분석 및 해석 방법 개발
- 미래전력계통의 안정도와 전력품질의 저하 문제가 발생할 것임
 - 고조파 안정도 분석과 제어 상호작용에 대한 소신호 분석
- 안정도 향상을 위한 특수설비의 제어 및 운영 기법 개발이 필요할 것임
 - 안정도 향상을 위한 HVDC 설계 기법 연구 및 제어 기법 연구
- 기존 AC 시스템과 다른 DC 계통에서 발생한 사고에 대한 영향성 변화가 발생할 것임
 - DC 차단기 연구 및 HVDC의 토폴로지를 활용한 DC 고장 전류 차단 효과 검증

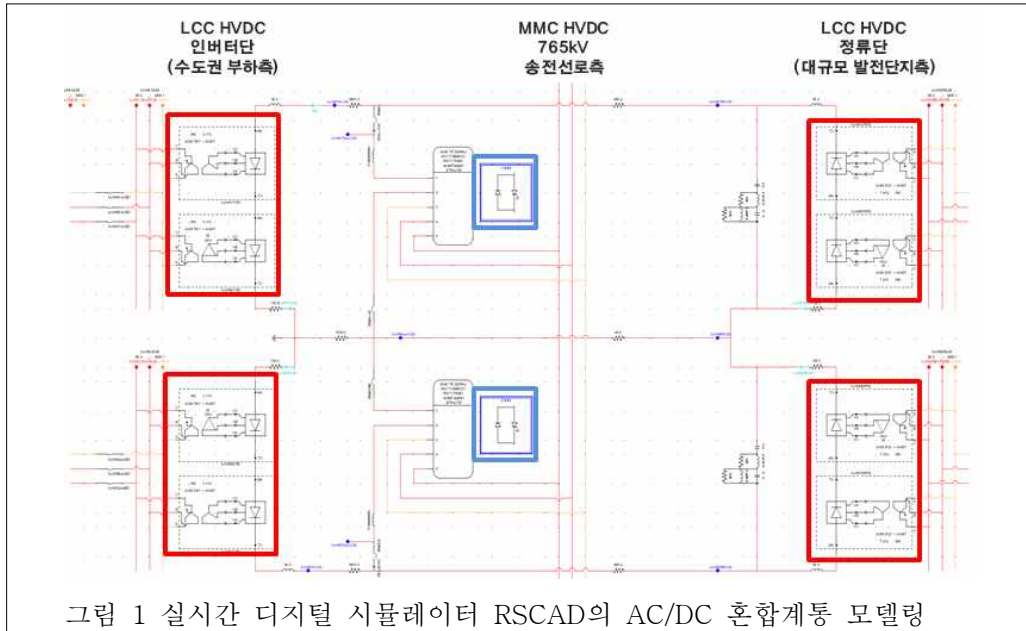
다. 연구범위

- EMT 시뮬레이션을 활용한 미래전력계통에 대한 모델링과 과도상태 해석
 - PSCAD를 사용하여 전력전자 기반 특수설비의 상세 모델링 및 제어기 개발
 - MATLAB을 활용하여 현상 분석 및 수치해석
- 실시간 디지털 시뮬레이터를 활용한 MTDC 모델링 및 사고 모의
 - RTDS 장비를 활용하여 MTDC 연구 및 Co-Simulation 방법(TSAT+RTDS)을 활용하기 위한 기반 마련
- EMT 기반 연구를 바탕으로 하드웨어 테스트 실행
 - MMC HVDC 시스템의 DC 고장전류 차단 성능을 검증하기 위한 하드웨어 설계 및 효과 검증

2. 연구수행내용 및 연구결과

- ▣ AC 계통과 DC 계통의 특성이 반영된 AC/DC 혼합계통 모델링 및 분석
 - 전류형/전압형 HVDC 시스템을 결합한 하이브리드 MTDC 구성

- 3터미널 구조를 기반으로 하여, 765kV 송전선로 사고 시에 우회할 수 있도록 양방향 전력제어가 가능한 MMC-HVDC 설치
- Double bi-pole 전류형 HVDC 구조에 DC 측에 Double bi-pole MMC-HVDC 연결
- 정류단은 AC 계통 쪽에 대규모 발전원 위치
- 인버터단은 AC 계통 쪽에 대규모 수도권 부하 위치



