

16-12-N0101-07

스마트그리드 기반의 차세대 전력망 기술 개발

Development of the Advanced Power Grid
Technology based on Smart Grid

IEC 61850 기반 스마트 분산전원 통합 관리
기술 개발

Development of Smart DER coordinated management technology based on IEC 61850 standards

한국전기연구원

국가과학기술연구회

제 출 문

국가과학기술연구회 이사장 귀하

본 보고서를 “IEC 61850 기반 스마트 분산전원 통합 관리 기술 개발”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2017. 01.

주관연구기관명 : 한국전기연구원

참여기업명 :

위탁기관명 : 경남대학교

주관연구책임자 : 조창희

연 구 원 : 이재덕

" : 김경훈

" : 정성환

" : 김윤수

" : 손완빈

" : 김철우

" : 백지국

" : 도미림

" : 황철상

" : 임성일

" : 최면송

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2015. 1. 1 ~ 2016. 12. 31	단계 구분	(1단계) / (총1단계)
연구사업명	한국전기연구원 주요사업				
연구과제명	대과제명	스마트그리드 기반의 차세대 전력망 기술 개발			
	세부과제명	IEC 61850 기반 스마트 분산전원 통합 관리 기술 개발			
연구책임자	조창희	해당단계 참여연구원수	총 : 9 명 내부 : 5 명 외부 : 4 명	해당단계 연구비	정부: 1,405 천원 기업: 천원 계: 1,405 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국전기연구원 차세대전력망연구본부	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 : 경남대학교	연구책임자 : 임성일			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)			보고서 면수	117	
<p>◆ IEC 61850 기반의 스마트 분산전원 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 → 국제 표준 정보모델 및 정보교환 모델 구현 - 스마트 분산전원 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 스마트 분산전원 시뮬레이션 모델 개발 → 스마트 분산전원 개발환경 구축 → 어드밴스드 인버터 기본 기능 구현 <ul style="list-style-type: none"> (직접제어, 모드제어, 무효전력제어) 					
<p>◆ IEC 61850 기반의 분산전원 통합관리 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 분산전원 기능 보완 및 시험 <ul style="list-style-type: none"> → 어드밴스드 인버터 고급 기능 구현 <ul style="list-style-type: none"> (주파수제어, LVRT제어) - IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 스마트 분산전원 계통 안정화 최적 설정 모의 → IEC 61850기반 통합관리 프로그램 개발 → 스마트 분산전원 통합관리 알고리즘 개발 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	스마트 분산전원, 스마트 인버터, 통합관리, IEC 61850			
	영어	Smart DER, Smart Inverter, Integrated Management, IEC 61850			

요 약 문

I. 제 목

IEC 61850 기반 스마트 분산전원 통합 관리 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 문명과 산업의 발전에 따라 전기 에너지의 수요는 점점 증가되고 있는 추세이며 기존의 중앙 집중식 발전소에서 송, 배전망을 통해서 수용가까지 전력을 공급하는 일방적인 전력 공급의 형태가 소비자가 직접 전력을 생산하며 소비하는 에너지 프로슈머의 개념이 도입되면서 에너지 패러다임의 변화가 일어나고 있음
- 선진국의 온실가스 감축이 주요 내용인 기존 기후변화 협약에서 탈피하여 2015년 파리 당사자 회의 (COP21)에서 결정된 신 기후체제는 2021년 이후부터 개발 도상국을 포함하는 모든 당사국들의 온실가스 감축 의무를 부과하고 있음
- 온실가스 저감은 필연적으로 신재생 에너지 전원의 도입 확대를 필요로 하며 미국 및 유럽 등에서는 신재생 분산전원의 설치 용량이 증가함에 따라서 전력 계통이 이를 수용할 수 있는 한계 용량에 가까워지고 있음
- 그 결과로 신재생 분산전원의 전력 계통에의 투입 확대를 위해 계통 상황에 따라 유무효전력을 자동으로 조절할 수 있는 스마트 분산전원의 필요성이 대두되고 있음
- 분산전원의 표준화된 정보 모델에 따른 접근과 제어는 전력설비 자동화를 위한 국제 표준 규격인 IEC 61850에서 정의하고 있으며 스마트 인버터의 첨단 인버터 기능(Advanced Inverter Function)에 대한 정의와 정보 모델을 포함함
- 변전소 자동화 프로토콜로 2005년에 국제표준으로 완료된 IEC 61850은 범위를 최근 일부 파트에서 2판(Ed.2)이 발간하면서 제목을 “Communication Networks and Systems for Power Utility Automation”로 변경하여 전력산업 전반을 위한 표준임을 명시함
- 기존의 변전소 자동화를 위한 전력설비 간 인터페이스(IEC 61850)에서 변전소간 인터페이스(-90-1), 상위시스템과 변전소간의 인터페이스(-80-1), 풍력발전 관련 설비 인터페이스(IEC 61400-25), 수력 발전 설비 인터페이스(-7-410), 분산전원

인터페이스(-7-420)의 표준으로 그 적용 영역이 점점 확대되고 있음

- 신재생 분산전원 관련하여서는, 신재생의 도입확대와 더불어서 사고 발생 시 계통에서 일제히 탈락되는 문제, 배전망의 과전압 문제, 전력품질 문제, 전력계통 보호 문제 등을 해결할 필요가 있음
- 이를 목적으로 원격 통신에 의한 분산전원 직접제어나, 전압-무효전력 제어, 주파수 제어, LVRT 제어로 대표되는 첨단 인버터 기능을 IEC 61850-90-7에서 정의하였고 구현 방식과 필요한 표준 정보모델을 제안함
- 2020년까지 총에너지 공급량의 33%를 신재생전원으로 공급목표인 캘리포니아에서는 캘리포니아 공공 위원회 (CPUC, California Public Utilities Commission)가 주도적으로 스마트 인버터(분산전원) 관련 기술을 전력회사(SCE, SDGE, PG&E)와 국가 연구소 등 관련 기관(NREL, EPRI, TUV Rheinland, SunSpec Alliance)들과 공동 개발 중임
- 그러나 스마트 분산전원 기술은 아직까지 첨단 인버터 기능의 정의와 구현 방법, 정보 모델링, 그리고 기능을 시험하기 위한 절차 등 기능의 동작과 확인을 위한 기초 개발 단계임
- 개별 스마트 분산전원의 최적 설정과 더불어서 전체 배전망 또는 마이크로그리드의 효율, 안정성 그리고 신뢰도를 높이는 스마트 분산전원의 설정과 제어에 대해 연구는 아직 사례가 없으며 특히 기존의 배전망 제어나 마이크로그리드의 다른 제어 방식과 어떻게 조합하는 것이 최선인지에 대한 연구가 절실히

III. 연구개발의 내용 및 범위

- IEC 61850 기반의 스마트 분산전원 개발
 - 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발
 - 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스
 - 국제 표준 정보모델 및 정보교환 모델 구현
 - 스마트 분산전원 개발
 - 스마트 분산전원 시뮬레이션 모델 개발
 - 스마트 분산전원 개발환경 구축
 - 어드밴스드 인버터 기본 기능 구현
 - (직접제어, 모드제어, 무효전력제어)
- IEC 61850 기반의 분산전원 통합관리 시스템 개발
 - 스마트 분산전원 기능 보완 및 시험
 - 어드밴스드 인버터 고급 기능 구현
 - (주파수제어, LVRT제어)
 - IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템 개발

- 스마트 분산전원 계통 안정화 최적 설정 모의
 →IEC 61850기반 통합관리 프로그램 개발
 →스마트 분산전원 통합관리 알고리즘 개발

IV. 연구개발결과

가. 정량적 성과

구분	산업재산권				논문제출				기술료 계약 (백만원)	기타 전시회 참가 2건 언론 홍보 2건		
	특허출원		프로그램등록		SCI (SCIE 포함)		기타 논문					
	국내	국외	국내	국외	상위 20%	전체 SCI	국내	국외				
건/편	3		2			1		0				

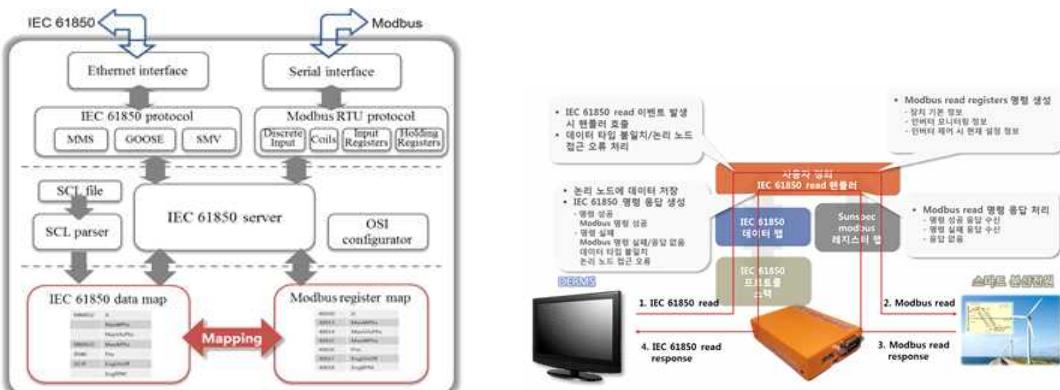
* 기타: 기술지원(건), 기술교육(건), 정책/제도(건), 언론홍보(건) 등 정량적으로 표현될 수 있는 성과

나. 1차 년도 성과 상세내용 (질적 우수성 중심으로 작성)

■ 스마트 분산전원용 IEC61850 인터페이스

○ 기 개발된 IEC 61850 인터페이스용 임베디드 모듈 보완 및 인터페이스 시험

- 일반 분산전원용 IEC 61850 인터페이스를 스마트 분산전원용 인터페이스로 수정/보완
- 인터페이스에 스마트 분산전원의 SunSpec Modbus 레지스터 맵 탑재 및 스마트 분산전원 제어 관련 데이터 처리 부분 보완
- 스마트 분산전원 시험 프로그램에서 IEC 61850 기반 읽기, 쓰기 명령 시 인터페이스 모듈에서 Modbus 명령으로 변환하여 스마트 분산전원으로부터 데이터 읽기, 쓰기를 적절하게 수행하는지 통신 Simulator를 이용하여 확인



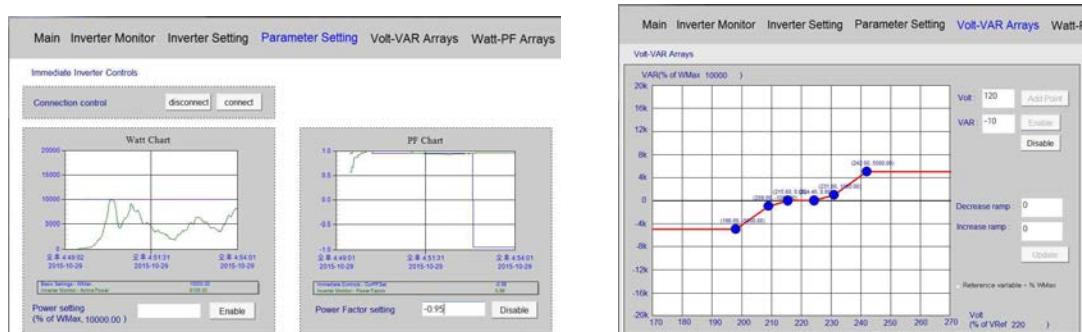
<IEC61850 인터페이스 모듈 구성> <IEC61850 인터페이스 모듈의 정보처리>

- IEC 61850-90-7 및 SunSpec Modbus 표준 분석, 분산전원 표준 데이터 모델 적용 및 상용 인버터 연계 시험
 - IEC 61850-90-7을 분석하여 IEC 61850 표준에서 정의하는 스마트 분산전원의 제어 기능 및 제어 방식에 대해 파악
 - SunSpec Modbus 표준을 분석하고 표준에 따라 스마트 분산전원 데이터 모델링 수행
 - SunSpec 표준이 적용된 상용 스마트 인버터 SMA SUNNY TRIPOWER 12000TL-US 모델을 스마트 분산전원 시험 프로그램을 이용하여 스마트 분산전원의 기능 시험



<스마트 인버터용 IEC61850 정보 모델><스마트 분산전원 통합관리시스템구성안>

- 스마트 분산전원 통합관리 프로그램 초안 개발 (2차년도 목표 선 구현)
 - 스마트 분산전원 기능 테스트를 위하여 Proficy HMI/SCADA-iFIX 프로그램을 이용하여 스마트 분산전원 통합관리 프로그램 개발
 - 스마트 분산전원 통합관리 프로그램에서는 연결된 스마트 분산전원의 기본 정보, 모니터링 정보, 세부 정보, 직접 제어, 곡선 기반 제어 등 SunSpec 표준에서 정의하는 모니터링 및 제어 기능 지원



- 직접제어, 모드변경 화면구성

- 전압-무효전력 제어 화면 구성

<스마트 분산전원 통합관리 프로그램 초안>

■ 스마트 분산전원 기본 기능 구현

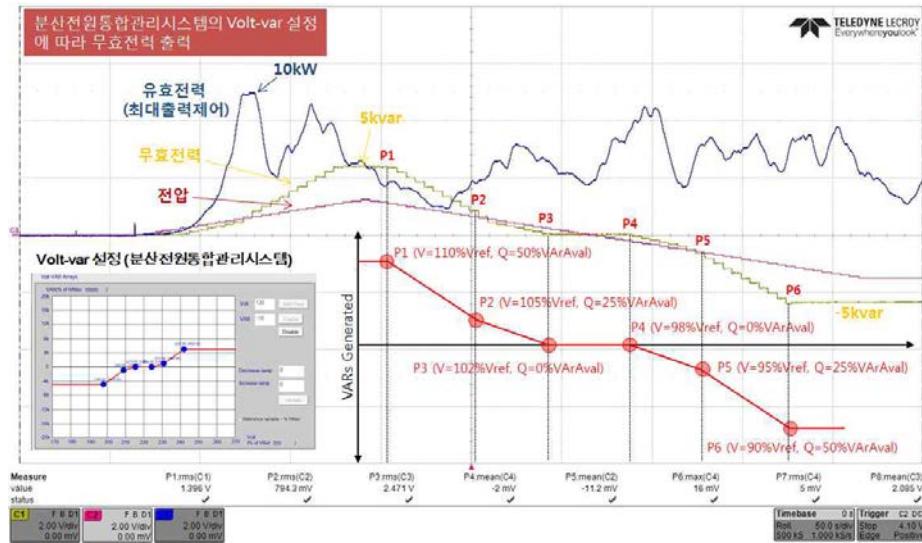
○ 인버터 직접제어 기능 구현

- IEC 61850 통신 방식으로 전력 계통 연계/차단 결정
- 기존 최대 출력 제어기에 출력상한 기능을 추가 구현 (원격 기능on/off, 상한 설정)
- 유효전력 대비 무효전력 설정 값을 계산하여 역률을 제어(원격 기능on/off, 역률 설정)



○ 전압-무효전력 제어 기능

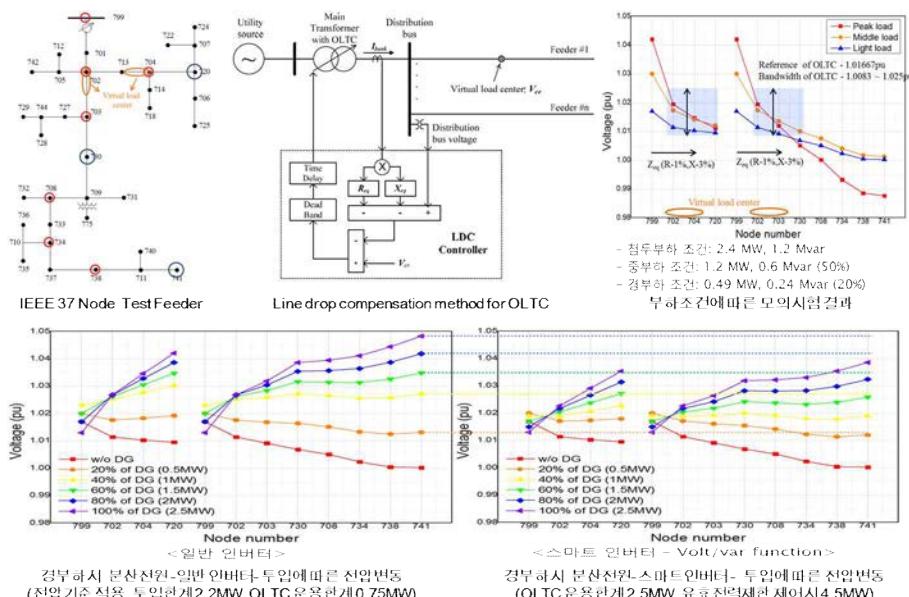
- 분산전원 통합관리시스템을 통해 16 point 까지 전압 대비 무효전력 곡선 설정 가능
- 설정에 따라 전압에 따른 무효전력 출력 확인
- 현재 측정 전압을 임의 변경하여 무효전력 출력을 확인하였으며, 2차 년도에 계통 모의 장치를 이용하여 실제 전압 변동에 따른 출력 제어 성능을 확인할 예정



〈스마트 분산전원 전압-무효전력 제어 기능 시험 결과〉

■ 스마트 분산전원의 배전계통 투입 효과 분석

- PSCAD/EMTDC를 이용한 스마트 인버터 모의 모델 개발 및 시뮬레이션
 - 배전 계통 모의를 위해 OLTC (On-load tap changer)를 고려하여 시뮬레이션 수행
 - IEEE 표준 배전망 (37 Node Test Feeder)을 적용하여 스마트 분산전원 투입 모의시험
 - 모의시험 결과 검토 및 스마트 분산전원의 효과 분석



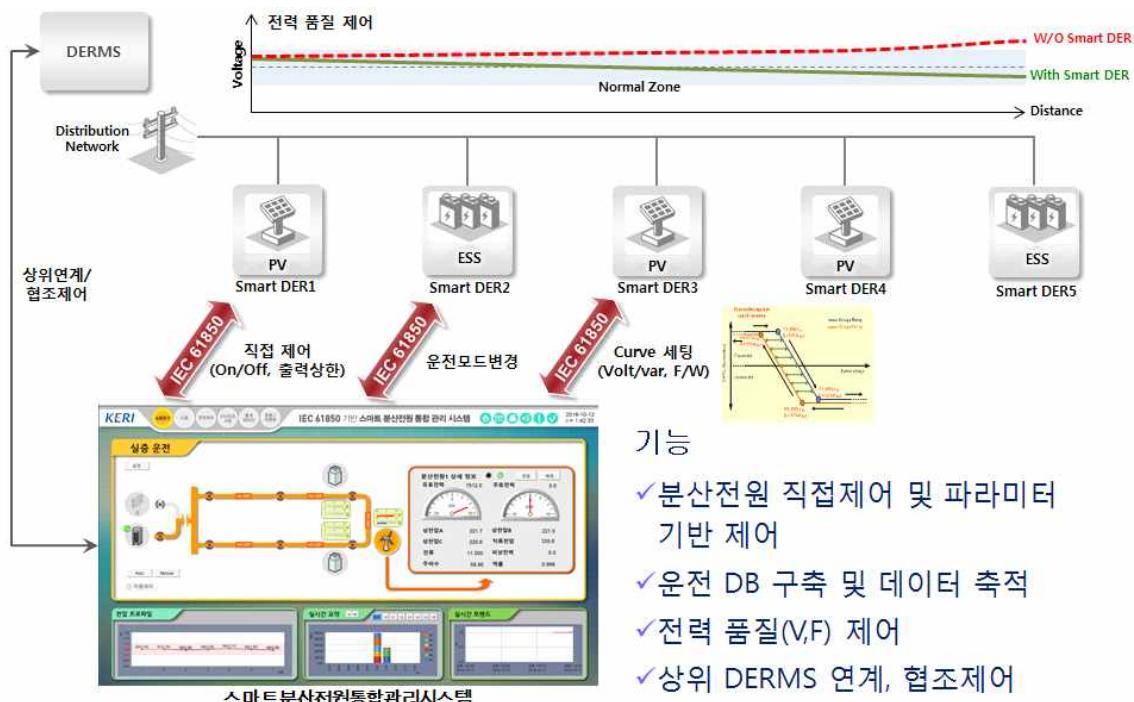
〈IEEE 표준 배전망을 적용한 스마트 분산전원 투입 모의시험 결과〉

다. 2차 년도 성과 상세내용 (질적 우수성 중심으로 작성)

■ 스마트분산전원 통합관리시스템



<그림> 스마트 분산전원 통합관리시스템 기술 개발 내용



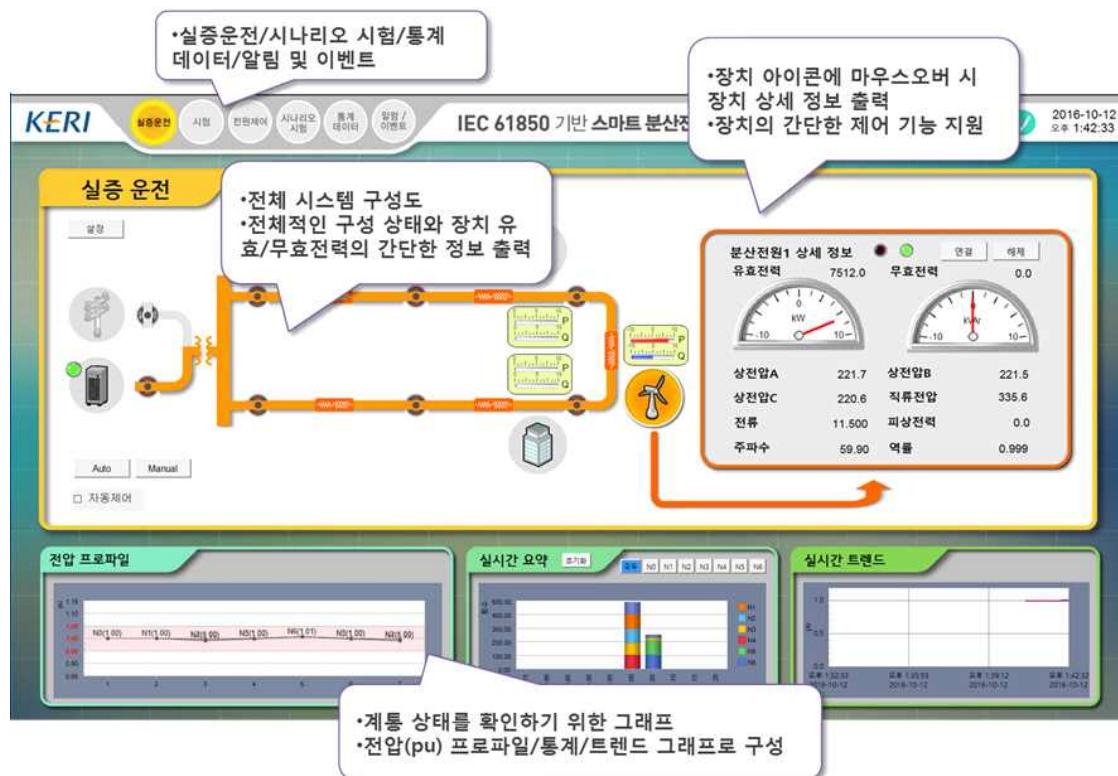
<그림> 스마트 분산전원 통합관리시스템 기술 개념도

○ 스마트 분산전원 통합 관리 시스템 개발

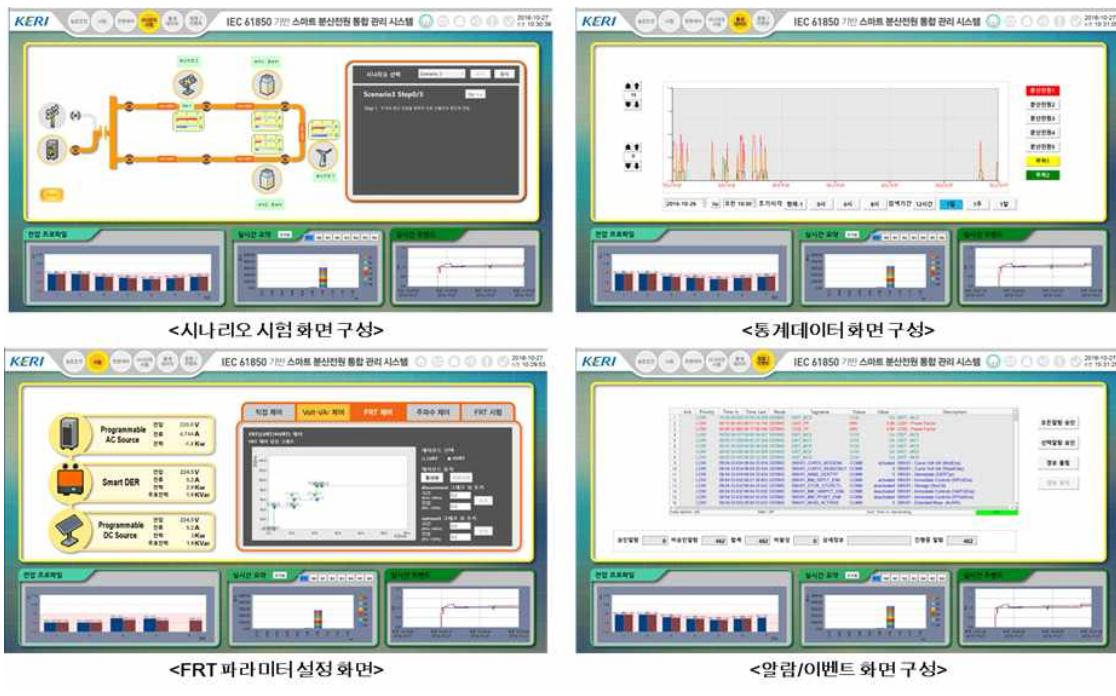
- IEC61850 기반 통합 관리 시스템 기능 설계
 - : 스마트분산전원 직접 제어/간접 제어 기능
 - : 배전 계통 상태 모니터링 기능
 - : 통계 데이터 처리, 알람/이벤트 기능