- 전류형/전압형 HVDC 시스템을 결합한 하이브리드 MTDC 사고 모의
 - 전압형 HVDC 시스템을 이용한 765kV 선로의 전압 안정도 향상 효과 검증 완료
 - MMC HVDC의 협조제어를 통한 전류형 HVDC의 동작 지점 변경이 가능하여 Commutation Failure를 회피

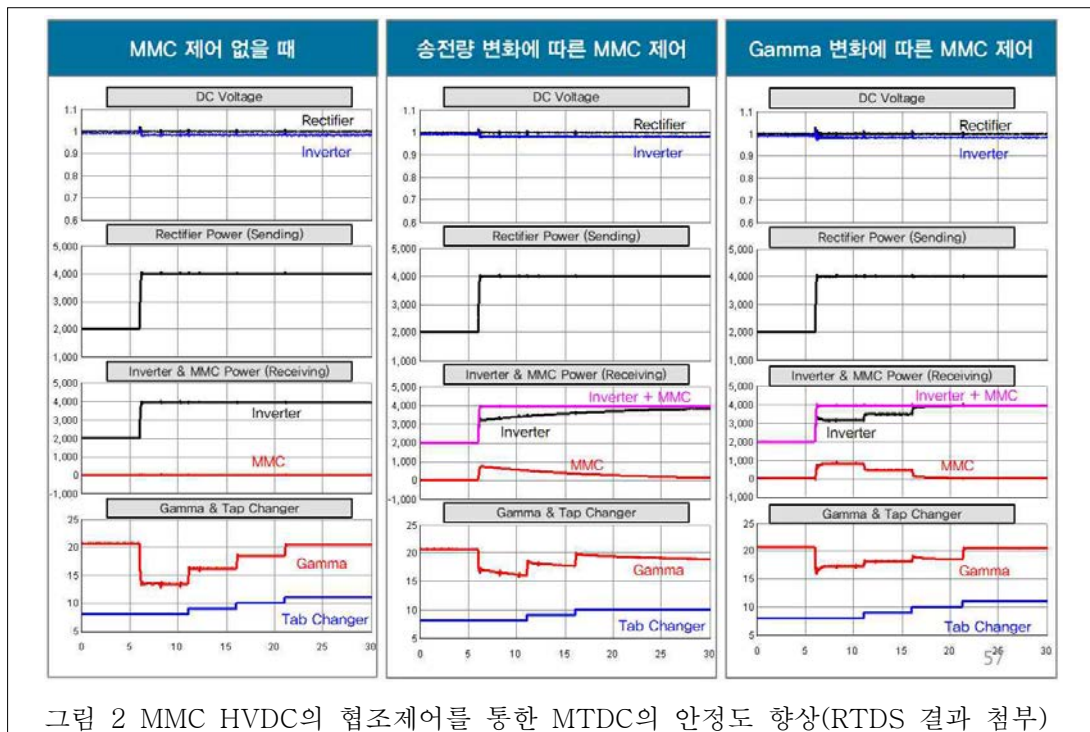


그림 2 MMC HVDC의 협조제어를 통한 MTDC의 안정도 향상(RTDS 결과 첨부)

- AC와 DC가 혼재된 하이브리드 계통의 상호작용 분석
 - 전압형/전류형 HVDC 시스템의 Multi-infeed 계통 모델링(PSCAD/EMTDC 활용)
 - 전류형/전압형 HVDC 시스템의 제어 및 운영 기술 적용
 - Short-circuit ratio (SCR)에 따른 HVDC 시스템이 연계된 AC/DC 계통의 MPC 분석

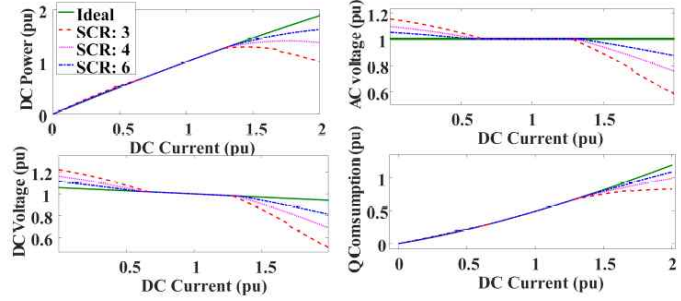
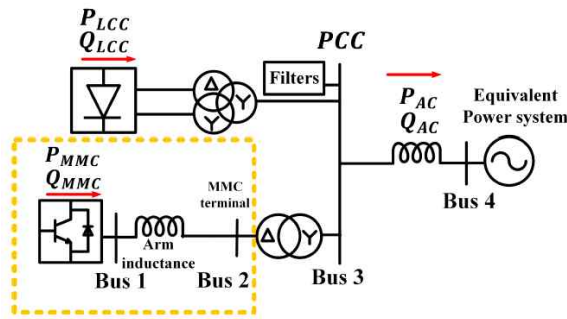


그림 3 전압형과 전류형 HVDC의 계통 연계 그림 4 무효전력 공급과 HVDC시스템 연계 MPC 분석

■ AC와 DC 혼합 계통의 상호 간섭에 대한 영향성 분석

- 능동형 전력전자 기반 특수 설비로 인한 SSTI 현상 분석 및 해석 방법 개발

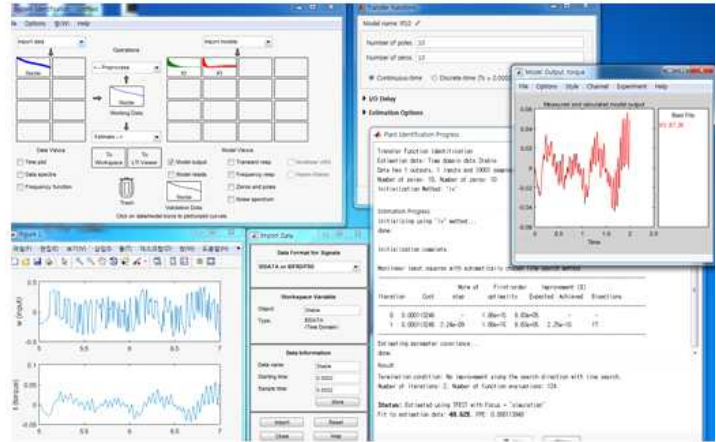
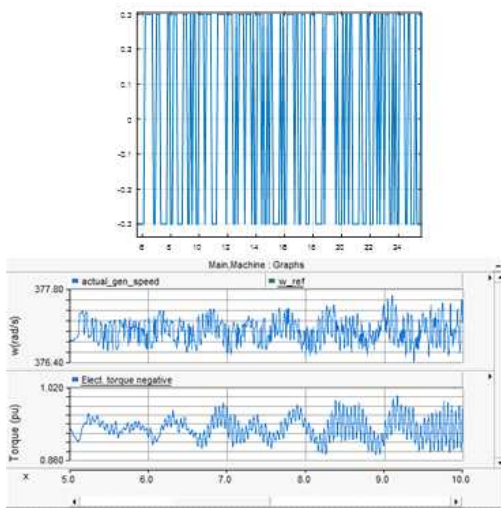


그림 5 Multi-Mass 데이터와 병렬 보상장치 모델링을 통한 시뮬레이션과 Matlab으로 생성한 섭동 신호를 이용한 소신호 해석 방법(터빈 발전기의 전기적 댐핑을 계산)

■ 약한 전력계통의 안정도 향상을 위한 MMC-HVDC 시스템의 설계 기법 연구

- MMC-HVDC 시스템의 동작 범위 분석

$$P_{region}(\rho) \leq \frac{\Delta E_{max} S_{MMC} \cos(\rho)}{\max |e_u(t, \rho)|}$$

$$Q_{region}(\rho) \leq \frac{\Delta E_{max} S_{MMC} \sin(\rho)}{\max |e_u(t, \rho)|}$$