- 스마트 분산전원 시험 기능
 - : 스마트 분산전원 고급 기능 시험 - Volt/Var 시험, Frequency/Watt 시험, FRT 시험
 - : 스마트 분산전원 효과 검증 시험 (배전 계통 적용 시나리오 구성)
 - : 스마트 분산전원 관리 알고리즘 시험

- 스마트 분산전원 통합관리시스템 UI 디자인
 - : 분산전원 통합 관리 화면
 - : 스마트 인버터 기능 시험 화면
 - : 시나리오 시험 화면

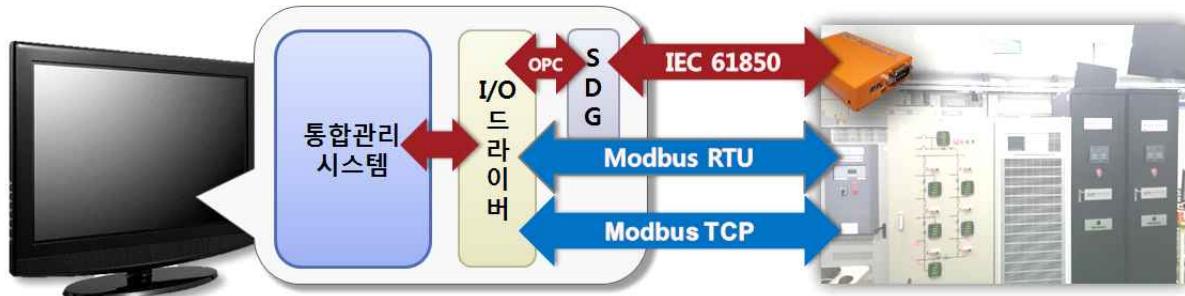


<그림> 스마트 분산전원 통합관리시스템 구성



<그림> 스마트 분산전원 통합관리시스템 - 기능별 화면 구성

- 스마트 분산전원 통합 관리 시스템 통신 환경 구축
 - 통합관리시스템 - 요소장치 간 통신환경 구축
 - : I/O (Modbus RTU, Modbus TCP, OPC¹⁾) Driver 설정
 - : SCADA Data Gateway 설정 (IEC 61850 – OPC 통신 변환)



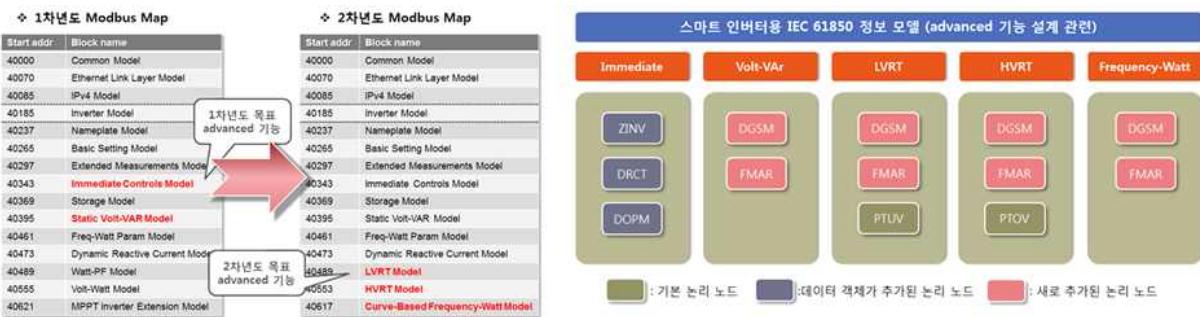
<그림> 스마트 분산전원 통합관리시스템 통신 환경 구축

■ IEC61850 인터페이스 모듈 보완

- 고급 기능 구현을 위한 IEC61850 인터페이스 모듈 보완

- 1) OPC(OLE for Process Control)은 공정(Process)을 제어하는 다양한 장비들 간의 통신을 위한 국제산업 표준

- Fault-ride through, Frequency-Watt 기능 구현을 위한 Sunspec Modbus 레지스터 맵 설정
 - : L/HVRT Model 추가 - IEC61850-90-7 데이터 모델 사용, 전압에 따른 연계/차단 시간 파라미터, 활성화/비활성화
 - : Frequency-Watt Model 추가 - 곡선 기반 Frequency-Watt 기능 구현을 위한 파라미터
- 레지스트 맵 추가 내용에 대한 정보 모델 (SCL 파일) 재설계

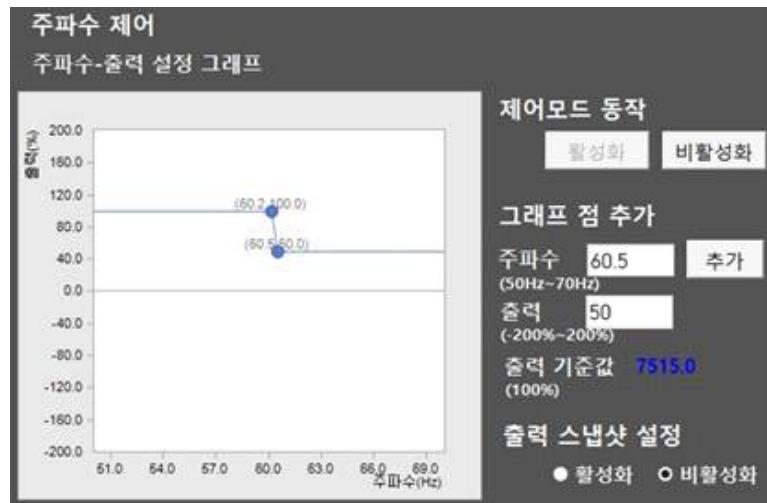


<그림> Modbus Map 수정 및 SCL 파일 재설계

■ 스마트 인버터 고급 기능 구현

○ Frequency-Watt 곡선 기반 제어 기능 구현

- 통합관리시스템
 - : IEC61850-90-7 기반 - 인터페이스 모듈을 통해 스마트 분산전원의 Frequency-Watt 제어 파라미터 설정 기능
 - : 분산전원 통합 관리시스템에서 그래프에 점을 추가하는 방식으로 파라미터 설정
 - : Frequency-Watt 활성화/비활성화 기능
- 스마트 인버터
 - : 주어진 곡선 기반 파라미터에 따라 유효전력 출력량을 결정하는 기능 구현

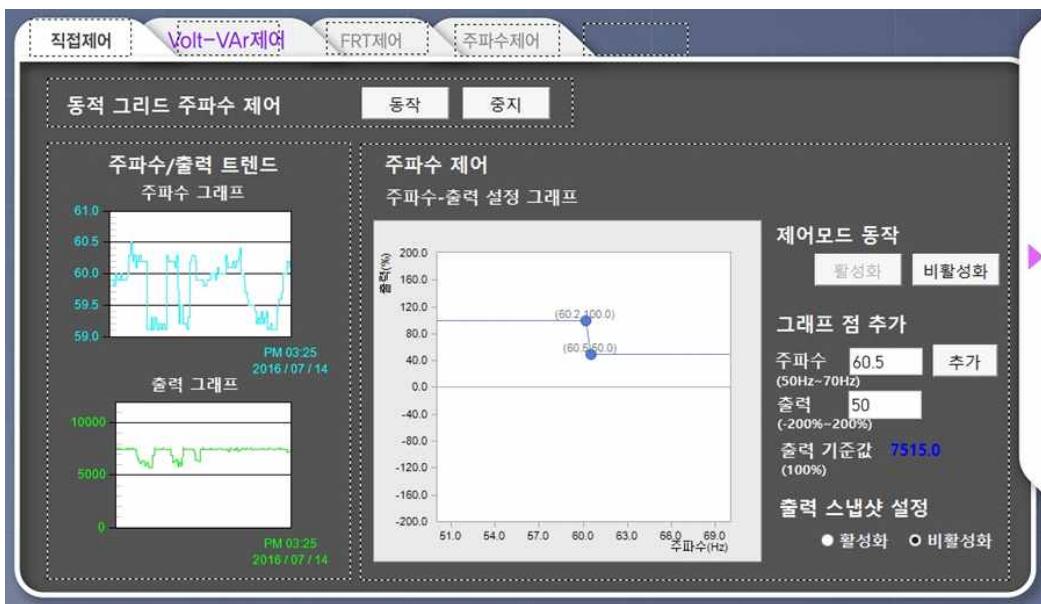


<그림> 곡선 기반 Frequency-Watt 제어 기능 - 설정 화면



<그림> 분산전원 Frequency-Watt 제어 기능 시험 결과

(기준 유효전력 7.2kW, 60.4Hz에서 출력량 감소)



<그림> Frequency-Watt 기능 시험 결과 화면 – 파리미터 설정, 주파수 변화에 따른 출력 변화

○ FRT²⁾ 제어 기능 구현

- 통합관리시스템

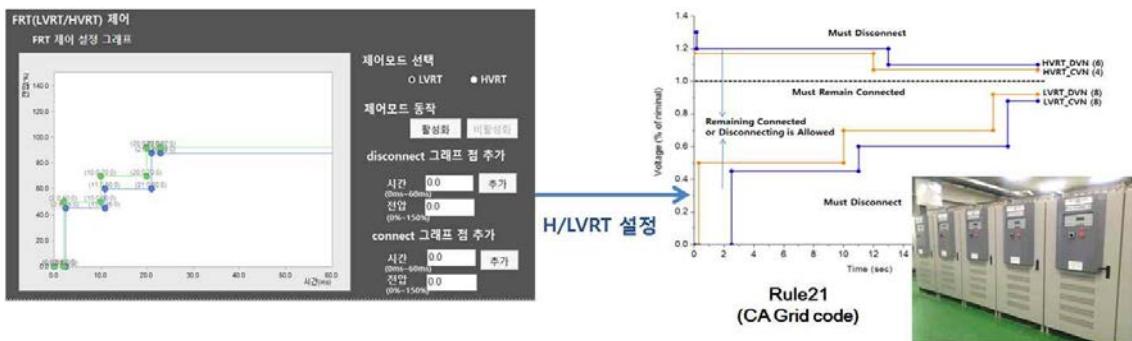
- : IEC61850-90-7 기반 – 스마트 분산전원의 FRT 제어 파라미터 변경 기능
- : 연계 유지 시간, 차단 시간을 그래프 기반으로 설정할 수 있도록 개발
- : 곡선 기반으로 총 24개의 파라미터 설정 가능
- : FRT 기능 활성화/비활성화 기능

- 스마트 인버터

- : 각 나라별 FRT 규정을 통합관리시스템을 통해 적용 가능
- : Rule 21³⁾의 L/HVRT 규정을 적용하여 시험함, 국내 LVRT 연계 규정 적용 가능

2) FRT(Fault Ride Through) – 사고에 의해 연계 전압 이상(저전압/고전압)이 발생하더라도 규정된 시간만큼 전력을 공급하는 기능임

3) Rule21 – California주 분산전원 계통 연계 기준

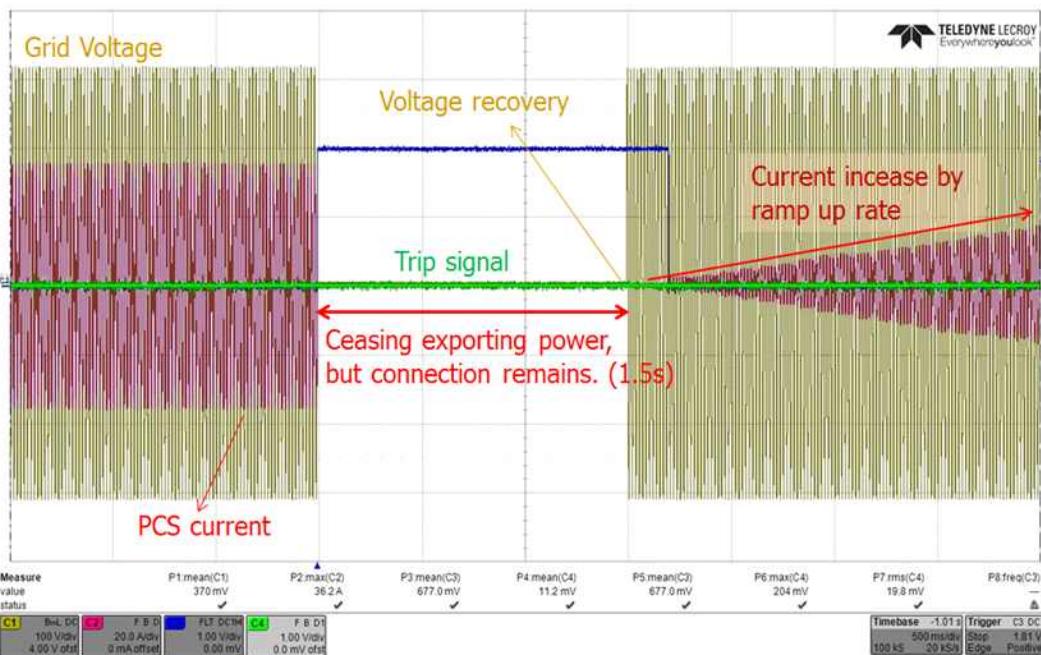


<그림> FRT 설정 화면 – 전압에 따른 연계 유지시간을 Operator가 설정 가능

<표> FRT 시험 결과

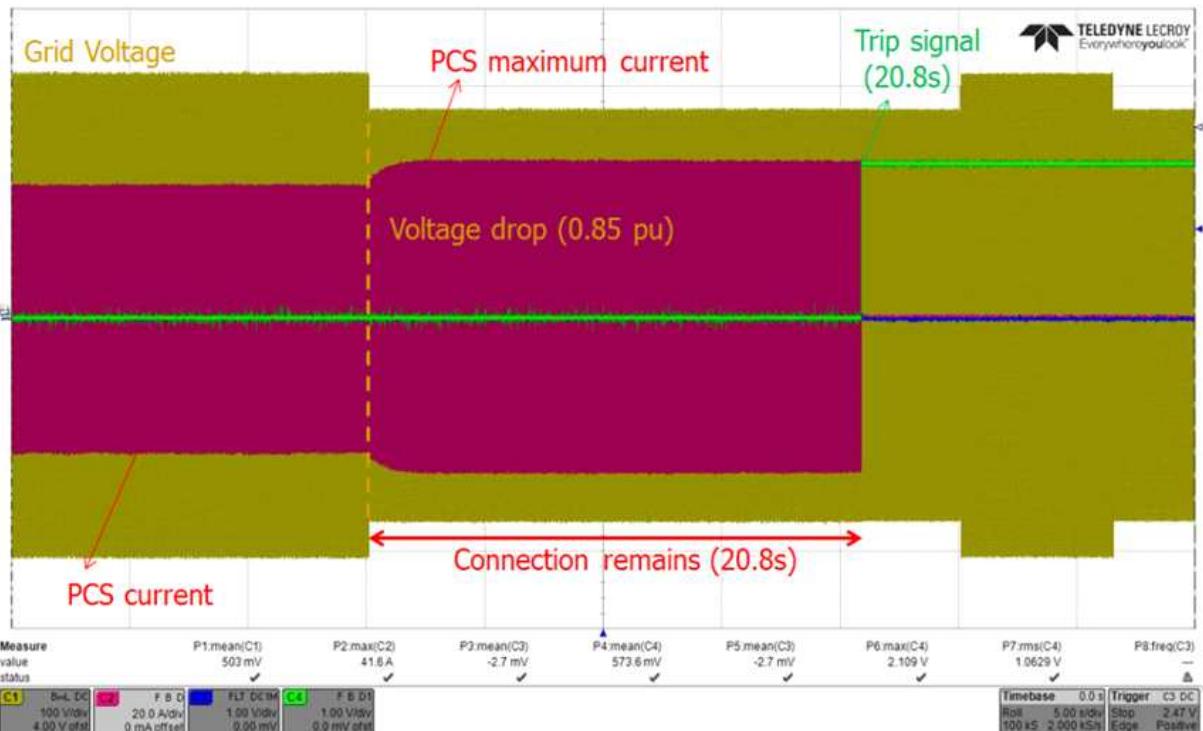
L/HVRT Curve	Test Number	계통 전압	연계 지속 시간 (규정)	탈락 시간 (규정)	PCS 설정값	Trip Time (실험결과)
Rule 21	Test 1	220→0	2.0 s	2.5 s	2.3 s	2.300 s
	Test 2	220→99	2.0 s	2.5 s	2.3 s	2.300 s
	Test 3	220→121	10.0 s	11.0 s	10.8 s	10.800 s
	Test 4	220→187	20.0 s	21.0 s	20.8 s	20.800 s
	Test 5	220→209	No Trip	No Trip	No Trip	60초 이상
	Test 6	220→231	No Trip	No Trip	No Trip	60초 이상
	Test 7	220→253	12.0 s	13.0 s	12.8 s	12.800
	Test 8	220→268	-	0.16 s	0.15 s	-

- : Rule21 계통 연계기준으로 FRT 커브를 설정함 – 시험 결과 Grid code를 만족
- : Rule21에 따르면 Test1, 2의 경우 0.16초 안에 출력 전력을 0으로 줄이고 2초 동안 연계를 유지해야 함
- : 통합관리시스템으로 설정한 FRT 커브에 따라 PCS의 연계 유지/탈락 시간이 결정되는 것을 확인



<그림> 표 Test1 시험 결과

- 계통 전압이 0으로 떨어졌을 때 PCS 출력 감소
- 탈락 시간(2.5초)안에 계통 전압이 복귀되고 출력이 다시 증가함



<그림> 표 Test4 시험 결과

- 계통 전압이 0.85pu로 떨어지더라도 계통 연계를 유지하면서 전류를 증가시켜

출력 유지

- : 설정 커브의 연계 유지시간 (20초)동안 출력을 유지하고 탈락시간 (21초)안에 분산전원 탈락

■ 분산전원 효과 검증을 위한 시나리오 구성 및 시험

○ 스마트 분산전원의 유용성 검증을 위한 시나리오 구성

- 시나리오 시험을 위한 계통 구성
 - : OLTC⁴⁾를 고려한 배전 계통 모의 시스템 설계 및 구현
 - : PQ 가변 부하 모의 장치 구현
 - : 통합관리시스템을 통해 모의 배전 계통 모니터링
- 배전 계통에서 일어날 수 있는 3가지 시나리오 제시
 - : 배전 계통 내 스마트분산전원의 연계 점이 이동할 경우
 - : 말단에 중부하가 존재하고 분산전원이 모선 인출단에 있는 경우
 - : 분산전원이 인출단과 말단에 동시에 있는 경우

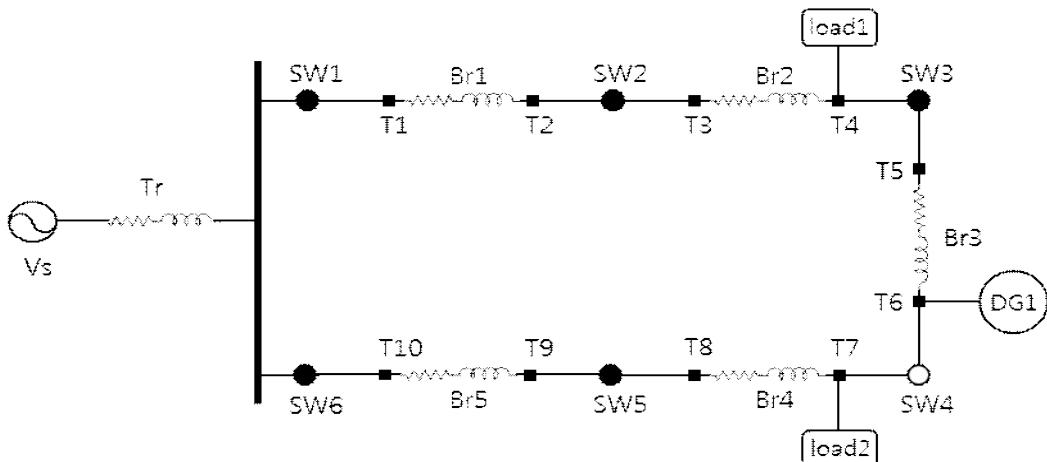


<그림> 시나리오 시험을 위한 시스템 구성

4) OLTC (On load tap changer) - 부하가 걸렸을 때도 전압 조정이 가능한 텁 철환 장치, LDC(Line drop compensation) 알고리즘을 적용함

○ 시나리오1 - 배전 계통 내 스마트분산전원의 연계 점이 이동할 경우

- : 분산전원이 중부하 선로에 연결되어 있다가 연계점 이동에 따라 경부하 선로로 절체
- : 분산전원이 경부하 선로로 이동하여 전압을 상승시킴
- : 통합관리시스템에서 스마트분산전원의 Volt/Var 설정 곡선을 변경하여 전압 상승을 억제함

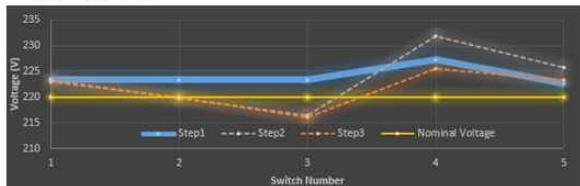


<그림> 시나리오1 모의 배전 계통

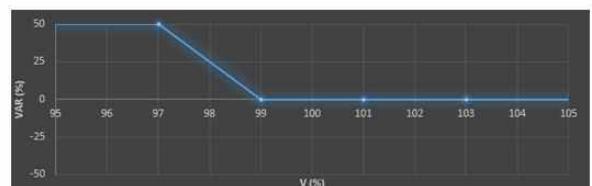
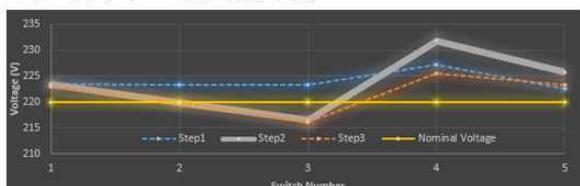
:Load1 - 중부하, Load2 - 경부하

:선로 절체: SW3(ON),SW4(OFF) → SW3(OFF),SW4(ON)

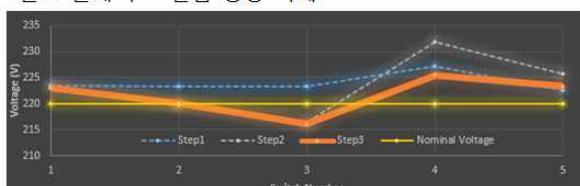
<선로 절체 전>



<선로 절체 후 - 전압 상승 발생>



<선로 절체 후 - 전압 상승 억제>



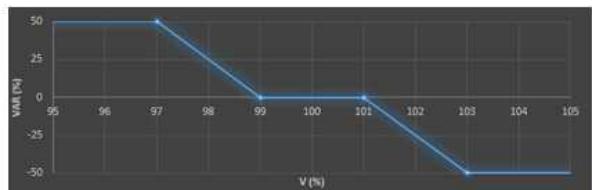
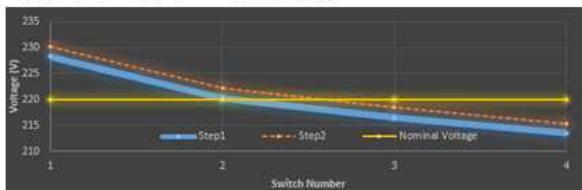
<전압 프로파일>

<Volt/Var 설정>

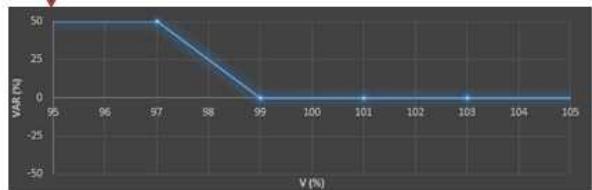
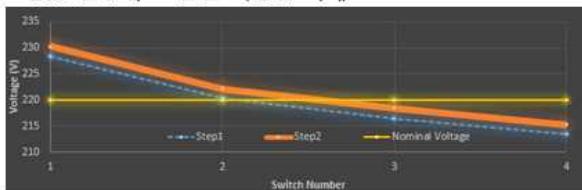
<그림> 시나리오1 시험 결과

- 시나리오2 - 말단에 중부하가 존재하고 분산전원이 모선 인출단에 있는 경우
 - : 분산전원의 설치점은 전압이 높지만 말단은 저전압이 발생되는 상황
 - : 분산전원 설치점의 전압이 1pu보다 높아 발생한 무효전력에 의해 말단의 저전압을 심화시킴
 - : 통합관리시스템에서 분산전의 Volt/Var 설정치를 변경하여 말단의 저전압을 방지할 수 있음

<말단의 부하 증가로 저전압 발생>



<설정 변경 후 - 말단 저전압 억제>

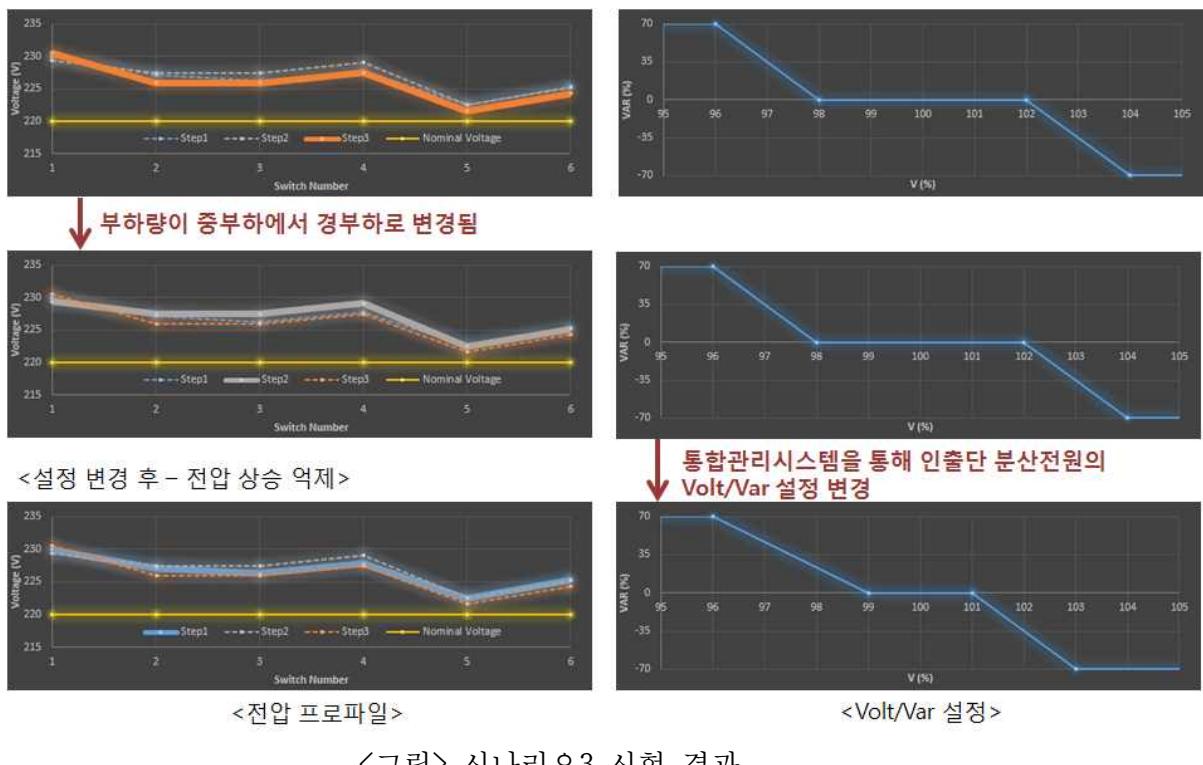


<전압 프로파일>

<Volt/Var 설정>

〈그림〉 시나리오2 시험 결과

- 시나리오3 - 분산전원이 인출단과 말단에 동시에 있는 경우
 - : 두 개의 분산전원이 서로 인출단과 말단에 설치되어 있음
 - : 선로의 부하량이 중부하에서 경부하로 변경됨에 따라 전압 상승이 발생
 - : 인출단 분산전원이 말단 분산전원보다 상대적으로 낮은 전압에서 무효전력을 출력해야 함
 - : 기존 시스템은 초기에 정해진 설정치에 따라 동작하므로 대응이 불가능하지만 분산전원통합관리시스템과 스마트인버터를 통해 문제를 해결할 수 있음



■ 스마트분산전원 최적 설정 알고리즘

○ 계통의 상황에 따른 스마트분산전원 최적 설정 알고리즘 구현

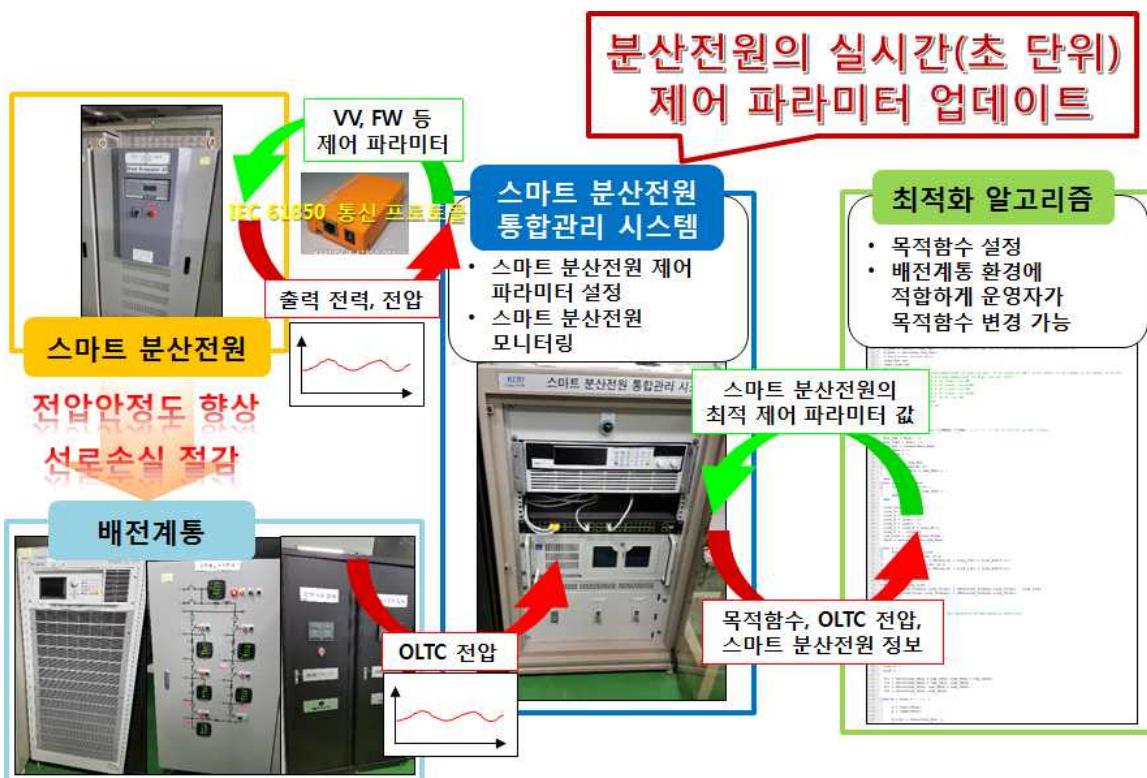
- 스마트 분산전원 최적화 알고리즘 적용

- : 배전 계통 전압 안정도 향상을 목적함수로 최적화 프로그램 구현

- 모선별 발전량, 부하량, OLTC 설정 전압을 토대로 조류계산 후 설정 목적 함수에 맞게 최적화 문제를 풀어 스마트분산전원의 최적 Volt/var 설정치를 구함

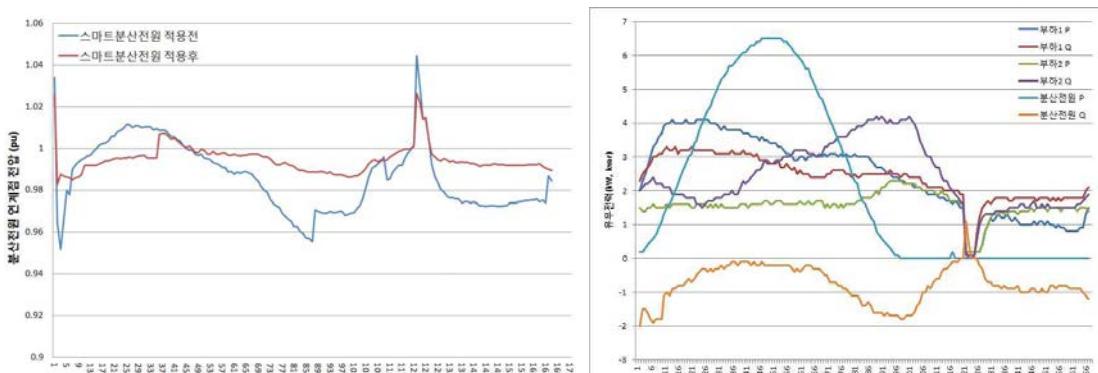
- : 실시간으로 계산된 결과를 통합관리시스템을 통해 최적 파라미터로 변경

- : 배전계통 환경에 적합하게 운영자가 목적함수 변경 가능



<그림> 스마트분산전원 통합관리시스템의 스마트분산전원 최적 파라미터 설정

개념도



<그림> 모의 배전 계통에 스마트분산전원 적용 결과 (연계점 전압, 부하 및 분산전원 유무효전력)

<표> 모의 배전 계통에 스마트분산전원 적용 시 전압 변동율

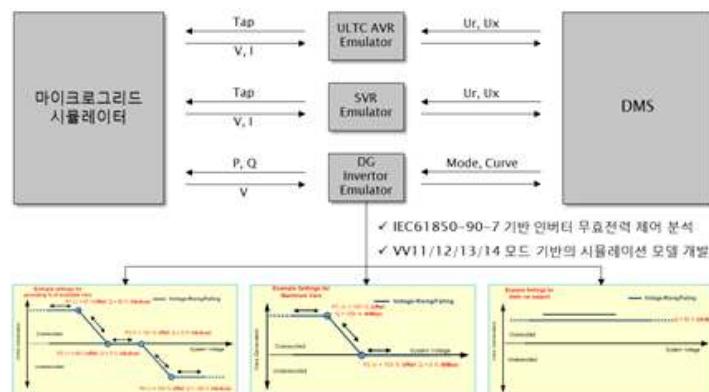
전압변동율	일반 분산전원	스마트분산전원
최대 전압 변동율	4.8 %	2.6 %
평균 전압 변동율	1.7 %	0.7 %

라. 위탁연구 상세내용 (질적 우수성 중심으로 작성)

■ 분산전원 통합관리시스템 전압-무효전력 최적제어 알고리즘 개발 - 위탁

○ 스마트분산전원 특성분석 및 시뮬레이션 모델 개발

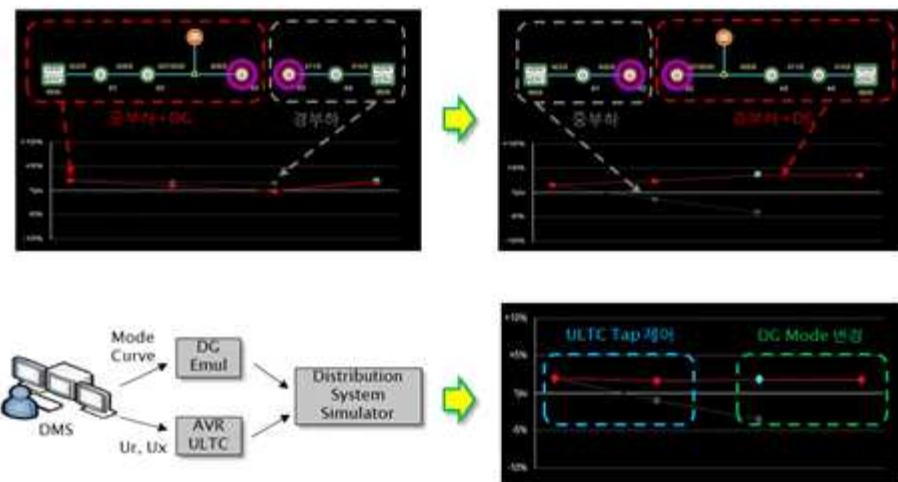
- IEC61850-90-7 규격에 정의된 계통 연계 인버터의 무효전력 제어방법 분석
- VV11/12/13/14 모드 기반의 스마트분산전원 시뮬레이션 모델 개발



<스마트 분산전원 분석 및 시뮬레이션 모델 개발>

○ 스마트분산전원 효과 분석을 위한 배전계통 시뮬레이션 케이스 개발

- 한전의 도시지역 마이크로그리드 실증 사이트(신안, 암자D/L) 분석
- 전기연구원의 축약 배전계통 모의 장치 설비 기술검토 지원
- 시뮬레이션 시범 케이스 도출 → 연계점 이동에 따른 분산전원 절체



<연계점 이동에 따른 분산전원 위치 변경시 영향분석 시뮬레이션>

V. 연구개발결과의 활용계획

- 전력설비 지능화를 위해서 개발된 다양한 전력 설비 및 기기들 그리고 신재생 분산전원을 표준화된 정보모델 및 통신 방식으로 접근하는 IEC61850 국제 표준 기반 분산전원 통합관리 시스템의 개발은 스마트그리드 관련 기업들 (특히 분산 전원 분야)의 기술 지원에 활용함
- 국제 표준 방식의 정보 및 통신 방식을 적용하면서 얻은 경험을 신재생 분산전원 관련한 스마트그리드의 국가 표준과 시험 절차 및 기준 등의 확립에 기여
- 강화되어 가고 있는 전력 계통 연계 기술 기준을 대비하기 위해 개발된 스마트 분산전원의 스마트 인버터 기능 요소 기술을 산업계에 기술 이전하여 국내 및 국제 계통 연계 기준에 적합한 스마트 분산전원의 도입 확대에 활용
- 스마트 분산전원의 효과 검증을 위해 개발된 오프라인 모의 기법과 시험 시나리오를 통해서 스마트 분산전원이 포함되는 소규모 전력망에 있어서 분산전원의 최적 용량 산정, 분산전원의 운전 모드 설정, 최적 파라미터 선정 등 시스템 설계 및 운영에 활용 가능
- 일반적인 분산전원과 스마트 분산전원의 통합관리 기술은 전력망 운영자의 경우 배전 계통 관리 시스템의 요소 기술로서 활용 가능하며 수용가의 입장에서는 소규모 수용가 전력망 (커뮤니티 마이크로그리드, 공장 마이크로그리드, 빌딩 마이크로그리드 등)의 전력 품질 관리를 위한 핵심 기술로 활용 가능

S U M M A R Y

As the development of the industry and the society, the electricity consumption is escalating more than ever. And the energy paradigm is changing with the introduction of the energy prosumer concept, in which consumers are directly producing and consuming electricity locally. Therefore, traditional power delivery which provides unilateral power from the existing centralized power plant to the customer is changing by the local DERs (Distributed Energy Resources).

The new climate regime, as determined by the Conference of the Parties in Paris (COP21), imposes on all parties, including developing countries, a greenhouse gas reduction obligation after 2021. Reduction of GHG emissions necessarily needs the expansion of new and renewable energy sources. In the US and Europe, as the installed capacity of the renewable DERs increases, the power system is approaching its limit capacity of the DERs to accommodate.

As a result, there is a need for the smart DERs capable of automatically controlling the active or reactive power according to the system conditions in order to expand the input of the renewable distributed power source into the power system. Those capabilities are defined as advanced inverter functions of the smart inverter in DERs.

Standardization efforts of the DER's grid support functions as well as new grid codes are underway in various countries. IEC 61850 is representative of relevant international standards. The sub-standard of IEC 61850-7-420 and IEC 61850-90-7 are important in which defines common information models of DER and grid support advanced inverter functions at each.

One of the main objects of this research is to develop the smart DER which supports the advanced inverter functions such as immediate control, operational mode control, Volt-Var control, Frequency related functions, L/HVRT functions based on the IEC 61850 information models and communication method.

The other object is to develop the integrated management system that contains the studies on the design and control of the smart DERs. By the control and management of the smart DERs, we can improve the stability, reliability and operating efficiency significantly of the power system or the microgrid, along with optimal settings for individual smart DERs.

C O N T E N T S

Chapter 1. Project Overview -----	27
Chapter 2. Global R & D Trend -----	33
Section 1. Global Grid Codes Trend -----	34
Section 2. DER Standardization Status -----	35
Section 2. Global Smart Inverter Industry Trend -----	37
Chapter 3. Contents and Results of R & D -----	41
Section 1. Development of IEC 61850 Interface for Smart DER -----	41
Section 2. Development of Smart DER and Test Environments -----	52
Section 3. Simulation Study of Smart DER -----	78
Section 4. The Integrated Management System for Smart DER -----	95
Chapter 4. Summary of Results -----	112
Chapter 5. Further R&D plans -----	116
Chapter 6. References -----	117

목 차

제 1 장 연구개발 과제의 개요 -----	27
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	33
제 1 절 국내외 그리드 코드 현황 분석 -----	34
제 2 절 국내외 분산전원 관련 표준화 현황 -----	35
제 3 절 국내외 스마트 인버터 관련 산업 동향 분석 -----	37
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 -----	41
제 1 절 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발 -----	41
제 2 절 스마트 분산전원 개발 및 시험환경 구축 -----	52
제 3 절 스마트 분산전원 시스템 시뮬레이션 연구 -----	78
제 4 절 스마트 분산전원 통합관리 시스템 개발 -----	95
제 4 장 목표달성을 및 관련분야에의 기여도 -----	112
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 -----	116
제 6 장 참고문헌 -----	117

제 1 장 연구개발 과제의 개요

미국 및 유럽 등에서는 분산전원의 설치 용량이 증가함에 따라서 전원 계통이 이를 수용할 수 있는 한계 용량에 가까워지고 있음. 따라서 분산전원의 설치 한계 용량 증가를 위해 계통 상황에 따라 유무효전력을 자동으로 조절할 수 있는 스마트 분산전원의 필요성이 대두되고 있다.

글로벌 시장에서 현재 스마트 분산전원에 대한 요구 또한, 산재한 다수의 분산전원 설정, 관리 및 운영을 위한 스마트 분산전원 통합관리시스템도 필수 요소이다. 따라서 본 과제에서는 스마트 분산전원 및 이를 위한 통합관리시스템을 개발하고자 한다.

산업 발전에 따른 에너지 소비가 늘어남에 따라 전기 에너지의 수요도 점점 증가되고 있는 추세이다. 중앙 집중식 발전소에서 송, 배전망을 통해서 수용가까지 전력을 공급하는 일방적인 기존의 전력 공급 형태는 소비자가 직접 전력을 생산하며 소비하는 에너지 프로슈머의 개념이 도입되면서 전력 에너지 분야에서 패러다임의 변화가 일어나고 있다.

선진국의 온실가스 감축을 주요 내용으로 하는 기존 기후변화 협약(교토 의정서)가 2020년 종료될 예정으로 이에 대비하여 2015년 파리 당사자 회의 (COP21)에서 결정된 신 기후체제는 2021년 이후부터 개발도상국을 포함하는 모든 192개국의 당사국들이 각자의 온실가스 감축량을 설정하고 이 목표를 이행할 것을 결의 하였다.

온실가스 저감을 위해서는 필연적으로 신재생 에너지 전원의 도입 확대가 필요하며 신재생 전원의 도입을 선도하는 미국 및 유럽 등 선진국에서 신재생 전원의 설치 용량이 증가함에 따라서 전력 계통이 이를 수용할 수 있는 한계 용량에 가까워지고 있는 상황이다.

그 결과로 신재생 전원이 계통에 연계될 때 전력 계통에 미치는 영향을 최소화 할 목적으로 만들어졌던 기존 분산전원 계통 연계 표준 및 기술 기준이 전력 계통에 문제가 발생하였을 때 신재생 분산전원이 전력 계통의 안정도를 높이도록 하는 의무를 부과하는 새로운 계통 연계 표준과 기술 기준으로 변경되어 가고 있다.

분산전원의 표준화된 정보 모델에 따른 접근과 제어는 전력설비 자동화를 위한 국제 표준 규격인 IEC 61850에서 정의하고 있으며 스마트 인버터의 첨단 인버터 기능(Advanced Inverter Function)에 대한 정의와 정보 모델을 포함한다.

변전소 자동화 프로토콜로 2005년에 국제표준으로 발표된 IEC 61850은 최근 일부 파트에서 2판(Ed.2)로 업데이트하면서 제목을 “Communication Networks and Systems for Power Utility Automation”로 변경하여 전력 산업 자동화를 위한 전반적인 표준임을 명시하고 있다.

그림 1.1과 그림 1.2에서 볼 수 있듯이, 기존의 변전소 자동화를 위한 전력 설비 사이의 인터페이스(IEC 61850)에서 변전소 간 인터페이스(-90-1), 상위 시스템과 변전소 사이의 인터페이스(-80-1), 풍력발전 설비 인터페이스(IEC 61400-25), 수력 발

전 설비 인터페이스(-7-410), 분산 전원 인터페이스(-7-420) 등의 표준으로 그 적용 영역이 점점 확대되고 있다.

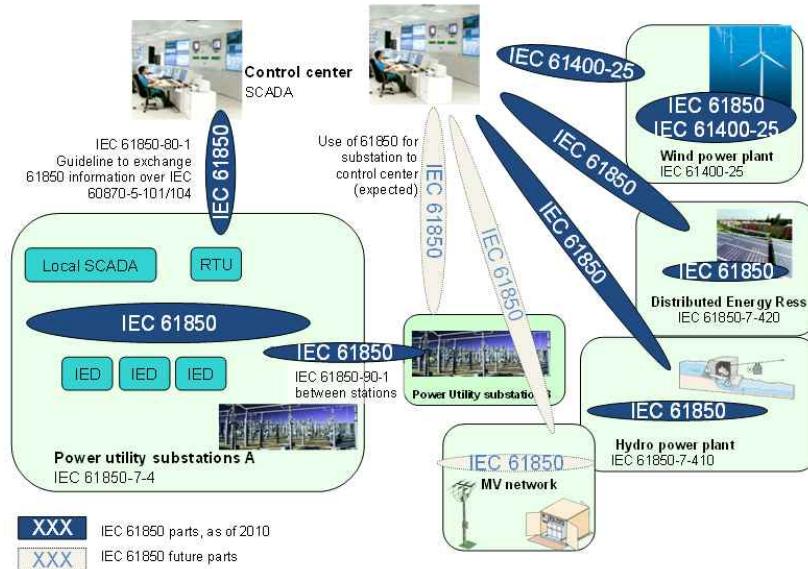


그림 1.1 IEC 61850 표준 적용 영역

Part	Title	Status	Ed.	
IEC61850-1	Introduction and overview	OK	2.0(13.03)	
IEC61850-2	Glossary	Part	title	
IEC61850-3	General require IEC61850-80-1	Guideline to exchanging info. from a CDC-based data model using IEC 60870-5-101/104	OK	
IEC61850-4	System and proc IEC61850-80-3	mapping to web protocols - requirement analysis and technology assessment	원격제어	
IEC61850-5	Communication IEC61850-80-4	Mapping between the DLMS/COSEM (IEC 62056) and the IEC 61850 data models	AMR	
IEC61850-6	Configuration dIEC61850-80-5	Guideline for mapping information between IEC 61850 and IEC 61158-6 (Modbus)	Process	
IEC61850-7-1	Basic communicatIEC61850-90-1	Use of IEC 61850 for the communication between substations	Process	
IEC61850-7-2	Basic informatIEC61850-90-2	Using IEC 61850 for the communication between substations and control centres	OK	
IEC61850-7-3	Basic communicatIEC61850-90-3	Using IEC 61850 for condition monitoring	new item	
IEC61850-7-4	Compatible logIEC61850-90-4	Network engineering guidelines	OK	
IEC61850-7-410	IEC 61850 modeIEC61850-90-5	Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118	1.0(13.05)	
IEC61850-7-420	CommunicationIEC61850-90-6	Use of IEC 61850 for distribution automation systems	New item	
IEC61850-7-5	IEC 61850 modeIEC61850-90-7	Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems	OK	
IEC61850-7-500	Use of logical ncIEC61850-90-8	IEC 61850 object models for electrical mobility EV	1.0(13.02)	
IEC61850-7-510	Basic communicatIEC61850-90-9	Use of IEC 61850 for electrical storage systems	New item	
IEC61850-8-1	SCSM - Mapping IEC61850-90-10	IEC 61850 object models for scheduling	New item	
IEC61850-8-2	SCSM - Mapping IEC61850-90-11	Methodologies for modeling of logics for IEC 61850 based applications	New item	
IEC61850-9-1	SCSM - SampledIEC61850-90-12	Wide area network engineering guidelines	New item	
IEC61850-9-2	SCSM - SampledIEC61850-90-13	Extension of IEC 61850 info. Models(logical nodes & data models) for steam & gas turbines	Process	
IEC61850-10	Conformance testIEC61850-90-14	Using IEC 61850 for FACTS data modeling	New item	
IEC61850-10-2	Interoperability IEC61850-90-15	Hierarchical architecture of a DER system	New item	
IEC61850-10-210	IEC 61850 Interfacing IEC61850-90-16	System management	New item	
		IEC61850-90-17	Using IEC 61850 to transmit power quality data	New item
		IEC61850-100-1	Commissioning testing of IEC 61850 based systems	New item

그림 1.2 IEC 61850 표준 현황 요약

그림 1.3은 최근(14년9월) 발표된 미국 국가기술 표준원(NIST)의 스마트그리드 프레임워크 및 로드맵 3.0에 제시된 상호호환 표준 리스트(CoS)로서 전체 56개 표준 중 IEC 61850 관련 표준은 16개이며, 사이버 보안(IEC 62351)표준에 IEC 61850 내용이 다수 포함을 볼 때 스마트그리드에 있어서 IEC 61850 국제 표준의 위상을 알 수 있다.