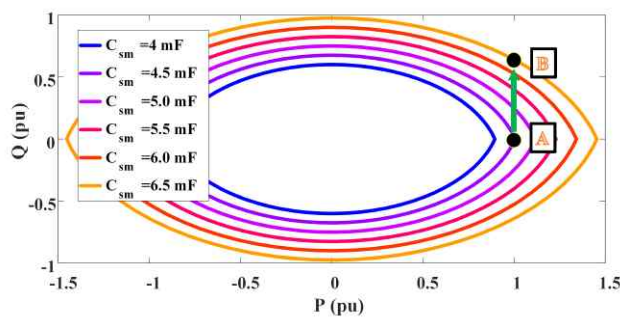


그림 6 MMC의 커패시턴스에 따른 MPQC

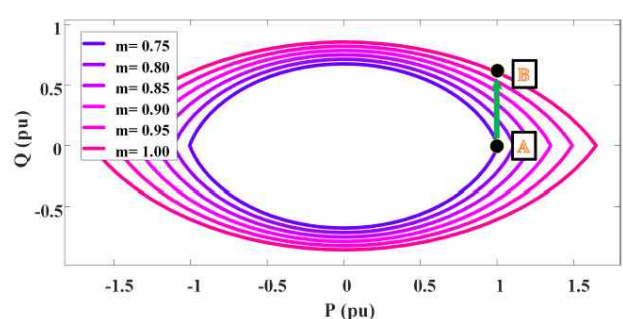


그림 7 MMC의 Modulation Index에 따른 MPQC

- MMC HVDC 시스템 연계를 위한 PQ 로딩 분석

$$J_1 = \begin{bmatrix} \partial P_1 / \partial \delta_1 & \partial P_1 / \partial \delta_2 & \partial P_1 / \partial \delta_3 \\ \partial P_2 / \partial \delta_1 & \partial P_2 / \partial \delta_2 & \partial P_2 / \partial \delta_3 \\ \partial P_3 / \partial \delta_1 & \partial P_3 / \partial \delta_2 & \partial P_3 / \partial \delta_3 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} \partial Q_1 / \partial V_1 & \partial Q_1 / \partial V_2 \\ \partial Q_2 / \partial V_1 & \partial Q_2 / \partial V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix}$$

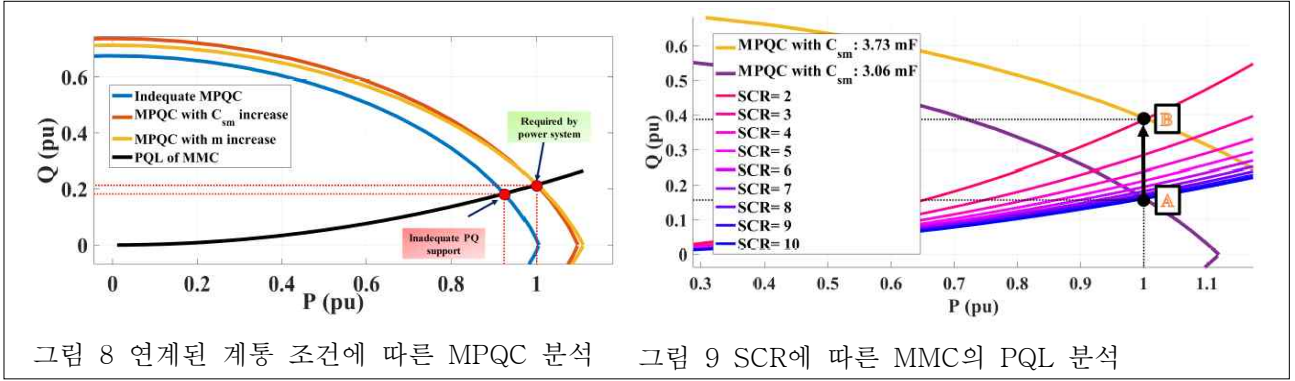


그림 8 연계된 계통 조건에 따른 MPQC 분석

그림 9 SCR에 따른 MMC의 PQL 분석

- 안정도 향상을 위한 MMC-HVDC 설계 기법을 적용하기 위한 계통 검증(PSCAD/EMTC 시뮬레이션)
- 제주 전력계통은 신재생에너지원의 증가와 전류형/전압형 HVDC 시스템이 동시에 연계되어 운전될 것으로 예상되는 미래전력계통으로 설계 기법을 검증하기 위해서 선정함