그림 1.4는 캐나다의 스마트그리드 아키텍처로 5개 층으로 구성된 주요 표준들과 어플리케이션, 서비스에서 각각의 연관성을 보여준다. 미국의 경우와 마찬가지로 공통 정보 모델(CIM)관련 표준들(IEC61968, IEC61970, IEC62325)과 IEC 61850 표준이 스마트그리드의 주축임을 알 수 있다.

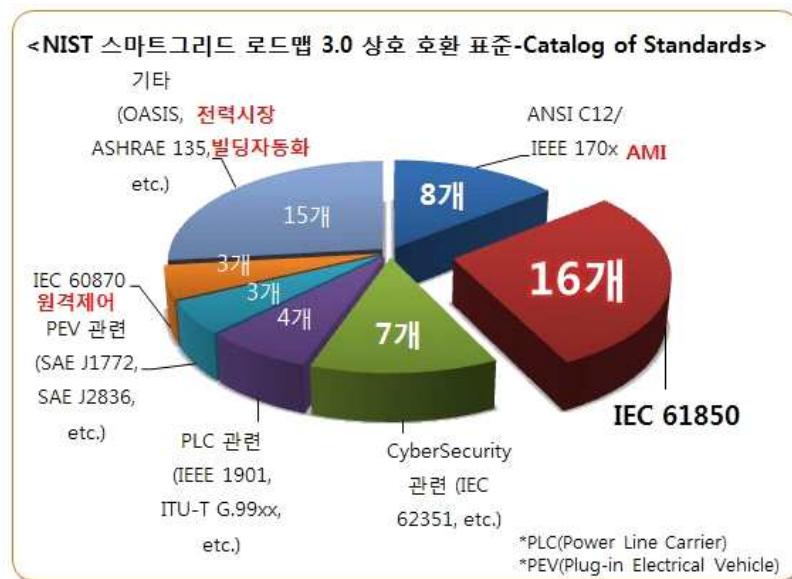


그림 1.3 NIST 스마트그리드 프레임워크 및 로드맵 3.0의 스마트그리드 상호 호환성 표준

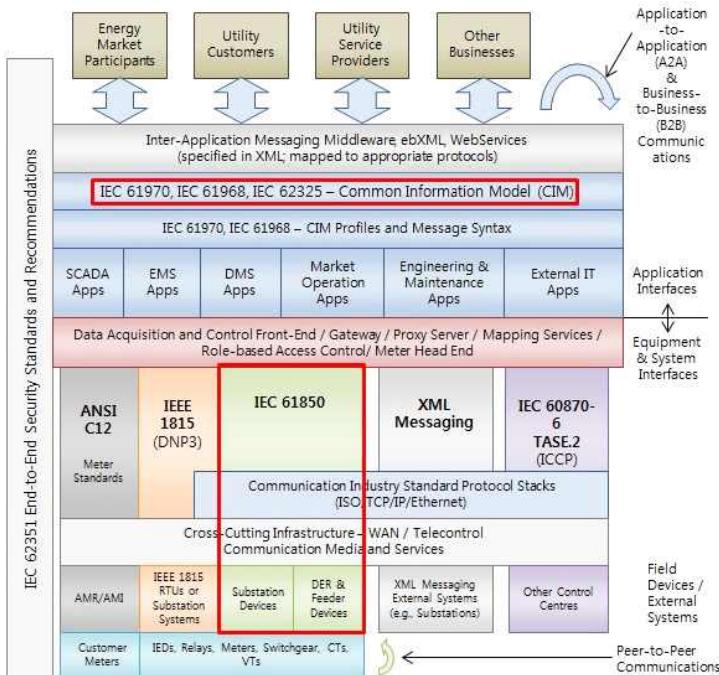


그림 1.4 캐나다의 스마트그리드 아키텍처

신재생 분산전원 관련하여서는, 신재생의 도입확대와 더불어서 사고 발생 시 계통에서 일제히 탈락되는 문제, 배전망의 과전압 문제, 전력품질 문제, 전력계통 보호 문제 등을 해결할 필요가 있다.

이를 목적으로 원격 통신에 의한 분산전원 직접제어나, 전압-무효전력 제어, 주파수 제어, LVRT (Low Voltage Ride Through) 제어로 대표되는 첨단 인버터 기능을 IEC 61850-90-7에서 정의하였고 구현 방식과 필요한 표준 정보모델을 제안하고 있다.

2020년까지 총에너지 공급량의 33%를 신재생전원으로 공급목표인 캘리포니아에서는 캘리포니아 공공 위원회 (CPUC, California Public Utilities Commission)가 주도적으로 스마트 인버터(분산전원) 관련 기술을 전력회사(SCE, SDGE, PG&E)와 국가 연구소 등 관련 기관 (NREL, EPRI, TUV Rheinland, SunSpec Alliance)들과 공동 개발 중이다.

그러나 스마트 분산전원 기술은 아직까지 첨단 인버터 기능의 정의와 구현 방법, 정보 모델링, 그리고 기능을 시험하기 위한 절차 등 기능의 동작과 확인을 위한 기초 개발 단계로서 개별 스마트 분산전원의 최적 설정과 더불어서 전체 배전망 또는 마이크로그리드의 효율, 안정성 그리고 신뢰도를 높이는 스마트 분산전원의 설정과 제어에 대해 연구는 아직 사례가 없으며 특히 기존의 배전망 제어나 마이크로그리드의 다른 제어 방식과 어떻게 조합하는 것이 최선인지에 대한 연구가 절실한 상황이다.

KERI의 스마트배전 연구센터는 다년간의 마이크로그리드 시스템 개발 경험을 바탕으로 독립형 / 연계형 마이크로그리드의 설계, 제어, 모의시험 그리고 운영에 대한 전문 기술을 보유하고 있다.



그림 1.5 IEC 61850 기반 분산전원 인터페이스

또한 동 센터는 지난 2년간의 기본사업 수행으로 임베디드 컨트롤러 기반의 IEC 61850 분산전원 인터페이스를 개발하였고 IEC 61850-7-420의 분산전원 표준 정보모델을 적용하였으며, 현재 KERI의 마이크로그리드 시스템에 구현하여 성공적으로 실증 운전 중이다.



그림 1.6 IEC61850기반 마이크로그리드 시스템

IEC 61850 관련 기술은 변전소 분야의 시장은 성숙 단계이지만 분산전원 관련 시장은 원천기술이 개발되고 있는 도입 단계로서 앞으로 시장 확대가 기대되는 분야이다. 또한 스마트 분산전원과 분산전원 통합관리 기술이 적용된 IEC 61850 기반의 마이크로그리드 운영은 현재까지 유래를 찾아볼 수 없는 상황으로 기술 개발과 실증을 거친 관련 기술의 완성도 제고는 우리나라의 국제적인 위상을 높일 수 있는 좋은 기회라고 할 수 있다.

그림 1.7은 스마트 분산전원과 분산전원 통합관리 기술의 배전계통 전압 및 무효전력을 적용한 사례의 개념도를 보여준다. 본 예에 따르면 스마트 분산전원의 운전 모드 또는 운전 파라미터를 관리함으로써 분산전원의 유, 무효 전력을 제어하고 그 결과로 배전선로의 전압을 관리하는 모습을 볼 수 있다. 이 과정에서 분산전원 통합관리 시스템은 배전망을 구성하는 스마트 분산전원은 물론 부하 장치, 품질 보상 장치 등과의 통신을 통해서 배전 계통의 상태를 파악하고 배전망 관리 시스템과 연계하여 배전 선로의 최적 제어 조건을 도출해 낸다.

개념도는 연계 전력계통의 전압 관리에 관한 일례로서 스마트 분산전원이 기능에 따라서 독립 계통에 전력 수요/공급 불균형으로 인한 주파수 불안정 문제, 계통 사고로 인한 분산전원의 동적 계통 안정도 기여, 분산전원의 스마트 인버터를 이용한 무효전력 공급 등 다양한 적용 사례를 생각할 수 있으며 여러 가지 활용 방안에 대한 효과를 검증하기 위한 시험 설비를 필요로 한다.

본 과제에서는 KERI가 보유하고 있는 마이크로그리드 기술과 IEC 61850 분산전

원 인터페이스 기술을 활용하여 스마트 분산전원과 분산전원 통합관리 시스템을 개발하는 것을 연구 목표로 한다. 이를 위하여 1 차 년도 에서는 배전망 모의장치, 부하 모의장치, LVRT 시험장치 등 시험 설비를 개발 및 보완하여 연구 개발 및 시험 인프라를 확보하고 기존에 보유하고 있는 시험용 인버터를 활용하여 스마트 분산전원의 어드밴스드 인버터 기본 기능을 구현한다. 2 차 년도에는 개발된 스마트 분산전원의 기능을 보완하고 IEC 61850 클라이언트와 지능형 분산전원 통합관리 알고리즘을 개발함으로써 분산전원 통합관리 시스템을 완성하여 시험 및 실증 시설에서 그 특성을 시험하는 것을 연구 내용으로 한다.

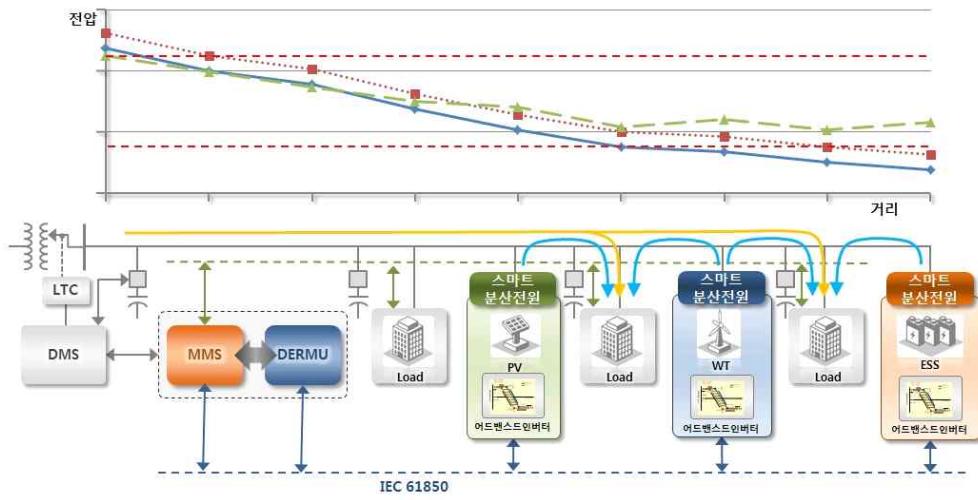


그림 1.7 스마트 분산전원 통합관리 기술 적용 예 (전압 및 무효전력 제어)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

전 세계적으로 에너지 소비의 증가와 화석연료 고갈, 기후변화 대응 등 환경 및 경제적인 이유에서 신재생에너지, 즉 분산전원의 도입이 계속 증가하고 있다. 이미 선진국에서는 다양한 목적으로 분산전원의 효과를 실증하는 수많은 프로젝트들이 진행되었으며 그 결과 분산전원의 그리드 통합 및 연계는 빠르게 확산되고 있다.

신재생 에너지의 공급 비율을 보면 노르웨이, 스웨덴과 같은 북유럽 국가들은 2012년 기준으로 이미 30%를 넘어섰으며 미국의 경우 PV만의 발전용량이 2013년 10GW를 넘어섰다[1][2]. 미국 하와이는 2020년 30%, 2030년 70%, 2045년에는 전체 에너지를 신재생에너지원으로 공급한다는 목표를 추진하고 있다. 2011년 지진해일에 의해서 큰 피해를 입은 일본도 풍력과 태양광 에너지의 보급에 많은 노력을 기울이고 있으며 후쿠시마 현은 화석연료에 의한 발전을 배제하고 신재생 전원에 의해서만 전력을 공급받는 데드라인을 2040년으로 설정하였다[3].

분산전원의 증가와 함께 분산전원 관련 기술과 도입 환경의 변화 또한 빠르게 일어나고 있다. 분산전원의 그리드 통합을 위한 그리드 코드는 일부 선진 국가에서 소규모 배전용 분산전원의 접속을 위해 필요한 기기의 보호를 위한 내용에서 시작하였으나 이제는 많은 국가들이 그리드 코드를 제정하여 적용하고 있으며 그 내용도 대용량의 분산전원이 송전을 위해 필요한 기능을 추가하는 것으로 바뀌었다.

예로서 L/H VRT(Low/High Voltage Ride Through), L/H FRT(Low/High Frequency Voltage Ride Through)는 송전을 위해 분산전원이 가져야 할 능력을 정의하는 그리드 코드의 내용의 하나이며 분산전원이 비교적 높게 도입된 독일과 미국의 그리드 코드에는 이미 이러한 다양한 기준들(Advanced functions)이 이미 포함되어 있다[4].

분산전원과 관련된 표준화 또한 활발하게 진행되고 있다. 다양한 국가에서 표준화 작업이 진행되고 있으며 여러 개의 관련 기술이 국제 표준으로 채택되어 있다. 관련 국제 표준으로 대표적인 것은 IEC 61850이며 분산전원의 논리 모델에 관한 국제 표준 IEC 61850-7-420과 기술보고서 IEC 61850-90-7 등은 분산전원과 관련된 국제표준의 근간을 이루고 있다. 이외에도 다양한 분산전원 및 분산전원 관리 시스템, 분산전원 계통 연계 등과 관련된 많은 표준화 작업이 계속 진행되고 있으며 최근 우리나라도 표준화를 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

분산전원들을 운영 및 관리하는 방법과 표준화 또한 중요한 요소 중의 하나이다. 다양한 특성을 가지는 여러 종류의 분산전원을 효율적이고 안정적으로 관리할 수 있기 위해서는 체계적인 인터페이스와 표준적인 의미를 가지는 명령의 전달 및 관리 방법이 필수적이다. 상호운용성을 위한 여러 가지의 노력과 기술 개발 그리고 이에 기반을 둔 표준화에 의해 분산전원을 관리하는 시스템이 실제 그리드와 연계되어 효율적이고 통합적으로 관리될 수 있도록 하는 노력들이 전개되고 있다. IEC 61850-90-15는 이와 관련된 대표적인 표준이다.

이 장에서는 국내외의 분산전원의 그리드 통합과 관련된 그리드 코드와 관련 기술 개발 현황, 표준화 현황 등에 언급하고자 하며 이하 제1절에서는 국내외 그리드 코드의 개정 및 적용 현황에 대하여, 제 2절에서는 국내외의 분산전원과 관련된 표준화 동향에 대하여 언급하고자 한다.

제 1 절 국내외 그리드 코드 현황 분석

분산전원의 그리드 통합을 위한 그리드 코드는 분산전원의 도입 증가 속도에 맞추어 빠르게 변화하고 있다. 2000년대 중반에 독일과 같은 일부 선진 국가에서 고압 배전선에 분산전원을 접속하기 위한 기준으로서 그리드 코드를 제정하여 분산전원을 접속하도록 하였으나 그 내용도 주로 역률 제어 및 주파수가 떨어질 경우의 출력 제어와 같은 제한된 기능이 적용되었다. 그러나 2010년대 초반부터는 전력 변환 용량 및 소자 등의 개발에 힘입어 전력변환 장치 제어 및 보호 기술의 적용이 보편화 되고 이를 이용하는 분산전원 장치들의 기능이 고도화 되면서 분산전원이 저압 및 고압의 배전 및 송전선에 접속되고 기능 또한 고도화 되면서 다양한 활용 목적으로 적용되기 시작하였다.

유럽의 경우 그리드 코드의 적용 시기는 다르지만 이미 독일과 프랑스, 덴마크, 스페인, 이태리 등의 국가에서는 분산전원이 LVRT 기능을 가지도록 그리드 코드에 명시하고 있다. 표 2.1은 독일과 이태리 및 유럽의 저압 그리드 접속 기준을 나타낸다. 표에서 나타낸 바와 같이 2008년에서 2012년, 그리고 2014년으로 가면서 분산전원이 가져야 하는 기능들이 고도화 되었으며 LVRT와 같은 기능들은 표에 나타낸 국가 및 유럽의 기술 기준에 이미 모두 적용되고 있음을 알 수 있다[4].

표 2.1 유럽 국가들의 저압 배전망 접속을 위한 그리드 코드[4]

Country	Germany	Italy	Europe
기등	2008	2012	2014
P at low f	Yes	Yes	Yes
P(f)	Yes	Yes	Yes
Q/cosφ	Yes	Yes	Yes
Remote P	>100kW	Yes	Yes
Rem. trip	optional	Yes	Yes
LVRT	Yes	Yes	Yes
HVRT	No	Yes	Yes
Reference	BDEWMV Guideline (2008)	CEI 0-16:2014	CLC/TS50549-2

표 2.2는 독일과 이태리 및 유럽의 고압 배전망 접속 기준을 나타낸다. 표에서 나타낸 바와 같이 2011년에서 2012년, 그리고 2014년으로 고압의 배전망에 접속되는 분산전원이 가져야 하는 기능들이 고도화 되었으며 특히 원격제어, LVRT와 LHRT 같은 전력 원으로서 필요한 주요 기능들을 모두 구비해야 함을 알 수 있다.

표 2.2 유럽 국가들의 고압 배전망 접속을 위한 그리드 코드[4]

Country	Germany	Italy	Europe
기능	2011	2012	2014
P at low f	Yes (all)	Yes (all)	Yes
P(f)	Yes (all)	Yes (all)	Yes
Q/cosφ	>3.68kVA	>3 kVA	Yes
Remote P	>100kW	>3kVA	Yes
Rem. trip	No	Yes (all)	Yes
LVRT	No	>6 kVA	Yes
HVRT	N/A	No	Yes
Reference	VDE AR N4105: 2011	CEI 0-21:2014	CLC/TS 50549-1:2015

미국은 분산형 전원의 그리드 접속을 위한 기준이 IEEE 1547에 포함되어 있으며 그 내용과 기능도 유럽과 마찬가지로 변화하고 있다. 기존의 IEEE 1547-2003에는 분산 전원이 계통 연계점(PCC, Point of Common Coupling)에서 전압 조정을 금지 하였지만 개정된 IEEE 1547a-2014에서는 지역 EPS 사업자나 수요 반응(DR) 관리자의 필요에 따라서 능동적인 전압 조정이 가능하도록 규정이 변경되었으며 전압 및 주파수 고장 상황에 대한 FRT 규정이 추가 되었다. 미국에서 분산전원의 계통연계를 위한 기준 개정은 주마다 다소 차이가 있는데 기준 개정에 가장 적극적으로 대처하고 있는 캘리포니아는 주의 전력계통 연계 규정인 Rule 21의 업그레이드를 통하여 분산전원이 다양한 기능을 수행할 수 있도록 분산전원들이 가지는 기능들을 점차 늘려가고 있다[3]. 특히 스마트 인버터 혹은 advanced 인버터 기능이라는 여러 기능들을 정의하고 있는데 anti-islanding, LVRT, HVRT, LFRT, HFRT, Volt-Var control 등의 기능이 여기에 속한다. 즉 유럽의 그리드 코드와 비슷한 기능을 정의하고 있다.

미국의 그리드 코드도 1547.a 와 캘리포니아 그리드 코드 rule 21의 개정이 2014년에 이루어진 이후에도 그 세부 내용은 계속 진행되고 있으며 앞으로 이 기준에 적합한 시험 및 인증을 위한 규격인 UL 1741에 반영되어 산업계 까지 더욱 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

참고로 현재 분산전원을 적용하는 목적은 크게 VPP(virtual Power Plant)로 활용하는 것과 DR(Demand response) 목적으로 활용하는 것으로 구분될 수 있는데 전자는 독일을 중심으로 한 유럽 지역에서 적용되는 방법이며 후자는 북미에서 주로 적용되는 방법이다.[5]

제 2 절 국내외 분산전원 관련 표준화 현황

분산전원의 그리드 접속을 위한 그리드 코드의 개정과 함께 분산전원의 기능 또한 지능화되고 고도화 되고 있다. 보다 다양한 종류의 분산전원들과 복잡한 기능들

을 가진 많은 수의 분산전원이 그리드에 접속되게 됨에 따라 이들 분산전원들을 효율적으로 또 안정적으로 운영할 수 있기 위한 방법이 필요하게 되고 이와 관련된 표준화 또한 필요하게 된 것이다.

분산전원 관련 표준화는 다양한 국가에서 진행되고 있다. 이미 여러 개의 분산전원 관련 국제표준이 있으며 가장 대표적인 것이 IEC 61850이다. 그 외에도 분산전원의 논리 모델에 관한 IEC 61850-7-420과 기술보고서 IEC 61850-90-7 등이 분산전원과 관련된 국제 표준의 근간을 이루고 있다[6][7][8].

이러한 주요 표준 외에도 다양한 분산전원 및 분산전원 관리시스템, 분산전원 계통 연계 등과 관련된 많은 국내외 표준화 작업이 계속 진행되고 있는데 최근에는 IEC 61850에 기반한 DER의 그리드 통합에 관한 규격 IEC 61850-90-15의 국제 표준화 작업이 진행되고 있다.

분산전원의 그리드 연계는 기후 환경적인 측면 및 경제성 측면 등 수많은 이유로 유럽과 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 진행되고 있는데 국제 표준이 아니지만 각국에서도 도입 목적에 맞는 표준화 작업을 진행하고 있다.

유럽에서는 각 나라의 표준화 및 그리드 코드와 별도로 유럽 전체에 적용 가능한 분산전원 접속 기술 및 기준을 개발하고 있고 미국 및 일본 또한 마찬가지이다. 미국은 당장 우선적으로 개정이 필요한 부분을 해결하기 위해 NIST를 중심으로 한 PAP(Priority Action plan)를 구성하여 필요한 국내 표준화를 진행하고 있다.

미국의 분산전원 연계를 위한 표준화에는 Sunspec Alliance의 규격인 Sunspec이 주로 적용되고 있다. Sunspec은 IEC 61850-90-7에 명시된 분산전원의 기능과 IEC 61850-7-420의 분산전원 데이터 모델을 기반으로 하여 이 기능과 데이터 모델을 Modbus에 mapping하는 규격인데 rule 21 기반의 분산전원 기능을 모두 구현 가능하도록 하였고 또 미국의 인버터 제작사들이 대부분 Modbus를 이용하고 있어 미국에서는 이 규격이 적용될 것으로 보인다. 이에 따라 본 연구에서도 Sunspec에 따른 인터페이스도 수용할 수 있도록 하였다.