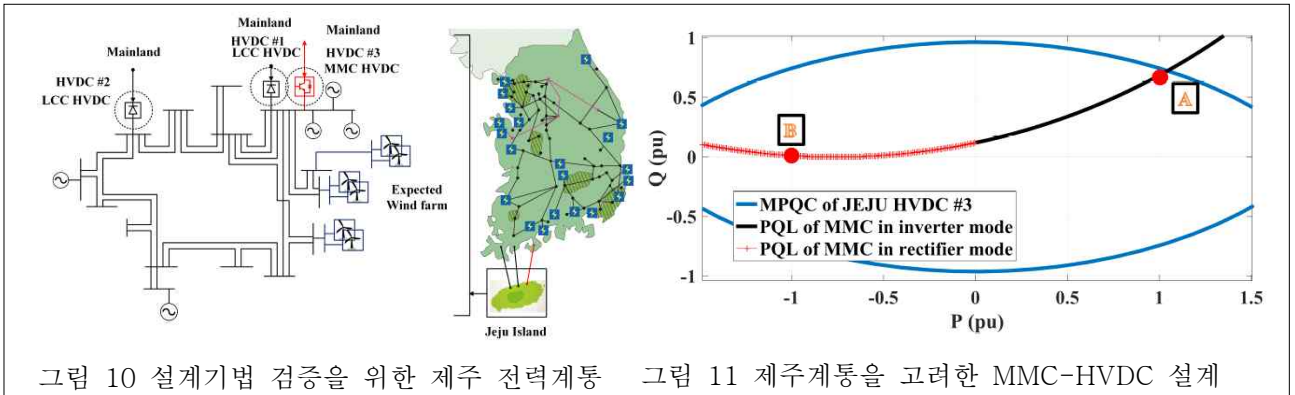


그림 10 설계기법 검증을 위한 제주 전력계통

그림 11 제주계통을 고려한 MMC-HVDC 설계

- MMC-HVDC 시스템의 관성에너지 제공 제어를 통한 주파수 안정도 향상과 MMC 관성에너지 수치화

$$W_{MMC} = \frac{1}{2} C_{SM} v_{SM,avg}^2 \times (6 \cdot N_{SM})$$

$$= 3 C_{SM} N_{SM} \frac{V_{DC}^2}{n_{level}^2}$$

$$W_{MMC, N_{level}} = 3 C_{SM} N_{SM} \frac{V_{DC}^2}{N_{level}^2}$$

$$\Delta W_{MMC} = \frac{3 N_{SM} C_{SM} V_{DC}^2}{N_{level}^2} \left(1 - \frac{1}{1.265^2} \right)$$

$$= W_{MMC, N_{level}} \left(1 - \frac{1}{1.265^2} \right)$$

$$\approx 0.375 \times W_{MMC, N_{level}}$$

$$H_{MMC} \approx \frac{0.375 \times W_{MMC, N_{level}}}{K_f \cdot S_{MMC}}$$

그림 12 MMC 관성에너지 수치화

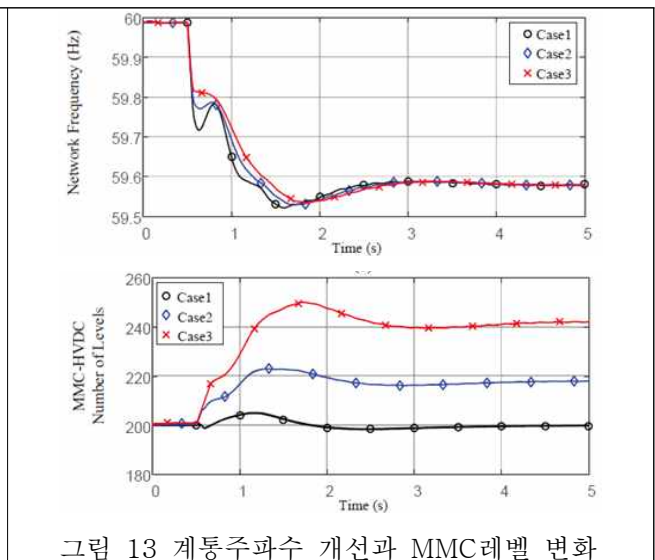


그림 13 계통주파수 개선과 MMC레벨 변화

- 능동형 전력전자의 제어 상호 영향성 분석을 위한 소신호 분석(임피던스 분석 기법 활용)