최근 우리나라로 분산전원 그리드 접속과 관련된 표준화를 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 에너지 저장장치의 그리드 접속을 위한 표준화와 IEC 61850에 기반한 DER의 그리드 통합에 관한 규격 IEC 61850-90-15의 KS 부합화 작업이 진행되고 있으며 곧 표준화가 마무될 것으로 보인다.

분산전원의 표준화는 소위 상호운용성(Inter-operability)과 깊은 관계를 가지고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 다양한 종류의 분산전원들이 존재하고 용량 또한 다양하며, 이들의 기능 또한 다양하며 숫자 또한 많고 폭넓은 지역에 걸쳐 존재하기 때문에 효율적으로 관리하고 운용하기 위한 방법이 필요하게 된다. 상호 운용성은 표준적인 인터페이스와 분산전원의 운용이 가능하도록 하기 위한 것인데 현재 이를 위한 많은 국제적인 노력과 협조, 공동 연구 개발이 진행되고 있다.

우리나라를 위시한 선진국을 중심으로한 국제 스마트 그리드 협의체 ISAGAN (International Smart Grid Action Network)에는 SIRFN(Smart grid International

Research Facility Network)이라는 각국의 연구 및 시험 관련 기관들이 참여하여 분산전원들의 상호운용성 확보를 위한 시험 인증 체계 구축 활동을 진행하고 있는데 한국전기연구원은 우리나라를 대표하여 이 활동에 적극 참여할 계획이다.

제 3 절 국내외 스마트 인버터 관련 산업 동향 분석

이 절에서는 스마트 분산전원의 글로벌 산업 동향 분석에 대하여 언급하고자 한다. 스마트 분산전원 산업의 글로벌 동향은 앞서 제 1절과 2절에서 언급하였던 그리드 코드 및 표준화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 2.1은 IHS report에서 분석한 최근 5년간 글로벌 인버터 시장의 점유율 top 5 회사들의 점유율 변화를 나타낸 것이다.

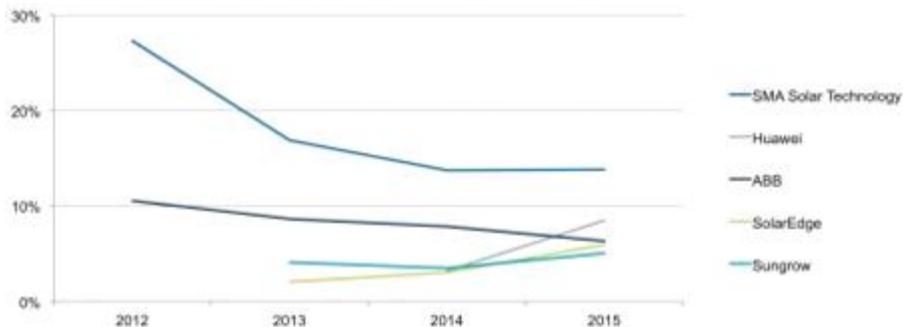


그림 2.1 최근 5년간 세계 주요 태양광 인버터 공급자 시장 점유율 추이

그림에 나타낸 바와 같이 세계 주요 태양광 인버터의 공급자들은 독일의 SMA, 다국적 기업 ABB, 중국의 Huawei, Sungrow, 그리고 SolarEdge가 차지하고 있다. 그 래프를 좀더 들여다 보면 상위의 주요 두 메이커, SMA와 ABB의 점유율은 2012년 이후 계속 떨어지고 있음을 알 수 있고 이는 SMA와 ABB가 주로 공급하던 국가들과 상관되어 있음을 알 수 있다.

SMA는 2008년 독일의 그리드 코드가 제정된 이후 이를 만족하는 인버터를 개발하여 시장의 점유율을 급속히 넓히면서 세계 제일의 기술력과 시장 점유율을 가지게 되었지만 2012년 이후에는 유럽을 중심으로 한 시장이 좁아지면서 그 점유율이 크게 떨어지게 되었고 ABB 또한 이태리, 독일, 프랑스 등의 유럽 국가를 중심으로 공급하였기 때문에 급속히 성장하는 아시아 시장의 공급 물량을 놓치게 되어 시장 점유율을 잃게 되었다.

중국을 대표하는 Huawei, Sungrow는 2010년 대 초부터 커진 중국 내수시장을 바탕으로 성장하여 글로벌 시장 점유율을 높이기 시작하여 이제는 세계 top 5 공급자로 성장하였다. 특히 Huawei는 통신회사에서 스마트 분산전원, 스마트 인버터 기술을 개발하여 글로벌 시장에 진출하였고 이제는 세계 2위의 공급 능력을 자랑하고

있고 성장을 측면에서는 세계 최고를 자랑하고 있다. SolarEdge는 최근 미국 시장을 공략함으로서 세계 top 5의 공급 능력을 가지게 되었으며 앞으로 그 영향력은 계속 될 것으로 보인다.

비록 최근 수년간의 세계 top 5에는 들지 못했지만 일본의 Omron 또한 세계 최고의 기술과 높은 시장 점유율을 가지고 있다. Omron은 앞서 언급한 기업들이 주로 계통 연계형의 3상 스마트 인버터를 공급하는 것에 반해 단상의 인버터 공급 점유율에서는 가장 높은 실적을 가지고 있다. 이는 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 원전 발전 대신 태양광과 풍력 등 분산전원의 공급을 늘리는 정책에 따른 것에 그 원인이 있으며 특히 단상용 인버터의 공급이 많았던 것은 일본이 정책적으로 각 가정에 단상 소용량 인버터를 공급하는 정책을 펴기 때문이다.

실제 분산전원용 인버터의 산업 동향을 살펴보면 앞서 언급한 바와 같이 그리드 코드의 제정 및 표준화, 에너지 산업과 관련된 정책 및 제도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그리드 코드가 일찍 제정되었던 유럽의 선진국들을 살펴보면 각국의 그리드 코드가 적용된 시기에 맞추어 보다 일찍 인버터 기술 개발을 하였던 회사들이 기술력을 앞세워 점유율을 높일 수 있었으며 또 각국의 그리드 코드 및 표준화, 인센티브 및 정책 개발 등의 유무에 따라서 각 나라를 대표하는 기업들이 성장하고 글로벌 시장에 동참하게 되었음을 알 수 있다.

분산전원, 특히 풍력과 태양광을 계통에 연계하려는 여러 가지 노력들은 유럽에 이어 세계로 향하고 있다. 특히 아시아와 미국이라는 거대 시장으로 향하고 있다. 앞으로는 미국 시장을 두고 세계 각국의 기업들이 치열한 각축을 벌이게 될 것이며 미국 내의 관련 기술을 개발하는 연구소, 표준화 단체, 관련 기업들도 분산전원의 그리드 연계와 관련된 많은 R&D를 진행하고 있다.

가장 대표적인 미국의 분산전원 그리드 연계를 위한 연구로는 표준적인 통신 인터페이스와 분산전원, 특히 advanced 인버터 특성 시험 인증을 위한 시험 프로그램을 들 수 있다.

이 프로젝트는 캘리포니아 주의 그리드 코드인 Rule 21를 따르는, 표준화된 기능들을 가지는 advanced 인버터와 개방형 통신 인터페이스를 실증하기 위한 것이며 앞서 언급하였던 IEC 61850 데이터 모델을 기반으로 하는 SunSpec 프로토콜과 IEC 61850-90-7에 언급된 advanced 인버터 기능을 인버터 개발에 적용하고 서로 다른 제작사가 만든 인버터들을 연계하여 계통 운영과 관련된 주요 기능들을 잘 수행할 수 있다는 것을 증명하기 위한, 즉 상호운용이 가능함을 실증하는 것이다. EPRI, SunSpec Alliance, Southern California Edison, UL 등의 기관 및 표준화 단체, 그리고 Sandia National Lab 및 컨설팅 기관이 참여하고 있으며 세계 최고의 기술력을 자랑하는 SMA, Fronius 와 같은 스마트 인버터 메이커가 공동 연구를 수행하였으며 그 결과 이제 본격적인 분산전원의 그리드 연계 및 운영이 시작될 것으로 기대된다.

아래 표 2.3은 미국 분산전원 통신 표준 인터페이스(SunSpec)를 따른다는 것을 인증하는 절차를 통과한 smart 인버터 제품 및 그 기능을 정리한 것이다. 표 우측

칼럼의 인증 기능 번호는 인버터의 인증 기능을 나타내고 있으며 각각의 기능 코드에 표기된 번호는 해당 기능에 대한 인증을 받았음을 의미한다.

표 2.3의 제작사를 살펴보면 SMA, Fronius, Huawei, Sungrow, SolarEdge, KACO, Danfoss, ABB, Schneider 등 높은 기술력과 경쟁력을 가지고 있는 세계 유수의 기업들이 망라되고 있음을 알 수 있다.

이는 세계 유수의 기업들이 미국이라는 거대한 시장을 공략하기 위한 기술적 준비를 하고 있음을 알 수 있다. 특히 SMA, Fronius, Huawei, Sungrow, delta product, ABB 등은 여러 가지 목적으로 활용할 수 있는 다양한 기능을 가지는 인버터를 개발하여 공급하고 있음을 알 수 있으며 앞으로 캘리포니아의 전력회사들은 Rule 21의 그리드 코드에 명기된 다양한 advanced 인버터 기능을 활용하여 분산전원을 계통 운영에 활용할 것으로 예상된다.

앞에서 살펴 본 바와 같이 분산전원, 특히 인버터 기반의 그리드 접속용 분산전원 관련 산업은 그리드 코드의 도입, 표준화, 관련 정책 등과 큰 연관성을 가지고 있음을 알 수 있다.

그리드 코드를 일찍 개발하고 적용하였던 유럽을 중심으로 분산전원과 관련된 많은 기업들이 기술력을 높일 수 있었고 글로벌 시장을 점유하였으며 이제 일본과 미국의 기업들도 본격적으로 제품 개발과 함께 시장으로 뛰어들고 있다. 특히 중국은 후발 주자였지만 기술 개발을 통해 세계 최고 수준의 분산전원을 생산하는 능력과 시장 점유율을 보유하고 있다. 아직 까지 우리기업들은 보이지 않는다. 그러나 기술 개발을 계속하고 있다.

이제 우리도 분산전원을 본격적으로 도입하고 그리드 운영에 활용할 수 있도록 그리드 코드를 재정비하고, 표준화 작업을 가속화 하며, 인센티브제도 도입 등 관련 정책 개발을 활성화해야 한다. 우리기업들의 기술 개발을 더욱 가속화해야 한다.

표 2.3 미국 인버터용 통신 표준 인증 (SunSpec Alliance) 제품 및 그 기능

제품 제작사	제품 model	제품 인증 기능
SMA Solar Technology AG	SB xx00TL-US-22	1/11/12/102/120/ 160
	SBx.x-1SP-US-40	1/11/12/102/120/ 160
	STP 12000TL-US-10,	1/11/12/103/120/121/
	STP 15000TL-US-10,	122/127/160
	STP 20000TL-US-10,	
	STP 24000TL-US-10,	
	STP 30000TL-US-10	
Huawei	UN2000-22KTL-US, SUN2000-25KTL-US, SUN2000-30KTL-US	1/103/120/121/122/ 123/126/127/160
Delta Products	RPI M30A, RPI M50A	1/103/120/121/122/ 123/127/160
	RPI H7U, RPI H10U	1/103/120/121/122/ 123/127/160
ABB	TRIO-50.0-TL-OUTD,	1/103/120/121/123/

	TRIO-50.0-TL-OUTD-US -480	160/403
SunGrow Power	SG60KU, SG60KU-M	1/103
SCHNEIDER ELECTRIC	PVSCL25E, PVSCL20E, PVSCL18NA, PVSCL25NA	1/103/160
Ideal Power	IBC-20kW-480	1/103
KACO new energy	XP1OU-H4/H6	1/103
Solecetria	SGI500	1/101/102/103/111/112/113
Outback Power	AXS_PORT Comm	1/101/102/103
Fronius	SunSpec Modbus Card	1/101/102/103
Eltek	THEIA HT-t	1/101/102/103
Danfoss	MLX	1/101
SolarEdge	SE5000	1

* 오른쪽 인증 기능 항목에 있는 숫자는 advanced 인버터 제품의 기능을 나타내는 것임

001 (Common Model), 011 (Ethernet Link Layer Model), 012 (IPv4 Model)

101, 102, 103 (Inverter Integer Map), 120 (Inverter Controls Nameplate Ratings)

121 (Inverter Controls Basic Settings), 122 (Inverter Controls Extended Measurements)

123 (Immediate Inverter Controls), 124 (Basic Storage Controls), 126 (Static Volt-VAR Arrays)

127 (Parameterized Frequency-Watt), 128 (Dynamic Reactive Current)

131 (Watt-Power Factor), 132 (Volt-Watt), 160 (MPPT Inverter Extension Model)

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발

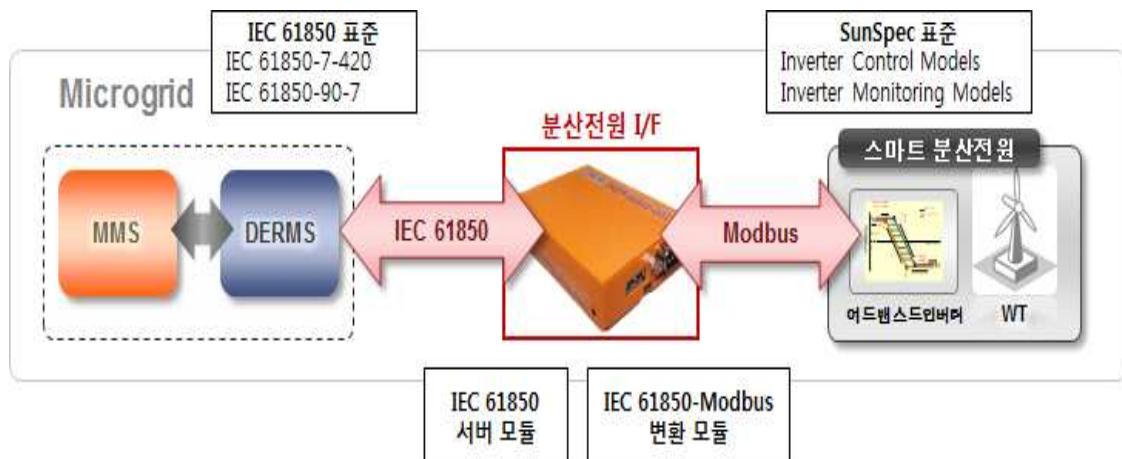


그림 3.1 스마트 분산전원 인터페이스 통신 개념도

전력 부족으로 인한 문제가 심각해지면서 전력난을 해소하기 위한 방안으로 분산전원에 대한 관심이 높아지고 있다. 분산전원의 경우 환경의 영향을 많이 받으므로 전력의 수요와 공급에 대해 파악하여 효율적 관리가 필요하다. IEC 61850 표준은 최근에 제안된 통신 방식으로 상호 호환성을 가지며, 보호, 샘플링 기능을 이용해 효율적으로 전력 공급과 수요를 관리 할 수 있다는 장점이 있다. IEC 61850은 처음에 변전소 자동화 시스템을 위해 제안 되었으나 많은 장점으로 인해 점차 적용 분야가 분산전원과 같은 신재생 에너지 분야 관리로 확대되고 있다. 기존의 분산전원은 주로 월드버스 방식으로 통신을 수행한다. 이러한 장치를 IEC 61850 기반으로 제어하기 위해 통신 방식을 변환해주는 인터페이스가 필요하다. 기존의 분산전원에 IEC 61850을 적용하여 관리할 수 있도록 오픈소스 하드웨어인 비글본 블랙 보드를 이용하여 개발한 초소형의 IEC 61850 인터페이스 모듈[9]에 대해 설명한다.

스마트 분산전원 인터페이스는 마이크로그리드에서 분산전원 제어에 IEC61850 통신을 적용하기 위해 스마트 분산전원 부분에 부착된다. 스마트 분산전원은 Sunspec modbus 명령으로 동작하고 DERMS에서 IEC61850 기반으로 제어 수행하므로 스마트 분산전원 인터페이스에서 IEC 61850 통신으로 변환해 SCADA 시스템에서 IEC 61850 통신을 이용해 분산전원을 제어할 수 있게 한다. 이러한 기능을 수행하기 위해 각 분산전원에 대해 데이터 모델링이 필요하고, 인터페이스 모듈에서는 데이터 매피ング, 분산전원과 SCADA 시스템 간 통신을 위해 modbus 통신과 IEC 61850 통신의 변환과 송수신 처리를 할 수 있도록 그림 3.1과 같이 구현해야 한다.

1. 개발 환경

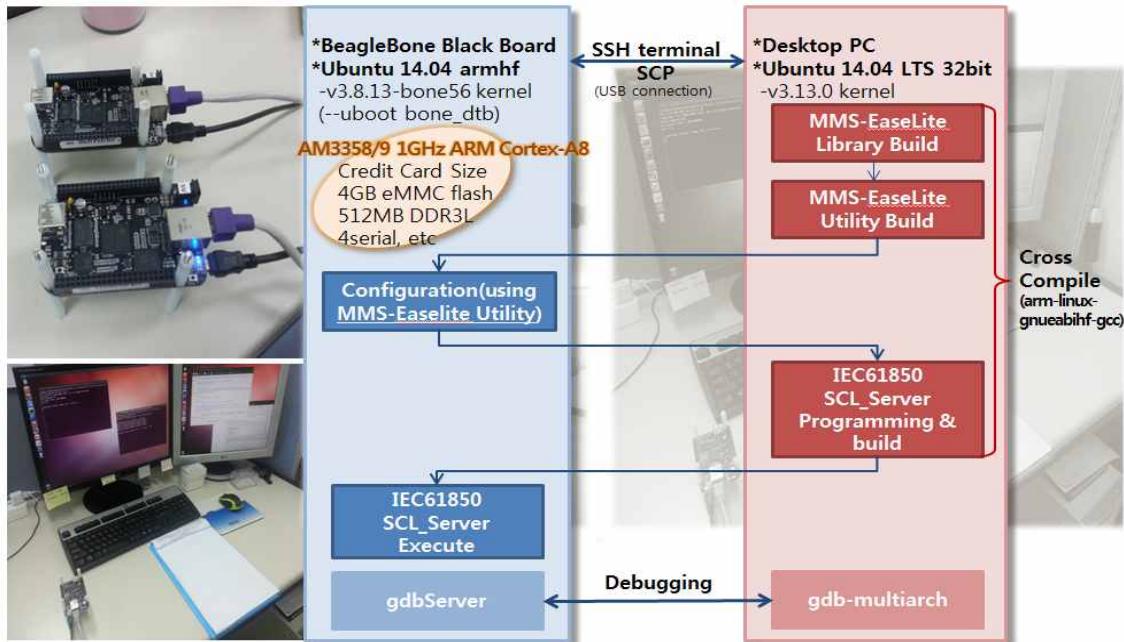


그림 3.2 The development environment of IEC 61850 interface module

그림 3.2는 IEC61850 인터페이스 모듈의 개발 환경을 설명하고 있다. 임베디드는 리눅스, Ubuntu 14.04 armhf가 보드의 운영 체제로 설치되어있으며, 그 이유는 인터페이스 모듈은 많은 기능을 처리해야하고, Ubuntu는 임베디드 리눅스로 Cortex-A8 프로세서에 최적화되어 있어서이다.

개발에는 임베디드 시스템의 크로스 컴파일을 위한 호스트 컴퓨터를 설정하고 리눅스 기반의 ARM GNU compiler collection (GCC), GNU C library, GNU binutils, GNU debugger (GDB)로 등을 포함하여 구성된 프로그래밍 도구 세트인 GNU toolchain을 사용하였다.

개발도구로는 기본값을 지원, 작업 공간 및 개발환경을 사용자 정의 할 수 있고 추가 플러그인을 제공하는 Eclipse IDE를 사용하였다.

인터페이스 모듈과 호스트 컴퓨터는 이더넷으로 연결되며 파일 전송은 SSH (Secure Shell)로 수행하였고, 처음에는 호스트 컴퓨터가 MMS-EaseLite 라이브러리 및 유ти리티를 빌드 하고, 인터페이스 모듈에 다운로드 되어 IEC 61850 구성을 수행한다. 그런 다음 응용 프로그램은 Eclipse IDE를 사용하여 프로그래밍 되고, 호스트 컴퓨터에서 빌드하게 된다. 컴파일 결과인 binary file은 인터페이스 모듈로 다운로드 되어 모듈에서 실행된다. 프로그래밍 후, 개발 된 어플리케이션은 호스트 컴퓨터로부터 대상 플랫폼의 원격 디버깅을 실행하는 GDB에 의해 디버깅 될 수 있으며 Eclipse IDE는 어플리케이션의 실행 상태를 보여준다.

2. 인터페이스 개요



그림 3.3 IEC 61850 인터페이스 모듈의 정보처리

IEC 61850 인터페이스를 개발하기 위해 상용 임베디드 보드인 비글본 블랙에 IEC 61850 서비스를 지원하기 위한 프로토콜 스택을 포팅 하였다. 그리고 IEC 61850 서버 모듈, 통신 인터페이스 모듈, 분산전원 데이터 모델링 정보를 탑재하여 간단하게 분산전원에 연결하는 것만으로도 IEC 61850 서비스를 지원할 수 있다.

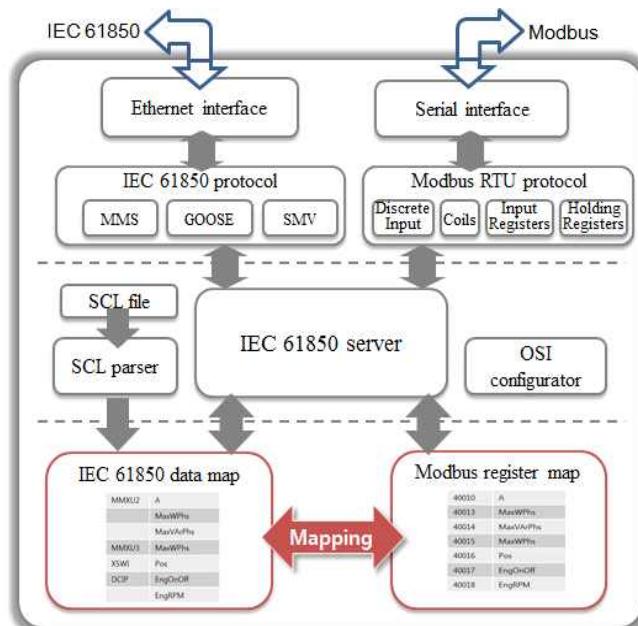


그림 3.4 인터페이스 모듈 내부 구성

비글본 블랙은 미국의 비글보드 재단에서 출시한 상용 임베디드 보드로 1GHz ARM Cortex-A8 프로세서를 탑재하고 다양한 인터페이스를 지원한다. 소형이면서 다양한 기능을 지원하며 개발 비용이 저렴하여 개발이 용이하다는 장점이 있어 인터페이스 개발에 사용하였다.

IEC 61850 서비스를 위한 프로토콜 스택의 경우 임베디드 보드에서 IEC 61850 서비스를 지원하기 위해서 MMS-EASE Lite를 포팅 하여 사용하였다. MMS-EASE Lite는 SISCO사에서 개발한 IEC 61850 프로토콜 스택으로 IEC 61850에서 정의하는 데이터 모델, 클라이언트-서버 통신, ACSI 서비스를 지원한다.

IEC 61850 서버 모듈은 특정 이벤트나 측정값에 대한 고속 전송 서비스인 GOOSE, SMV와 요청에 대한 응답을 수행하는 MMS 서비스를 이용해 IEC 61850 클라이언트와 통신을 수행하는 역할을 한다. 그리고 통신 인터페이스 모듈은 IEC 61850 서버 모듈에서 수행하는 통신 서비스와 분산전원에서 정의된 통신 서비스 간 변환을 하여 정보를 전달한다.

분산전원 정보 모델은 IEC 61850에서 정의하는 기본 정보 모델과 추가로 분산전원을 위해 제정된 정보 모델(IEC61850-7-420)에 따라 분산전원의 기능을 정의하였다. 태양광 발전, 풍력 발전, 디젤 발전, 에너지 저장 시스템에 대해 정보 모델을 설계하였다.