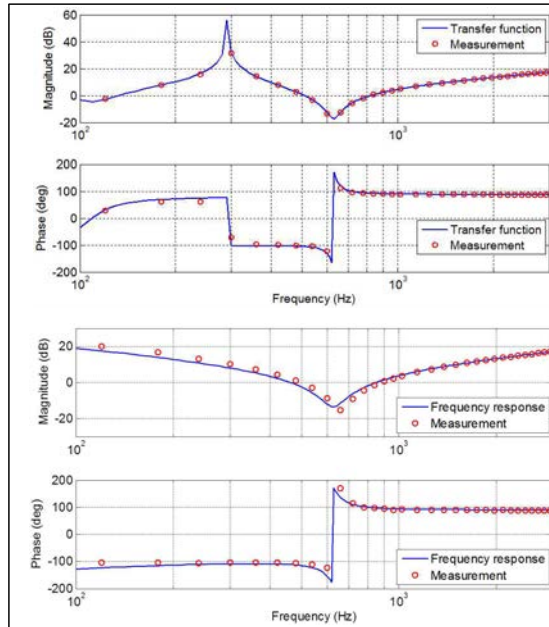


그림 14 PR제어기와 PI 제어기의 활용한 전압형 HVDC 시스템의 임피던스 해석 및 측정 기반 임피던스 추정 결과

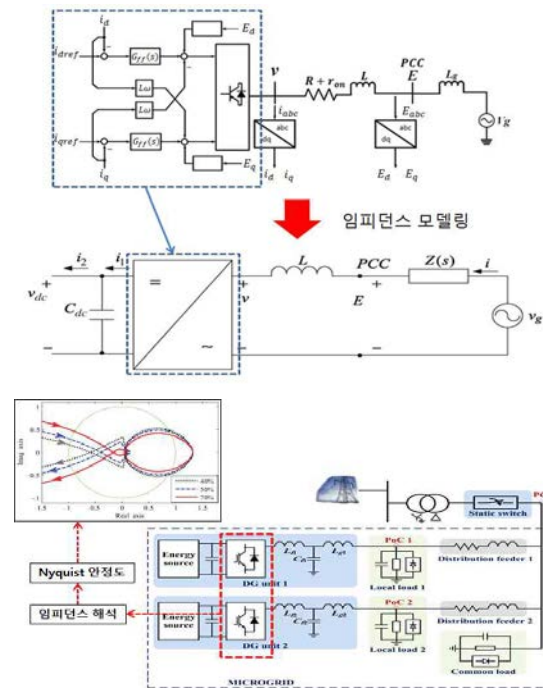


그림 15 임피던스 기반 고조파 안정도 분석

- DC 차단기 연구와 MMC-HVDC 시스템의 DC 고장 전류 차단 토폴로지 검증(특허 출원 및 등록)

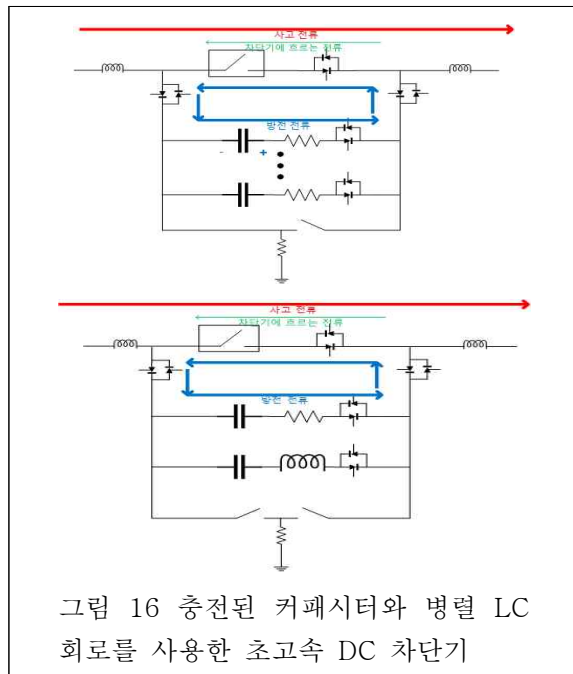


그림 16 충전된 커패시터와 병렬 LC 회로를 사용한 초고속 DC 차단기



그림 17 DC 고장 전류 차단 검증(하드웨어 실험)