3. IEC 61850 정보 모델

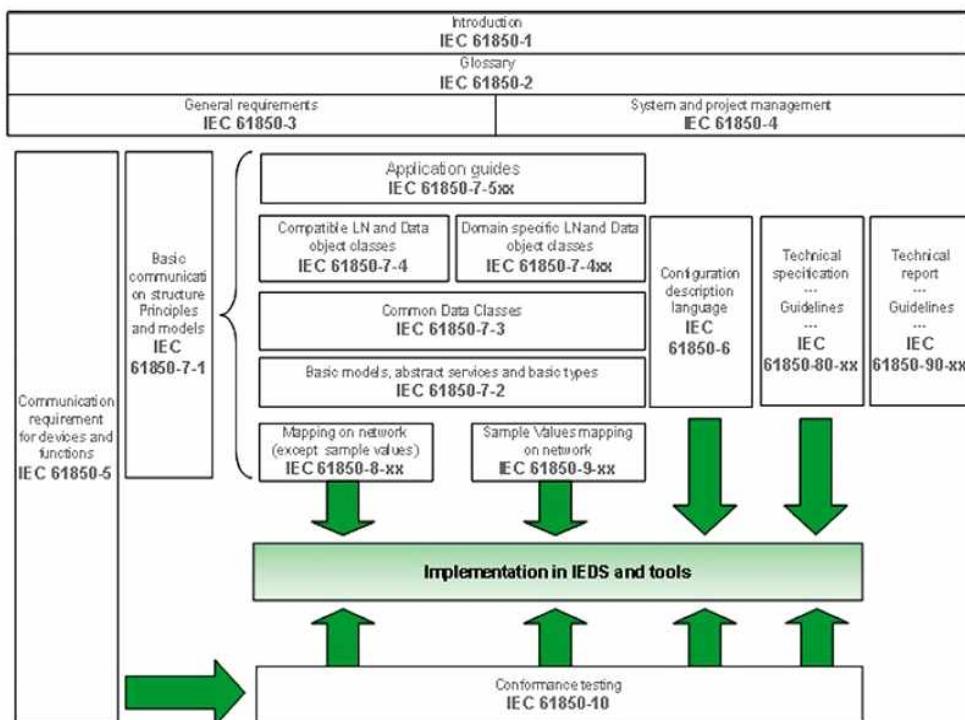


그림 3.5 IEC61850 표준 문서 간의 관계

IEC 61850은 전력계통의 표준화된 데이터 공유를 위한 표준 통신 규약으로, 공통 모델 정보 및 통신 규약과 변환소 자동화를 위한 데이터 모델 및 통신 표준으로 구성되어 있다[10]. CIM(Common Information Model, 공통 정보 모델)을 사용한 전력계통 애플리케이션간의 데이터 통합을 목적으로 다양한 애플리케이션 간의 데이터 통신을 위한 표준화된 인터페이스 방식을 정의하고 있으며 61850기반의 다양한 설비들 및 통신시스템의 개발이 이루어지고 있다.

IEC61850 표준에서 여러 개의 표준문서가 발행되었다. IEC61850 표준문서는 용도 별로 시스템, 구성, 데이터 모델, 추상통신 서비스 인터페이스, 통신네트워크 등으로 매핑 및 통신 적합성 시험으로 분류하였다.

(1) 시스템 관점

IEC 61850-1 : 개요 및 개론

IEC 61850-2 : 용어 해설

IEC 61850-3 : 일반 요구사항

IEC 61850-4 : 시스템 및 프로젝트 관리

IEC 61850-5 : 기능 및 장치모델에 대한 통신 요구사항

(2) 데이터 모델

IEC 61850-7-4 : 호환 가능한 논리노드 클래스와 데이터 클래스

IEC 61850-7-3 : 공통 데이터 클래스

(3) 추상 통신 서비스

IEC 61850-7-2 : 추상 통신 서비스 인터페이스

IEC 61850-7-1 : 기본 원칙과 모델

(4) 통신 네트워크 매핑

IEC 61850-8-1 : MMS와 ISO/IEC 8802-2과의 매핑

IEC 61850-9-2 : ISO/IEC 8802-3 통신에서 샘플 값 매핑

(5) 구성 및 설정

IEC 61850-6 : 변환소 IED용 구성언어

(6) 시험

IEC 61850-10 : 통신 적합성 시험

(7) 변전자동화

IEC 61850-90-4 : 네트워크 엔지니어링 가이드 라인

(8) 변환소 외부와의 통신

IEC 61850-80-1 : IEC 60870-5-101/104 매핑

IEC 61850-90-1 : 변환소 간의 통신

IEC 61850-90-5 : 동기 페이저 정보의 전송 (IEEE C37.118)

(9) 수력발전 플랜트

IEC 61850-7-410 : 수력발전 데이터 모델

(10) 배전자동화 및 분산에너지원

IEC 61850-7-420 : 분산에너지원의 데이터 모델

IEC 61850-90-7 : 배전자동화에서의 통신

(11) 풍력발전 터빈

IEC 61400-25 : 풍력발전에서의 통신

가. IEC61850 정보모델 핵심요소



그림 3.6 스마트 인버터용 IEC61850 정보모델

(1) IEC61850-7-420(DER)의 ECP논리장치와 DER논리장치에 확장된 논리노드

- DCRP: Corporate characteristics
- DOPR: Operational characteristics
- DOPA: Operational control authority
- DOPM: Operational parameter-based mode commands
- DGSM: Operational curve-based mode commands
- FMAR: Array for defining mode curves
- RDGS: Dynamic reactive current support
- FWHZ: Frequency-watt modes
- FPFW: Feed-in watt-triggered modes
- DPST: Status at ECP
- DCCT: Economic dispatch parameters
- DSCC: Schedule controllers for energy and ancillary services
- DSCH: Schedule for energy and/or ancillary services

(2) DER관리 시스템과 DER 제어기기(제어기, 전력변환기, 발전기, 저장장치 등) 사이의 상호 작용을 위한 논리노드

- DRAT: Generator ratings
- DRCT: Controller Characteristics
- DRCS: Controller Status
- DRCC: Supervisory Control
- DGEN: Unit Generator
- ZINV: Power converter
- ZBAT: Battery system
- ZBTC: Charger for the battery system
- MMXU: Measurement values
- MMDC: Direct current measurement values
- CSWI: Switch

(3) Key CDC (Common Data Classes)

- SPS - single point status CDC
- SPC - single point control CDC
- DPC - double point control CDC
- INC - integer point control CDC
- ING - integer status setting CDC
- ASG - analogue setting
- ORG - object reference setting
- CSG - curve shape settings CDC
- SCR - schedule specification CDC

(4) 최소한 필요한 메시징 서비스

- GetDataValues to read data (see 10.4.2 of IEC 61850-7-2:2010)
- SetDataValues to write data (see 10.4.3 of IEC 61850-7-2:2010)
- GetDataSetValues to read Data Sets of values (see 11.3.2 of IEC 61850-7-2:2010)
- SetDataSetValues to write Data Sets of values (see 11.3.3 of IEC 1850-7-2:2010)
- Logging for timestamped logs (see 14.3 of IEC 61850-7-2:2010)
- Reporting for event-driven information exchanges (e.g. event-driven publish-subscribe notification, report by exception) (see 14.2 of IEC 61850-7-2:2010)

- GetDataDirectory to retrieve the list of all DataAttributeNames within Logical Nodes (see 10.4.4 of IEC 61850-7-2:2010)
- GetDataDefinition to retrieve the complete list of all DataAttribute definitions (see 10.4.5 of IEC 61850-7-2:2010)
- GetDataSetDirectory to retrieve the list of the data objects within a Data Set (see 11.3.6 of IEC 61850-7-2:2010)

4. SunSpec 모드버스 맵핑

(1) SUNSPEC ALLIANCE INTEROPERABILITY SPECIFICATIONS

신재생 에너지 시스템에 사용되는 장치를 위한 정보 모델과 모드버스 레지스터 맵핑을 제공한다

장치는 하나 이상의 논리 모델의 집합으로 구성된다.

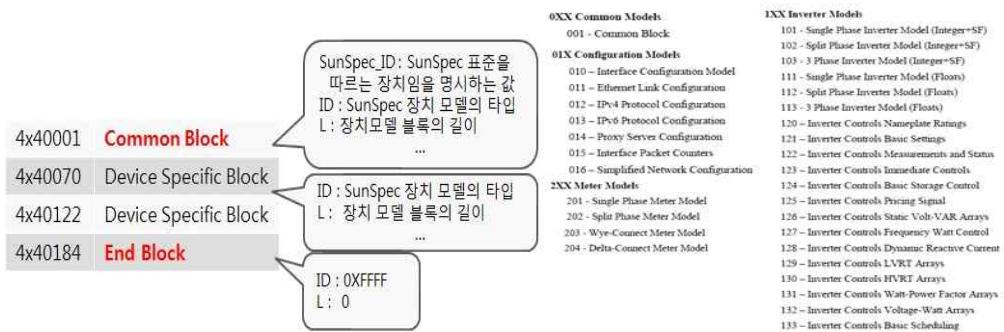


그림 3.7 인버터 제어 블록 구성과 사양 (Specification) 구성

사양 (Specification) 구성

- Common Models
- Inverter Control Models
- Inverter Monitoring Models
- Environmental Models
- Meter Models
- Panel Models
- String Combiner Models
- Data Exchange

(2) COMMON MODELS (ID = 001)

장치의 벤더, 모델 정보에 대한 데이터 모델과 모드버스 레지스터 맵핑한다.

처음 블록은 반드시 공통 블록 (common block) 이어야 한다.

표 3.1 모드버스 모델 맵핑

// 1-Common : All SunSpec compliant devices must include this as the first model ()

Start Offset	End Offset	Size	R/W	Name	Label	Type	Description	M/O
1	2	2	R	SID		uint32	A well-known value 0x53756e53 . Uniquely identifies this as a SunSpec Modbus Map	M
3	3	1	R	ID		unit16	A well-known value 1 . Uniquely identifies this as a SunSpec Common Model	M
4	4	1	R	L		uint16	Well-known # of 16 bit registers to follow: 66	M

// 1 Common Fixed Block (66)

5	20	16	R	Mn	Manufacturer	string	Well known value registered with SunSpec for compliance	M
21	36	16	R	Md	Model	string	Manufacturer specific value (32 chars)	M
37	44	8	R	Opt	Options	string	Manufacturer specific value (32 chars)	O
45	52	8	R	Vr	Version	string	Manufacturer specific value (32 chars)	O
53	68	16	R	SN	Serial Number	string	Manufacturer specific value (32 chars)	M
69	69	1	RW	DA	Device Address	uint16	Modbus device address	O
70	70	1	R	Pad		pad	Force even alignment	O

장치 고유 식별자

(3) INVERTER MONITORING MODELS (ID=103)

인버터 모니터링을 위한 데이터 모델과 모드버스 레지스터를 맵핑한다.

단상, 분상, 삼상 인버터 모니터링 모델 정의(ID=101, 102, 103 / 111, 112, 113)

표 3.2 데이터 종류

C_SunSpec_DID	block 종류 식별자
C_SunSpec_Length	block 크기
I_AC_XXXX	인버터 AC 값
I_DC_XXXX	인버터 DC 값
I_TEMP_XXXX	운전 온도 값
I_STATUS_XXXX	운전 상태
I_EVENT_XXXX	인버터 이벤트 플래그

표 3.3 모드버스 모델 맵핑

// 103-Inverter (Three Phase) : Include this model for three phase inverter monitoring()										
Start Offset	End Offset	Size	R/W	Name	Label	Type	Units	SF	Description	M/O
1	1	1	R	ID		uint16			A well-known value 103. Uniquely identifies this as a SunSpec Inverter (Three Phase) Model	M
2	2	1	R	L		uint16			Well-known # of 16 bit registers to follow : 50	M
// 103 Inverter (Three Phase) Fixed Block (50)										
3	3	1	R	A	Amps	uint16	A	A_SF	AC Current	M
4	4	1	R	AphA	Amps PhaseA	uint16	A	A_SF	Phase A Current	M
5	5	1	R	AphB	Amps PhaseB	uint16	A	A_SF	Phase B Current	M
6	6	1	R	AphC	Amps PhaseC	uint16	A	A_SF	Phase C Current	M
7	7	1	R	A_SF		sunssf				M
8	8	1	R	PPVphAB	Phase Voltage AB	uint16	V	V_SF	Phase Voltage AB	O
9	9	1	R	PPVphBC	Phase Voltage BC	uint16	V	V_SF	Phase Voltage BC	O
10	10	1	R	PPVphCA	Phase Voltage CA	uint16	V	V_SF	Phase Voltage CA	O
11	11	1	R	PhVphA	Phase Voltage AN	uint16	V	V_SF	Phase Voltage AN	M
12	12	1	R	PhVphB	Phase Voltage BN	uint16	V	V_SF	Phase Voltage BN	M
13	13	1	R	PhVphC	Phase Voltage CN	uint16	V	V_SF	Phase Voltage CN	M
14	14	1	R	V_SF		sunssf				M
15	15	1	R	W	Watts	int16	W	W_SF	AC Power	M
16	16	1	R	W_SF		sunssf				M
17	17	1	R	Hz		uint16	Hz	Hz_SF	Line Frequency	M
18	18	1	R	Hz_SF		sunssf				M
19	19	1	R	VA	VA	int16	VA	VA_SF	AC Apparent Power	O
20	20	1	R	VA_SF		sunssf				O
21	21	1	R	Var	VAr	int16	var	VAr_SF	AC Reactive Power	O
Start Offset	End Offset	Size	R/W	Name	Label	Type	Units	SF	Description	M/O
22	22	1	R	VAr_SF		sunssf				O
23	23	1	R	PF		int16	Pct	PF_SF	AC Power Factor	O
24	24	1	R	PF_SF		sunssf				O
25	26	2	R	WH	WattHours	acc32	Wh	WH_SF	AC Energy	M
27	27	1	R	WH_SF		sunssf				M
28	28	1	R	DCA	DC Amps	uint16	A	DCA_SF	DC Current	O
29	29	1	R	DCA_SF		sunssf				O
30	30	1	R	DCV	DC Voltage	uint16	V	DCV_SF	DC Voltage	O
31	31	1	R	DCV_SF		sunssf				O
32	32	1	R	DCW	DC Watts	int16	W	DCW_SF	DC Power	O
33	33	1	R	DCW_SF		sunssf				O
34	34	1	R	TmpCab	Cabinet Temperature	int16	C	Tmp_SF	Cabinet Temperature	M
35	35	1	R	TmpSink	Heat Sink Temperature	int16	C	Tmp_SF	Heat Sink Temperature	O
36	36	1	R	TmpTrns	Transformer Temperature	int16	C	Tmp_SF	Transformer Temperature	O
37	37	1	R	TmpOt	Other Temperature	int16	C	Tmp_SF	Other Temperature	O
38	38	1	R	Tmp_SF		sunssf				M
39	39	1	R	St	Operating State	enum16			Enumerated value: Operating state	M
40	40	1	R	StVnd	Vendor Operating State	enum16			Vendor specific operating state code	O
41	42	2	R	Evt1	Event1	bitfield32			Bitmask value: Event fields	M
43	44	2	R	Evt2	Event Bitfield2	bitfield32			Reserved for future use	M
45	46	2	R	EvtVnd1	Vendor Event Bitfield1	bitfield32			Vendor defined events	O
47	48	2	R	EvtVnd2	Vendor Event Bitfield2	bitfield32			Vendor defined events	O
49	50	2	R	EvtVnd3	Vendor Event Bitfield3	bitfield32			Vendor defined events	O
51	52	2	R	EvtVnd4	Vendor Event Bitfield4	bitfield32			Vendor defined events	O

(4) INVERTER CONTROL MODELS

프로그래밍, 스케줄링을 통해 인버터를 자동 제어하기 위한 데이터 모델과 모드버스 레지스터를 맵핑한다.

표 3.4 인버터 제어 블록 구성 과 인버터 제어 블록 종류

4x40001	Common Block	<ul style="list-style-type: none"> Nameplate Ratings (ID = 120) Basic Settings (ID = 121) Measurements and Extended Status Reporting (ID = 122)
4x40070	Inverter Model	<ul style="list-style-type: none"> Immediate Controls (ID = 123) Basic Storage Control (ID = 124) Pricing Signal (ID = 125)
4x40122	Nameplate Ratings	<ul style="list-style-type: none"> Static Volt-VAR Arrays (ID = 126) Frequency-Watt Control (ID = 127, 134)
4x40140	Basic Settings	<ul style="list-style-type: none"> Dynamic Reactive Current (ID = 128) LVRT Arrays (ID = 129)
4x40170	Extended Meas.	<ul style="list-style-type: none"> HVRT Arrays (ID = 130) Watt-Power Factor Array (ID = 131)
4x40207	Immediate Controls	<ul style="list-style-type: none"> Voltage-Watt Arrays (ID = 132) Basic Scheduling (ID = 133)
4x40229	Other Control Block	
4x40xxx	Other Control Block	
4x40xxx	End Block	

가. 기본 설정 관련 모델

- Nameplate Ratings : 인버터 설계나 제조 설정에 대해 제조업자가 설정한 값
- Basic Settings : 명판 (Nameplate)에서 정의한 인버터 운영상의 한계 값을 수정하기 위해 사용
- Measurements and Extended Status Reporting : 추가적인 인버터 상태 정보

나. 직접 제어 관련 모델

- Immediate Controls : 그리드 연계/차단, 최대 출력치 상한 조절, 역률, 무효전력 조절 등 기능
- Basic Storage Control : 배터리 기반의 저장 서브시스템의 위한 설정, 상태, 제어에 사용
- Pricing Signal : 가격 신호에 따라 에너지 저장 시스템의 에너지 충전, 방전 제어
- 제어모드 관련 모델
 - Static Volt-VAR Arrays
 - Frequency-Watt Control
 - Dynamic Reactive Current
 - Watt-Power Factor Array
 - Voltage-Watt Arrays
- Ride through 관련 모델
 - LVRT Arrays : 전압이 낮은 상황에서 지속시간-전압 배열에 따른 연결 제어
 - HVRT Arrays : 전압이 높은 상황에서 지속시간-전압 배열에 따른 연결 제어
- Scheduling 관련 모델
 - Basic Scheduling : 부가적인 자동화 제어에 사용, x-y 배열로 구성된다.

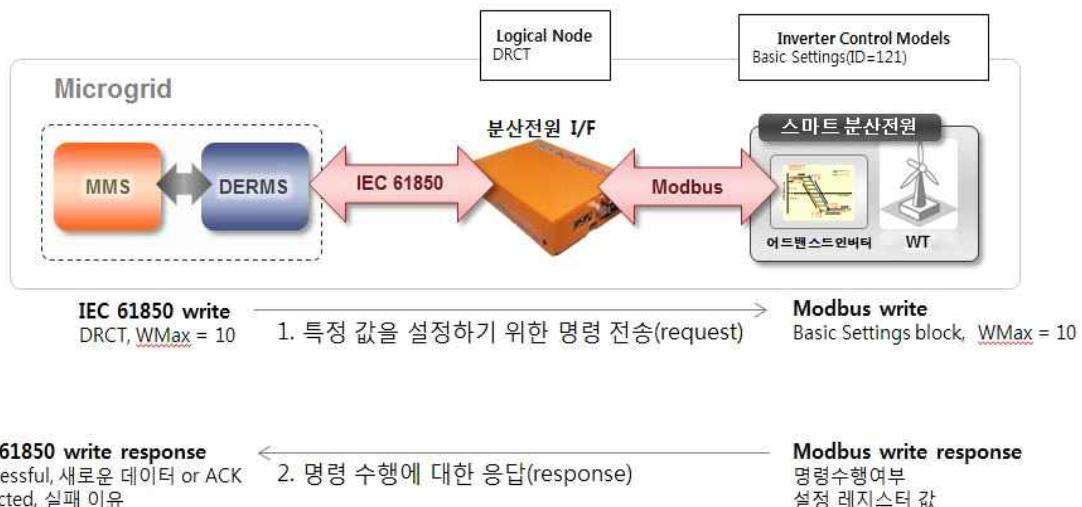


그림 3.8 IEC 61850 – SunSpec 정보 모델 간 데이터 변환

- DERMS에서는 IEC 61850 통신과 데이터 모델 사용한다.
- 스마트 분산전원에서는 SunSpec의 정보 모델과 모드버스 레지스터를 사용한다.

- 분산전원 I/F에서 데이터 모델 매핑과 통신 방식 변환 수행한다.

5. 동작 확인 시험



그림 3.9 동작 확인 시험 개념도

개발한 분산전원 인터페이스의 자체 테스트를 수행하기 위해 시뮬레이터를 이용하였다. 스마트 분산전원에서는 modbus 레지스터 read/write 명령에 대응할 수 있어야 하므로 Modbus PLC 시뮬레이터를 사용하고 sunspec modbus 레지스터 매핑에 따라 레지스터를 구성하였다.

DERMS에서는 IEC 61850 read/write 명령을 내리는 IEC 61850 클라이언트 동작을 수행해야 하므로 Triangle Microworks사의 IEC 61850 클라이언트 기능을 지원하는 Hammer 프로그램을 이용하였으며, Hammer 프로그램을 이용해 각 논리 노드 데이터에 대해 write/read 명령을 생성하고 write 명령에 대해서는 Modbus 시뮬레이터에서 데이터의 적절한 레지스터 주소에 값이 써지는지 확인하였다. read 명령에 대해서는 Modbus 시뮬레이터에서 데이터의 적절한 레지스터 주소에서 값을 읽어오는지 확인하였다.

제 2 절 스마트 분산전원 개발 및 시험환경 구축

1. 스마트 분산전원 기술개요

본 연구 과제를 통해 계통의 정상/과도 상태에 대응하기 위한 여러 기능을 갖는 스마트 분산전원을 개발하였다. 스마트 분산전원은 계통 운영자 또는 분산전원 사업자의 제어 명령에 즉시 응답할 수 있는 직접제어와 계통 상황에 따라 자동으로 대응하는 간접제어 기능을 갖는다.

표 3.5에 본 과제에서 개발한 스마트 인버터의 기능을 나타내었다. 각 제어 명령은 제 1절에서 설명한 IEC61850 인터페이스모듈을 통해 전달되며 Modbus RTU 통신 프로토콜을 사용하였다. 전달된 명령은 분산전원의 제어기에서 분류되어 제어 명령을 수행한다. 그리드 연계/차단을 제외한 각 기능별 명령은 Enable 변수에 의해 구분된다.

그림 3.10에 스마트 분산전원의 제어 구조를 보여준다. 출력 상한 조정과 주파수

-유효전력 제어의 출력 값은 유효전력 제어기에 전달되며 역률 제어와 주파수-유효전력 제어의 출력 값은 무효전력 제어기에 전달된다.

표 3.5 스마트 분산전원 기능 개발 목표

기능 구분	개발 목표
직접 제어 (기본기능)	그리드 연계/차단
	최대 출력 상한 조정
	역률 제어
간접 제어 (고급기능)	전압-무효전력 제어
	주파수-유효전력 제어
	LVRT 제어 기능

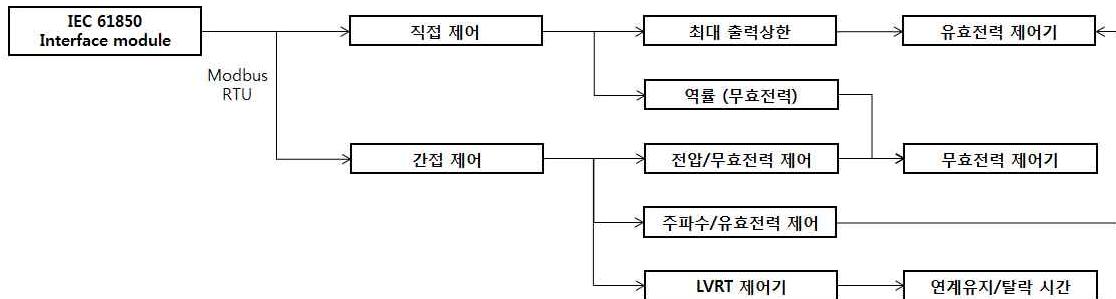


그림 3.10 스마트 분산전원 제어 구조

가. 스마트 분산전원용 계통 연계 인버터 구조 및 제어기

스마트 분산전원의 알고리즘을 적용하기 위해 그림 3.11의 계통 연계 인버터를 사용하였다. 원활한 실험 환경을 제공하기 위해 신재생 전원을 대신해 계통과 디어 오드 정류기를 사용하여 전력을 공급하도록 하였으며, DC-link capacitor, PWM inverter, 계통 연계 필터로 구성된다.

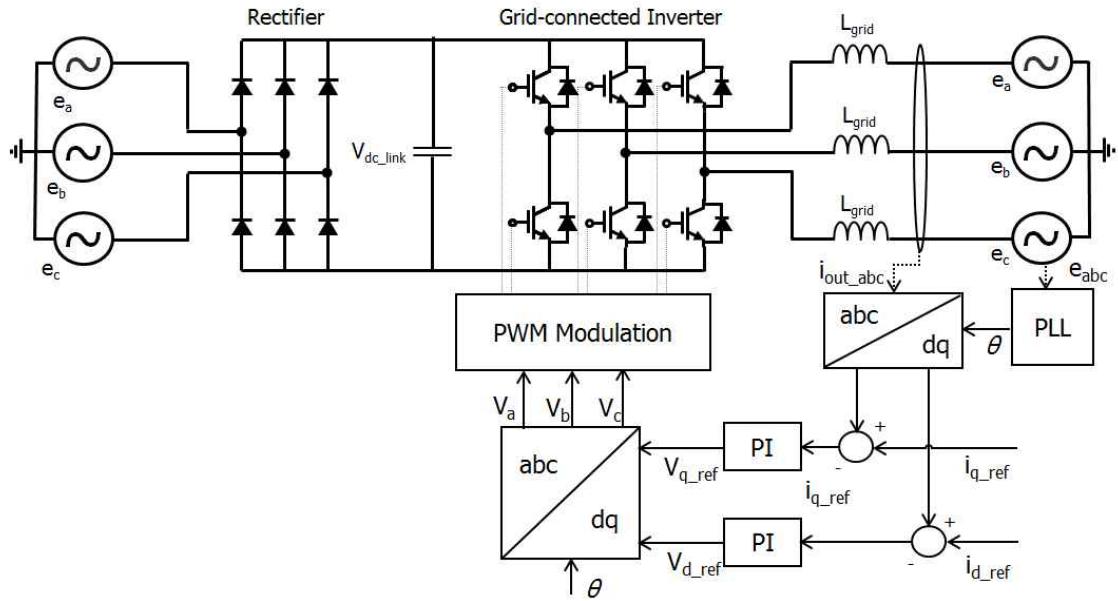


그림 3.11 스마트 분산전원용 계통 연계 인버터 구조 및 전류제어기

그림 3.11의 인버터는 계통과 다이오드 정류기를 사용하여 전원을 공급하므로 DC_link전압은 제어할 필요가 없으며, 전력변환장치의 출력 전류를 dq변환한 dq전류 제어를 통해 계통의 유·무효전력을 제어할 수 있다. 계통의 유·무효전력은 수식 3.1과 수식 3.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{grid} = v_q i_q \quad (3.1)$$

$$Q_{grid} = v_q i_d \quad (3.2)$$

그림의 인버터는 계통과 다이오드 정류기를 사용하여 전원을 공급하므로 DC_link전압은 제어할 필요가 없으며, 전력변환장치의 출력 전류를 dq변환한 dq전류 제어를 통해 계통의 유·무효전력을 제어할 수 있다. 계통의 유·무효전력은 수식 3.1과 수식 3.2와 같이 나타낼 수 있다.

나. 전력변환장치 유무효전력 출력 가능 용량

스마트 분산전원은 상황에 따라 유효전력뿐만 아니라 무효전력도 출력 가능해야 한다. 따라서 전원의 설계 용량보다 더 큰 피상전력을 낼 수 있게 전력변환장치의 출력 용량을 설계해야 한다. 캘리포니아 주의 연계 기준인 Rule 21에서는 용량이 15kW 이상에서는 역률을 ± 0.95 , 이하에서는 역률을 ± 0.9 까지 제어할 수 있도록 권장하고 있다[11]. 그림 3.12는 스마트 분산전원용 전력변환장치의 유, 무효전력 출력 가능량을 나타낸다.

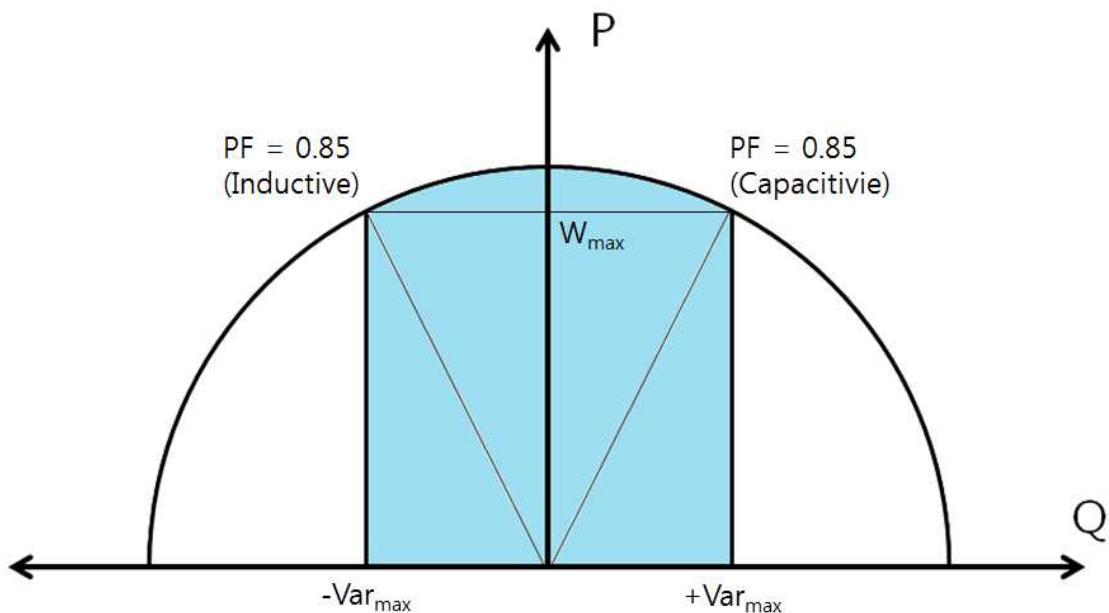


그림 3.12 유무효전력 출력 가능량

2. 스마트 분산전원 기본기능 개발

스마트 분산전원은 계통 운영자 혹은 사업자에 의해 직접 제어가 가능해야 한다. 직접 제어에는 그리드 연계/차단, 최대 출력 상한 조정, 역률 설정 등의 기능이 있다.

가. 계통 연계/차단 기능

계통 운영자 혹은 사업자가 스마트 분산전원 관리시스템을 통해 원격으로 투입/차단하기 위한 기능이다. Modbus 40348번지를 통해 기능 수행이 가능하며 1은 차단, 0은 투입으로 설계하였다.

나. 출력 상한 조정 기능

(1) 개요

출력 상한 조건 기능은 계통 운영자 혹은 사업자가 연계 접속점 기준으로 스마트 분산전원의 최대 출력 용량을 직접적으로 조정한다. 태양광 및 풍력 등의 신재생에너지 자원의 출력 용량이 세팅 값을 넘을 경우 이를 제한한다. 통신 장애나 관리시스템에 이상이 발생할 경우, 인버터가 재시작한 경우에는 기본 값으로 초기화 한다. 또한, 세팅 값이 변경되더라도 기능이 활성화 되지 않으면 인버터는 기본 값으로 전력을 제한할 수 있도록 설계해야 한다.

(2) 제어 알고리즘

그림 3.13은 출력 상한 조정 제어 시퀀스를 보여준다. 최대출력제어 (Maximum power point tracking, MPPT) 기능에 의해 구해진 전력 제한 값 보다 클 경우 이를 제한하도록 구성하였다. 제한 값이 IEC61850 인터페이스 모듈로부터 전송되더라도 모드가 Enable 되지 않으면 동작하지 않는다. 표 3.5는 출력 상한 조정 기능 관련 통신 맵이다.

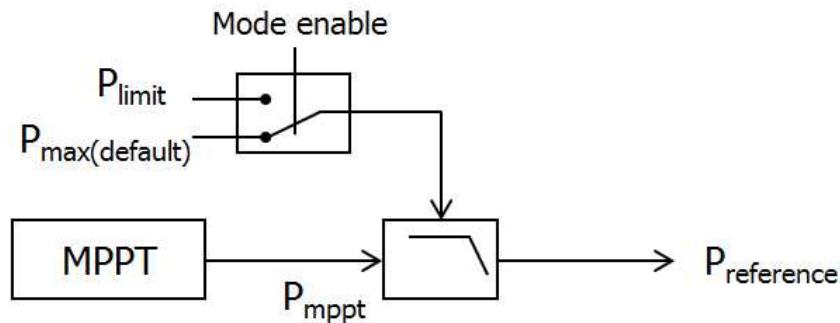


그림 3.13 출력 상한 조정 제어 알고리즘

표 3.5 출력 상한 조정 기능 관련 통신 맵 및 기능

명칭	기능	주소
Imm_WMaxLimPct	$P_{\text{limit}} = W_{\text{max}} * \text{Imm_WMaxLimPct} * 0.01$	40349
Imm_WMaxLim_Ena	Mode enable (0:Disable, 1:Enable)	40353

나. 역률 조정 기능

(1) 개요

기존 분산전원은 기본적으로 역률(Power Factor)을 1로 제어하였다. 역률 조정 기능은 분산전원 접속점에서 출력 역률을 세팅 값으로 일정하게 조정하는 기능이다. 세팅 값은 계통 운영자 혹은 사업자가 관리시스템을 사용하여 직접적으로 조정 할 수 있도록 개발하였다. 출력 상한 조정 기능과 동일하게 통신문제나 전력변환 장치가 재기동할 경우 세팅 값은 기본 값으로 변경된다. 또한, 세팅 값이 변경되더라도 기능이 활성화 되지 않으면 인버터는 역률을 1로 조정한다.

(2) 제어 알고리즘

그림 3.14는 역률 조정 기능 제어 시퀀스를 보여준다. 역률은 기본적으로 1로 제어되며, 인터페이스 모듈로부터 역률 세팅 값과 Enable 값이 전송 될 경우 역률을

조정한다. 그림의 Q_calculation 블록에서 무효전력 값이 계산되며 이를 수식 3.3과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 계산된 무효전력이 최대 무효전력 발전 값을 넘을 경우 이를 제한할 수 있도록 개발하였다. 여기서, P는 현재 유효전력량, PF는 역률이다.

$$Q_{reference} = \tan(\arccos(PF)) \times P \quad (3.3)$$

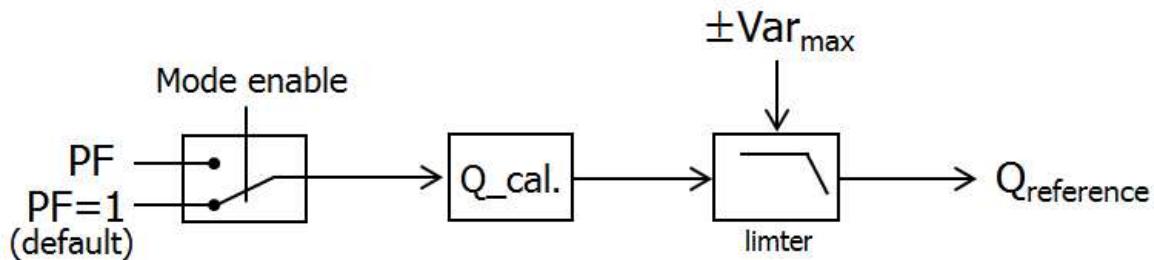


그림 3.14 역률 조정 기능 제어 알고리즘

표 3.6 역률 조정 기능 관련 통신 맵 및 기능

명칭	기능	주소
Imm_OutPFSet	역률 설정 값	40354
Imm_OutPFSet_Ena	Mode enable (0:Disable, 1:Enable)	40358

다. 스마트 분산전원 구축 및 기능 시험 결과

(1) 스마트 분산전원 구축

표 3.7은 스마트 분산전원용 전력변환장치의 사양을 보여준다. 기 구축한 풍력발전기 모의용 전력변환장치[12] 활용하였으며 다이오드 정류기 측과 계통 연계 인버터 측으로 나눌 수 있다. DC link 전압은 상황에 따라 변압기 텁을 조절하여 가능하며 350~400V 사이로 조정할 수 있다. 계통 측 DC-AC 인버터는 190/380V 변압기를 통해 계통과 연결된다. 그림 3.15는 사양에 구축한 스마트 분산전원의 전력변환장치이며, 그림 3.16은 설계 도면이다.

표 3.7 스마트 분산전원용 전력변환장치 사양

파라미터	값	값
종류	다이오드 정류기 측	계통 측
계통 전압	342 ~ 418 V	342 ~ 418 V
변압기 전압	240/250/260 V 텨	190 V
주파수	0.0 ~ 130 Hz	59.3 ~ 60.5 Hz
정격	15 kW	15 kW
효율	90% 이상	90% 이상
소음	60dB 이하 (1m거리)	60dB 이하 (1m거리)
전류고조파	5% 이하	5% 이하
냉각	강제공냉식	강제공냉식



그림 3.15 스마트분산전원용 전력변환장치

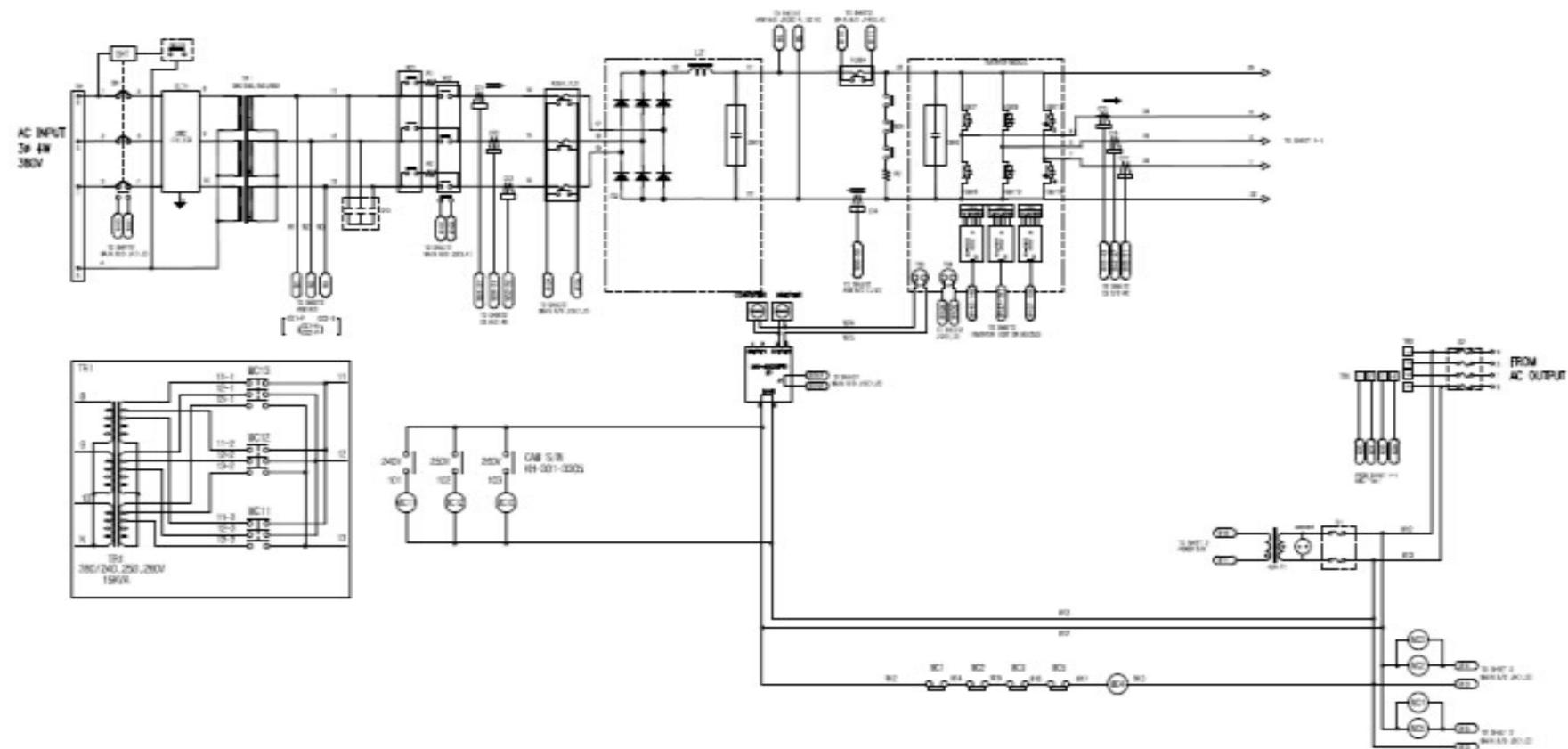


그림 3.16 스마트분산전원용 전력변환장치 회로도

(2) 실험결과

(가) 출력 상한 조정 기능

스마트 분산전원의 출력 상한 조정 시험을 위해 입력을 풍력 발전기로 모의하였다. 모의 풍력 발전기의 정격 용량은 10 kW이며, 풍속은 5 ~ 12 m/s로 변하는 것으로 가정하였다. 스마트 분산전원 통합관리시스템의 직접 제어 화면에서 유효 전력 출력 상한 값을 임의로 설정하였다. 초기 동작 시 분산전원은 풍속에 따라 출력 가능한 최대 유효전력을 계통으로 전송한다. 그림 3.17의 제어화면에서 출력 상한 값을 5 kW, 3 kW로 순차적으로 조정하였다. 그림 3.18에서 출력 상한 값이 조정되면서 유효 전력 출력 값이 설정에 따라 5 kW, 3 kW로 제한되는 것을 알 수 있다.

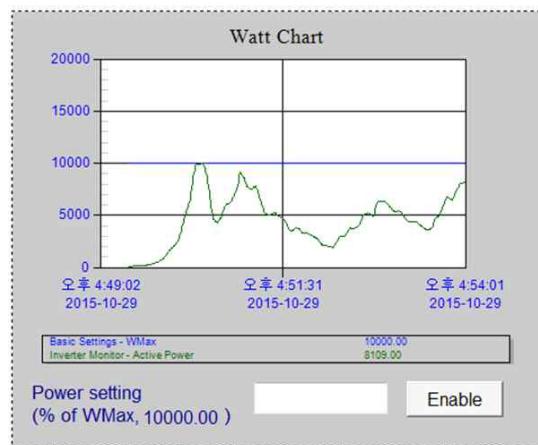


그림 3.17 출력상한제어 화면 (상한 값, Enable 버튼, 출력 모니터링)



그림 3.18 출력상한조정 기능 시험 결과 (풍속, 유효전력, 피치각, 출력 상한 조정 세팅 값)

(나) 역률 조정 시험 결과

출력 상한 조정 시험과 동일한 풍속 입력 조건에서 역률 조정 시험을 진행하였다. 초기 동작 시 역률을 1로 운전하며 이 때 무효전력은 0으로 제어된다. 그림 3.19의 통합관리시스템의 직접 제어화면에서 역률 값을 지상 0.95, 진상 0.95로 순차적으로 설정하였다. 그림 3.20에서 역률 설정 값이 조정되면서 역률을 조정하기 위해 무효 전력 출력이 유효전력을 따라 변하는 것을 알 수 있다.

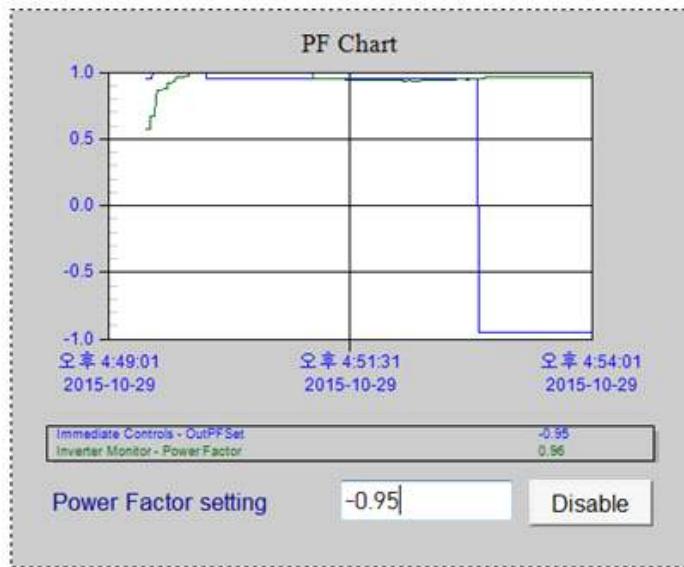


그림 3.19 역률 조정 설정 화면 (역률, Enable 버튼, 출력 모니터링)



그림 3.20 역률 조정 시험 결과 (풍속, 유효전력, 무효전력, 역률 세팅 값)

3. 스마트 분산전원 고급기능 개발

본 과제에서 스마트 분산전원이 계통의 정상 상태에서의 전압 상승 및 강하, 주파수 변동, 사고 시 과도상태에 대응할 수 있는 고급 기능을 갖도록 개발하였다. 개발된 스마트 분산전원은 이러한 계통의 이상 현상은 예고 없이 발생하므로 미리 입력된 설정 값에 따라 스스로 대응하도록 하였다. 설정 값은 계통 운영자가 통합관리시스템을 통해 변경 할 수 있다.

가. 전압-무효전력 제어 기능 (Volt-var control)

(1) 개요

전압-무효전력 제어는 분산전원용 전력변환장치가 그림 3.21과 같이 미리 설정된 전압-무효전력 관계 커브에 따라 전압이 변하면 무효전력을 조정하는 기능이다. 이러한 전압-무효전력 커브는 스마트 분산전원 통합 관리 시스템으로부터 변경 가능하며, 적절한 세팅 값 구하는 부분은 다음 절에서 다룬다. 유효전력의 출력량에 영향을 주지 않도록 최대 발전 가능 무효전력량(VArAval)을 설정한다. 이 값은 전력변환장치의 설계 용량에 따라 결정된다.

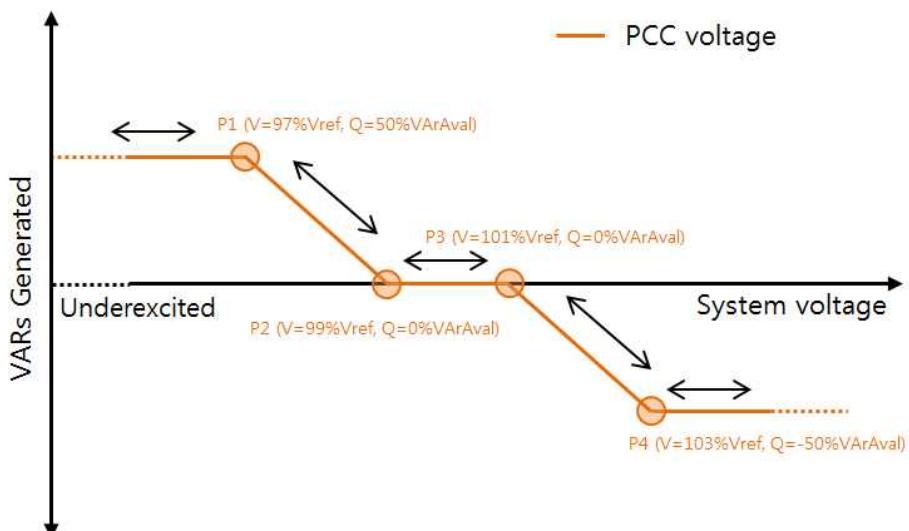


그림 3.21 전압-무효전력 (Volt-var) 커브 예시

(2) 제어 알고리즘

그림 3.22은 전압-무효전력 제어 알고리즘을 보여준다. 전압-무효전력 테이블 어레이를 통해 전압에 따라 무효전력 값을 계산하고, Ramp rate을 통해 최종 레퍼런스가 무효전력제어기로 전달된다. Ramp rate을 설정한 이유는 작은 전압 변동에 무효전력이 빈번하게 변하는 것을 줄이기 위해서이다. 전압-무효전력 어레이는 12 by

12 까지 개수를 변경할 수 있으며 입력된 값은 선형 방정식을 이용해 무효전력을 계산한다. 표 3.8은 전압-무효전력 제어 기능 관련 통신 맵이다.