3. 연구개발결과의 중요성

■ 전력전자 기반의 신재생에너지원 보급이 확대됨에 따라 ABB, Siemens 등과 같은 해외 기업들뿐만 아니라 유럽과 미국의 다수 대학 및 연구기관에서는 향후 미래전력계통에 대한 안정적인 운영과 안정도 향상에 대비하여 관련 설계 및 제어 기법을 개발하여 상용화 하고 있다. 본 연구결과를 바탕으로 테스트베드 구축 및 검증 단계로 연구가 발전되고 상용 개발되어 활용된다면 전력전자 기반의 변동성 재생 에너지원의 안정적 확대와 연계 계통의 전력품질 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

- [1] Qing-Chang Zhong, Tomas Hornik, "Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration", John Wiley & Sons, Ltd, 16 Nov, 2012.
- [2] Dirk Van Hertem, Oriol Gomis-Bellmunt, Jun Liang, "HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future", Wiley Online Library, 5 March, 2016.
- [3] Y X Chen, "Review of the development of multi-terminal HVDC and DC power grid", IOP conference, 2017.
- [4] R. L. Lee, D. J. Melvold, D. J. Szumlans, L. M. Le, A. T. Finley, D. E. Martin, W. K. Wong, and D. L. Dickmader, "Potential DC system support to enhance ac system performance in the western united states," IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 264-274, Feb 1993.
- [5] Kalle Ilves, Staffan Norrga, Lennart Harnefors, and Hand-Peter Nee, "On energy storage requirements in modular multilevel converters," in IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 1, pp. 77-88, Jan. 2014.
- [6] Lennart Harnefors, "Analysis of Subsynchronous Torsional Interaction With Power Electronics Converters", in IEEE Trans. Power Systems, Vol. 22, no. 1, pp. 305-313, Feb 2007.
- [7] 김성종, 윤민한, 황성철, 장길수, "제주계통에서의 MIESCR을 고려한 HVDC 연계 시 전압 특성 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2014.
- [8] Suman Debnath, Madhu Chinthavali, "Control of MMC-HVDC in low-inertia weak grids", in IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Feb 2017.
- [9] Youngho Cho, Kyeon Hur, Yong Cheol Kang, Eduard Muljadi, "Impedance-Based Stability Analysis in Grid Interconnection Impact Study Owing to the Increased Adoption of Converter-Interfaced Generators", in Energies, July 2017.
- [10] Jiabing Hu, Rong Zeng, Zhiyuan He, "DC fault ride-through of MMCs for HVDC systems: a review", in The journal of Engineering, pp. 321-331, Sep 2016.

5. 연구성과

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2016R1 D1A1B0 3930582	201612	Evaluation of Conservation Voltage Reduction with Analytic Hierarchy Process: A Decision Support Framework in Grid Operations Planning	An, Kyungsung; Liu, Hao Jan; Zhu, Hao; Dong, Zhao Yang; Hur, Kyeon;	SCI	ENERGIES	9(12)	국외	SCI등재	2.262	예	50

2016R1 D1A1B0 3930582	201805	Computing Safety Margins of a Generation Rejection Scheme: A Framework for Online Implementation	Min, Daham; Kim, Seog-Joo ; Seo, Sangsoo; Moon, Young-H wan; Sun, Kai; Chow, Joe H.; Hur, Kyeon;	SCI	IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID	9(3)	국외	SCI등재	7.364	예	50
-----------------------------	--------	--	---	-----	--	------	----	-------	-------	---	----

지식재산권 성과정보										
과제번호	출원등록연 월	재산 권구 분	출원등록 구분	발명제목	출원등록인	출원등록국	발명자명	출원등록번 호	활용형태	기여도
2016R1D1A1 B03930582	20161107	특허	출원	충전된 커패시터와 병 렬 LC 회로를 사용한 초고속 차단기	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민, 이충만, 니중서	10-2016-0 147460	보유기관 자체활용	40
2016R1D1A1 B03930582	20161107	특허	출원	충전된 커패시터와 직 렬 인덕터를 사용한 초고속 DC 차단기	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 김상민, 강재식, 이충만, 니중서	10-2016-0 147486	보유기관 자체활용	40
2016R1D1A1 B03930582	20170410	특허	출원	모듈러 멀티레벨 컨버 터의 동작 확인 시험 장치 및 방법	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민, 이충만, 니중서	102017004 6176	보유기관 자체활용	100
2016R1D1A1 B03930582	20171228	특허	출원	전력 계통주파수 변동 저감을 위한 모듈러 멀티레벨 컨버터의 출 력레벨 제어방법	연세대학교 산학협력단, 주식회사 효 성	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민	10-2017-0 183190	기술이전 준비중	20

2016R1D1A1 B03930582	20180625	특허	등록	충전된 커패시터와 병렬 LC 회로를 사용한 초고속 DC 차단기 (High Speed DC Circuit Breaker using Charging Capacitor and Parallel LC Circuit)	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민, 이충만, 나중서	10-1872869-0000	보유기관 자체활용	40
2016R1D1A1 B03930582	20180625	특허	등록	충전된 커패시터와 직렬 인덕터를 사용한 초고속 DC 차단기 (High Speed DC Circuit Breaker using Charging Capacitor and Series Inductor)	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민, 이충만, 나중서	10-1872873-0000	보유기관 자체활용	40
2016R1D1A1 B03930582	20180802	특허	등록	모듈러 멀티레벨 컨버터의 동작 확인 시험 장치 및 방법 (Apparatus and method for testing operation of modular multi-level converter)	연세대학교 산학협력단	대한민국	허건, 김희진, 강재식, 김상민, 이충만, 나중서	10-1886804-0000	기술이전 준비중	50

국제학술대회 초청강연실적 성과정보

과제번호	발표연월	학술대회명	발표자	강연주제	개최국
2016R1D1A1 B03930582	201707	2017 IEEE PES GENERAL MEETING	허건	Jeju No. 2 HVDC Planning and Operation	대한민국

학술대회 논문발표 성과정보						
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국
2016R1D1A1B 03930582	201804	춘계학술대회	문재민	동적 부하모델의 전력계통 단기 전압안정도 영향성 분석	국내학술대회	대한민국
2016R1D1A1B 03930582	201804	춘계학술대회	김동혁	배전계통에서 태양광 발전 의 호스팅 용량 증대를 위 한 최적의 전압/무효전력 제어	국내학술대회	대한민국
2016R1D1A1B 03930582	201710	7th International conference on advanced power system automation & Protection	강재식, 김희진, 김상민, 니종서, 정홍주, 이동수, 허건	DC Fault Fast Detection Using Arm Current of MMC in HVDC System and Post-Fault Recovery Strategy	국제학술대회	대한민국
2016R1D1A1B 03930582	201710	7th International conference on advanced power system automation and protection	Nehal Helaly, 심 재웅, 허건	Unbalanced voltage compensation under asymmetrical fault conditions using a model predictive control method	국제학술대회	대한민국
2016R1D1A1B 03930582	201712	IEEE Power Electronics and Drive Systems	강재식, 김희진, 허건, 정홍주, 이 동수	Fault-tolerant operation scheme for modular multilevel converter under arm energy imbalance	국제학술대회	미국
2016R1D1A1B 03930582	201806	International conference on electrical engineering	임세환	Control strategy of multiple PV-STATCOMs for grid security considering PV's capacity	국제학술대회	대한민국

수상실적 성과정보							
과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2016R1D1A1B 03930582	201706	Best Paper Award	Hee jin Kim, Jongseo Na, Kyeon Hur	International Conference on Power Systems Transients	International Conference on Power Systems Transients	대한민국	
2016R1D1A1B 03930582	201804	논문상	문재민	연세대학교	대한전기학회	대한민국	2018년도 춘계학술 대회에서 발표된 논 문 중 우수 논문으 로 선정

학위배출인력 성과정보							
과제번호	학위취득연월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2016R1D1A1B03930582	201708	박사	민다함	남성	연세대학교	전기전자공학	취업(박사후 연구원 포함)
2016R1D1A1B03930582	201708	박사	안경성	남성	연세대학교	전기전자공학과	취업(박사후 연구원 포함)
2016R1D1A1B03930582	201802	박사	조영호	남성	연세대학교	전기전자공학부	취업(박사후 연구원 포함)
2016R1D1A1B03930582	201802	박사	김재경	남성	연세대학교	전기전자공학부	취업(박사후 연구원 포함)

학술회의 개최 성과정보									
과제번호	개최기간	학술회의명	규모			발표자		개최장소	지원금액
			참가국	참가인원	학술회의구분	내국인	외국인		
2016R1D1A1B03930582	20171116~20171119	Korea-China Joint Workshop on Renewable Energy Grid Integration	2	70		6	4		3,471,240