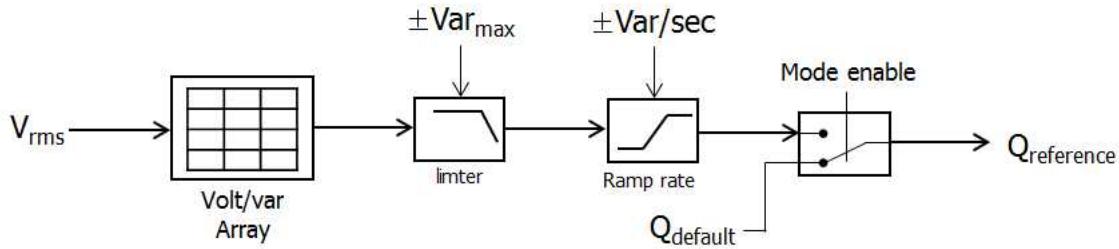


그림 3.22 전압-무효전력 제어 알고리즘

표 3.8 전압-무효전력 제어 기능 관련 통신 맵 및 기능

명칭	기능	주소
VV_ActPt	활성화된 어레이 개수	40408
VV_VN	N번째 전압, 1~12	40410 ~ 40432, 짝수 번째만
VV_VArN	N번째 무효전력, 1~12	40411 ~ 40433, 홀수 번째만
VV_ModEna	Mode enable (0:Disable, 1:Enable)	40399

나. 주파수-유효전력 제어 기능 (Frequency-watt control)

(1) 개요

주파수-유효전력 제어는 분산전원용 전력변환장치가 그림 3.23과 같이 미리 설정된 주파수-유효전력 관계 커브에 따라 유효전력을 조정하는 기능이다. 이 기능은 계통의 비상 상황에 대한 큰 주파수 변화뿐만 아니라 작은 주파수 변화에도 사용된다. 또한, 정격 주파수의 일정 범위 안에서는 Dead-band를 넣어서 동작하지 않도록 설정 할 수 있다. 이러한 주파수-유효전력 커브는 스마트 분산전원 통합 관리 시스템으로부터 입력 및 변경 가능하다.

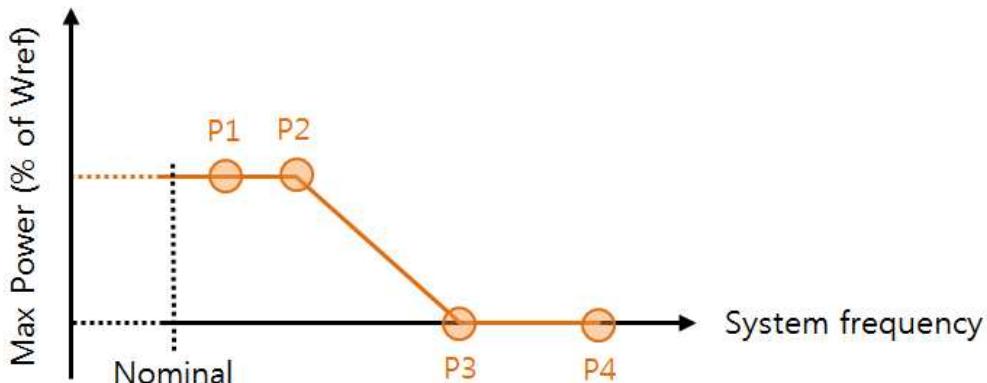


그림 3.23 주파수-유효전력 (Frequency-Watt) 커브 예시

(2) 제어 알고리즘

그림 3.24는 주파수-유효전력 제어 알고리즘을 보여준다. 주파수-유효전력 테이블 어레이를 통해 주파수에 따라 출력 감소율(% of Wref)을 계산하고, 이를 이용해 출력 전력 지령값을 계산한다.

주파수-유효전력 어레이에는 10 by 10 까지 개수를 변경할 수 있으며 입력된 값은 선형 방정식을 이용해 출력 감소율을 계산한다. 표 3.9는 주파수-유효전력 제어 기능 관련 통신 맵이다.

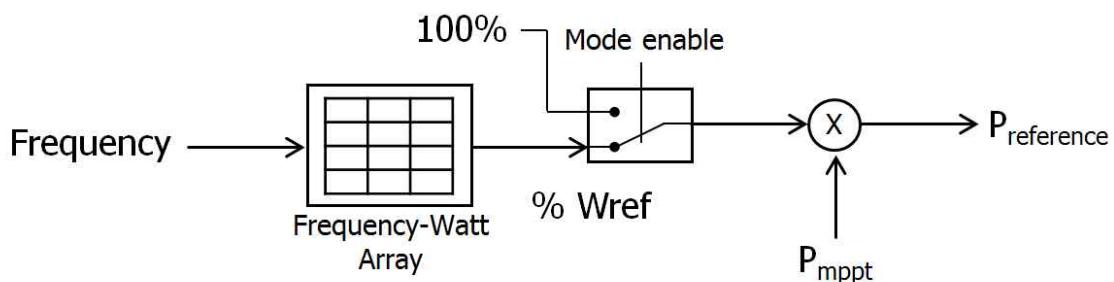


그림 3.24 주파수-유효전력 (Frequency-Watt) 제어 알고리즘

표 3.9 주파수-유효전력 제어 기능 관련 통신 맵 및 기능

명칭	기능	주소
FW22_NPt	설정된 어레이 점 수	40621
FW22_HzN	N번째 주파수, 1~10	40648 ~ 40666, 짝수 번째만
FW22_WN	N번째 출력 감소율, 1~10	40449 ~ 40667, 홀수 번째만
FW22_ModEna	Mode enable (0:Disable, 1:Enable)	40622

다. Low/High Voltage Ride-Through 기능

(1) 개요

L/HVRT (Low/High Voltage Ride-Through) 기능은 계통의 사고에 의해 순간적으로 전압 이상(저전압, 고전압)이 발생하더라도 규정된 시간만큼 전력을 공급하는 기능이다. 또한, 스마트 분산전원에서의 FRT 기능은 계통 운영자가 설정을 변경하더라도 그에 맞게 동작해야 한다.

그림 3.25는 L/HVRT 곡선의 예를 보여준다. L/HVRT 곡선은 연결 유지 영역(Must Remain Connect), 연결 차단 영역(Must Disconnect), 중립 영역(Remaining Connected or Disconnecting is Allowed)으로 구분된다. 연결 유지 영역에서는 반드시 일정 시간까지 출력을 내야하며, 그 후 중립 영역에서는 연결을 끊고 운전을 정지하는 것이 가능하다. 하지만 연결 차단 영역 전에는 반드시 연결을 끊고 운전을 정지해야 한다.

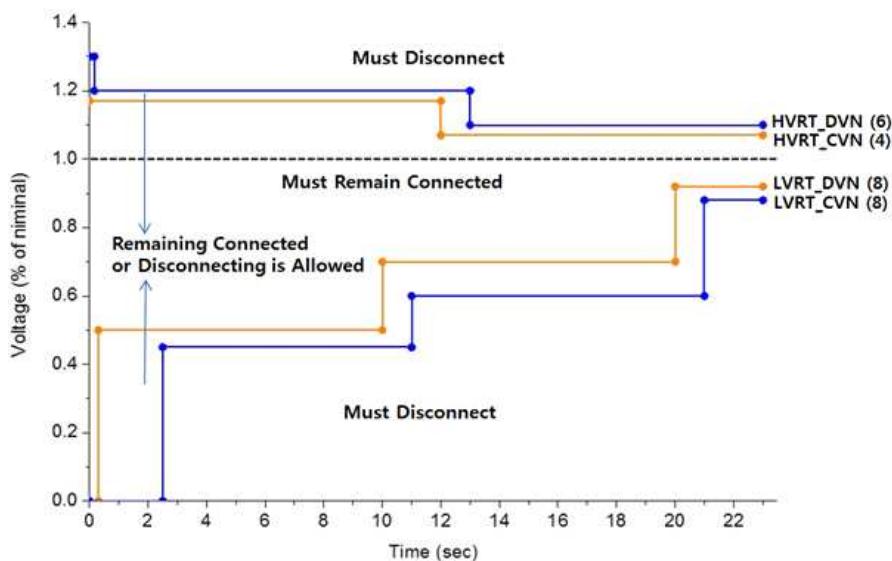


그림 3.25 L/HVRT 곡선 예시

(2) 제어 시퀀스

L/HVRT의 제어 동작은 전압 이상이 발생한 경우 이를 감지하여 그 전압에서의 연결 유지 시간과 차단 시간을 미리 입력된 곡선을 통해 계산한다. 그 후 연결을 유지하면서 타이머를 동작시켜 시간을 체크한다. 만약 연결 유지 시간 전에 전압이 복귀되면 타이머를 리셋 한다. 하지만 전압이 차단 시간 안에 회복되지 않으면 계통과 연계를 차단하고 운전을 중지시킨다.

표 3.10은 LVRT 기능 관련 통신 맵을 보여준다. 통합관리시스템으로부터 입력되는 LVRT 곡선은 Must disconnect 그래프 점 10개, Must connect 그래프 점 10개까

지 사용이 가능하며 HVRT 곡선 역시 각각 10개씩 입력이 가능하다.

표 3.10 LVRT 기능 관련 통신 맵 및 기능

명칭	기능	주소
LVRT_NPt	설정된 곡선 점 수	40492
LVRT_DTmsN	Must Disconnect 영역 N번째 시간	40505 ~ 40523, 홀수 번째만
LVRT_DVN	Must Disconnect 영역 N번째 전압	40506 ~ 40524, 짝수 번째만
LVRT_TmsN	Must Connect 영역 N번째 시간	40534 ~ 40552, 짝수 번째만
LVRT_VN	Must Connect 영역 N번째 전압	40535 ~ 40553, 홀수 번째만
LVRT_ModEna	Mode enable (0:Disable, 1:Enable)	40493

라. 스마트 분산전원 고급 기능 시험 결과

(1) 전압-무효전력 시험 결과

스마트 분산전원의 전압-무효전력 시험을 위해 분산전원은 시간에 따라 전력이 변하는 것을 가정하였고, 전압은 220V부터 242V까지 상승했다가 190V까지 강하하는 것으로 가정하였다. 그림 3.26의 Volt-Var 제어 설정 화면에서 총 6개의 점을 입력하여 곡선을 설정하였다. 그림 3.2.18에서 전압이 상승하고 강하함에 따라 무효전력이 변하는 것을 알 수 있다.

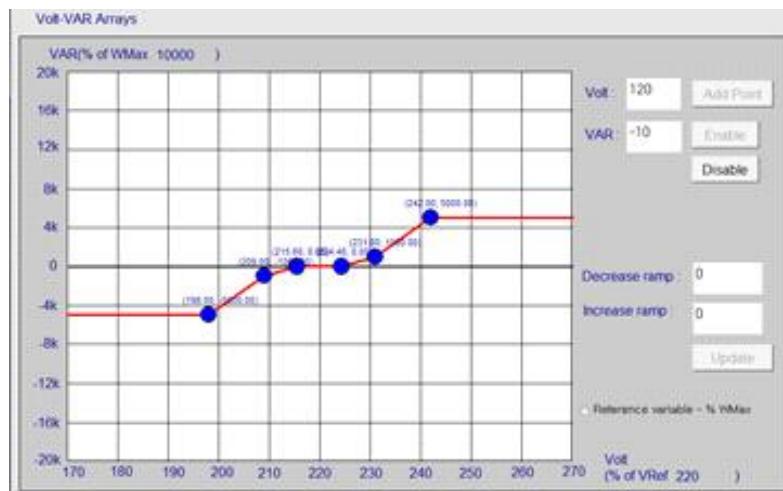


그림 3.26 전압-무효전력 제어 설정 화면

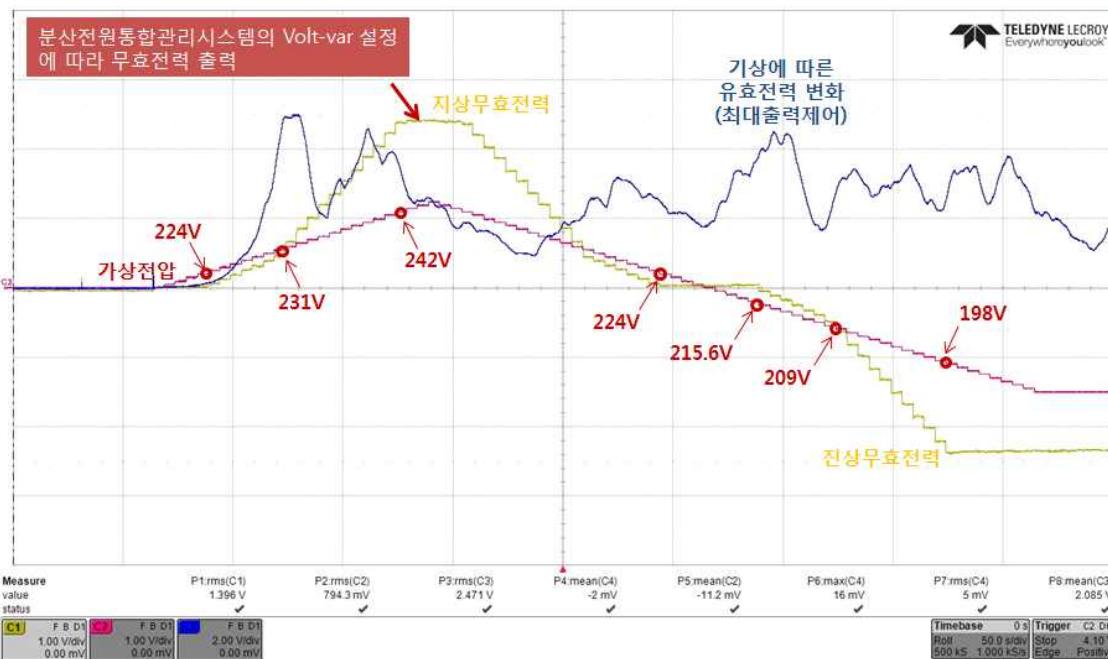


그림 3.27 전압-무효전력시험 결과 (유효전력, 무효전력, 계통 전압)

(2) 주파수-전력 시험 결과

스마트 분산전원의 주파수-전력 기능 시험을 위해 그림 3.28와 같은 출력 곡선을 입력하였다. 시스템 주파수가 60.2Hz 까지는 출력을 감소시키지 않으며, 60.2 Hz부터 감소하기 시작하여 60.5 Hz에 50%로 출력을 줄인다. 그림 3.29은 주파수 변동에 따른 출력 전력 변화를 보여준다. 60.2 Hz에서 60.5Hz의 주파수 구간에서 출력을 100~50%로 감소시키는 것을 알 수 있다.

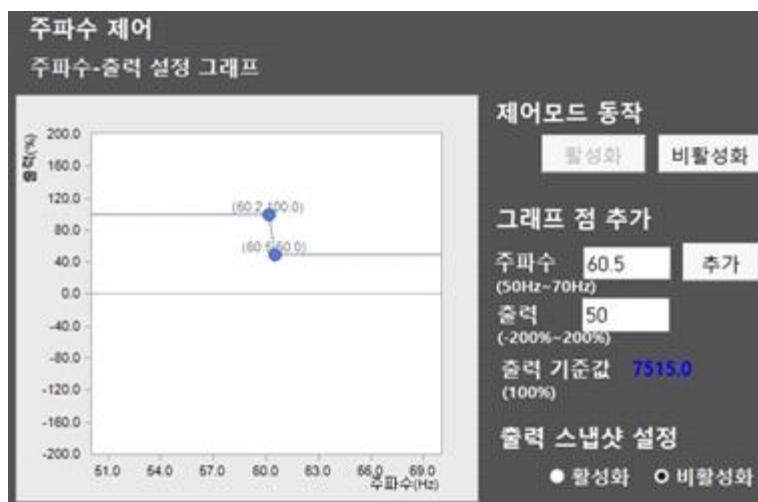


그림 3.28 주파수-전력 제어 설정 화면

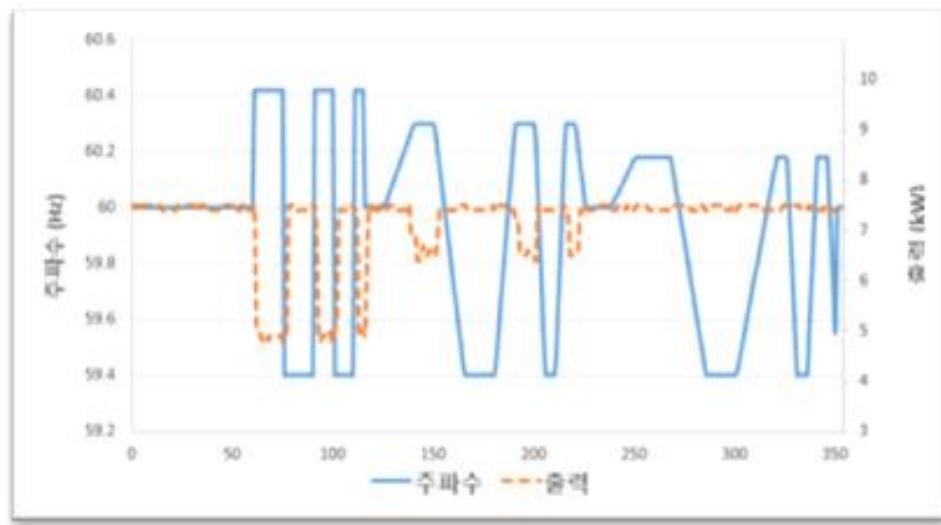


그림 3.29 주파수-전력 제어 기능 시험 결과 (원본 자료 수정)

(3) L/HVRT 기능 시험 결과

L/HVRT 기능 시험을 위해 Rule21a의 L/HVRT 규정을 적용하여 스마트 분산전원을 설정하였다. 표 3.11에 Rule 21a의 L/HVRT 규정을 나타내었다. Rule 21의 경우 Must connect와 Must Disconnect 영역으로 나눠져 있으며, 특히 전압이 $0 \sim 0.5$ pu 사이에서는 0.3초 안에 출력 전력을 0으로 감소 시켜야 한다. 스마트분산전원 통합 관리시스템을 통해 그림 3.30과 3.31와 같이 L/HVRT 곡선을 설정하였다. 전압 구간 및 시간 별로 총 8개의 시험을 진행 하였다. Test 1 ~ 5까지는 LVRT 기능 시험이며 Test 6 ~ 8은 HVRT 기능 시험이다.

표 3.11 L/HVRT 규정 (Rule 21a)

Lim	Voltage Level Multiplier of Nominal Voltage	Stay Connected Until	Lim	Voltage Level Multiplier of Nominal Voltage	Disconnect by
c			d	>1.2	< 0.16 sec
c	1.07-1.17	12 sec.	d	1.1 - 1.2	13 sec
	0.92-1.07	Indefinite		0.88 – 1.1	Do not disconnect
b	0.7 – 0.92	20 sec	a	0.6 – 0.88	21 sec
b	0.5 – 0.7	10 sec	a	0.45 – 0.6	11 sec
b	0 – 0.5	0.3 sec (range between 0.16 to 2.0 sec)	a	0 – 0.45	2.5 sec

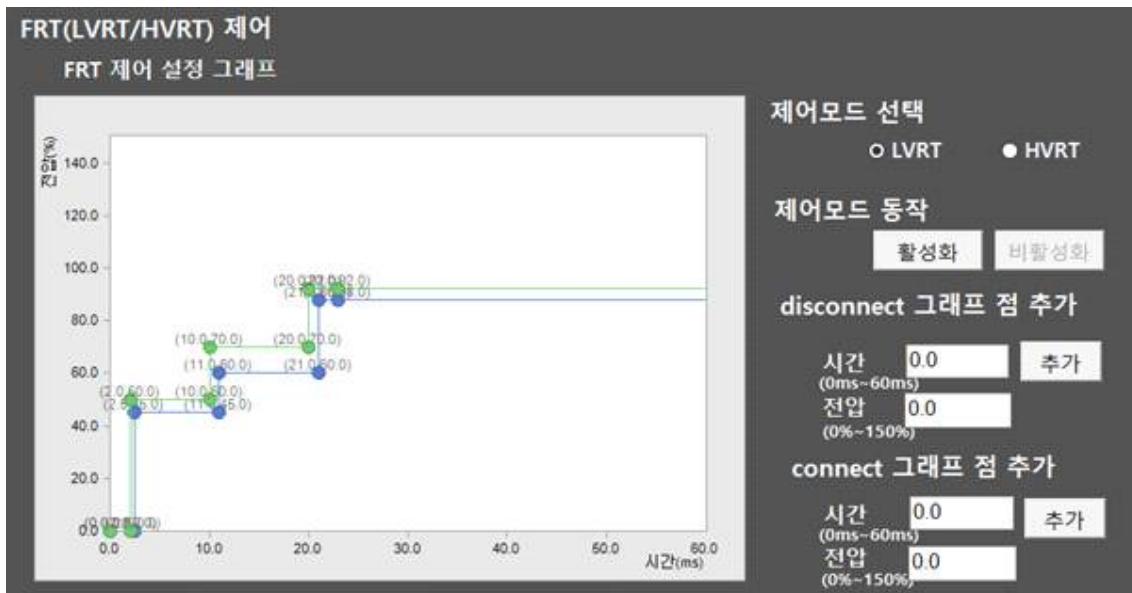


그림 3.30 LVRT 곡선 설정 화면

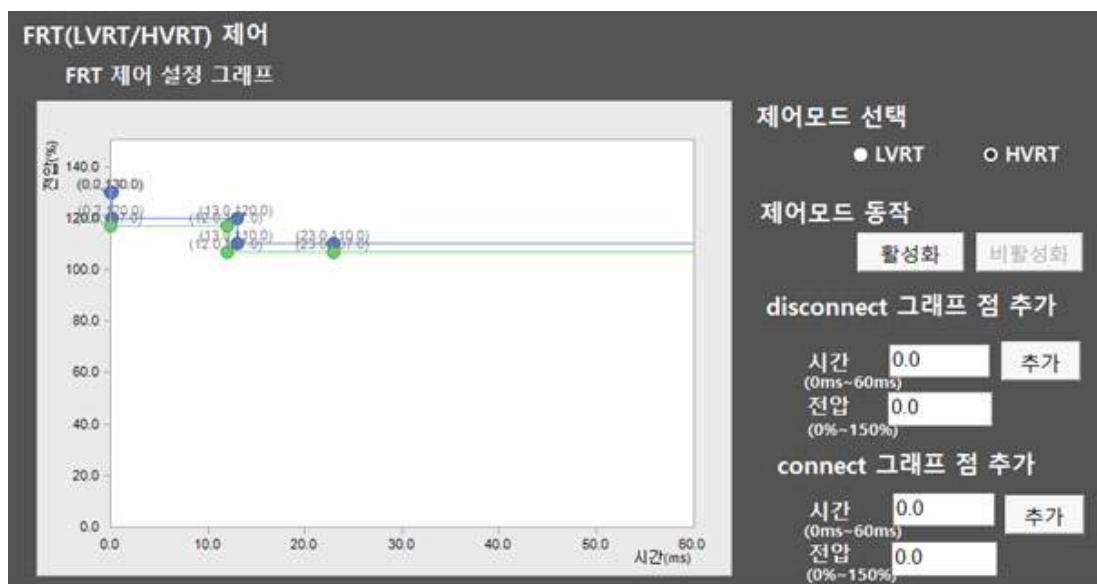


그림 3.31 HVRT 곡선 설정 화면

표 3.12에 L/HVRT 기능 시험 결과를 정리하였다. Expected Trip Time based on L/HVRT curve는 Rule 21에 규정된 Must disconnect 시간이며 이 시간 안에 운전을 정지해야 한다. Expected Trip Time based on EUT는 스마트 분산전원에 설정된 시간이고, 표의 빨간색 영역은 실험 결과이다. Test 1 ~ 8까지 설정된 시간까지 운전을 지속하다가 설정 시간에 맞춰 운전을 정지 한 것을 알 수 있다.

표 3.12 L/HVRT 시험 결과

L/HVRT Curve	Test Number	Voltage Test Points	Voltage	Expected Trip Time based on L/HVRT Curve	Expected Trip Time based on EUT settings	Trip Time
Rlue 21	Test 1	0	0	2.5 s	2.3 s	2.30
	Test 2	0.45	99	2.5 s	2.3 s	2.30
	Test 3	0.55	121	11.0 s	10.8 s	10.80
	Test 4	0.85	187	21.0 s	20.8 s	20.80
	Test 5	0.95	209	No Trip	No Trip	>60.0
	Test 6	1.05	231	No Trip	No Trip	>60.0
	Test 7	1.15	253	13.0 s	12.8 s	12.80
	Test 8	1.22	268.4	0.16 s	0.15 s	-

그림 3.32는 Test 4의 LVRT 기능 시험결과를 보여준다. 전압이 0.85로 떨어졌을 때 출력을 유지하기 위해 전류를 증가시키면서 출력을 유지하는 것을 알 수 있다. 하지만 전압이 규정된 시간 안에 회복하지 않아 설정된 시간에 스마트 분산전원이 운전을 정지하는 것을 알 수 있다. 그림 3.33은 Test 8의 HVRT 기능 시험 결과를 보여준다. 반대로 HVRT 시험은 출력을 유지하기 위해 전류를 감소시키는 것을 알 수 있고 설정된 시간 이후 정지한다.

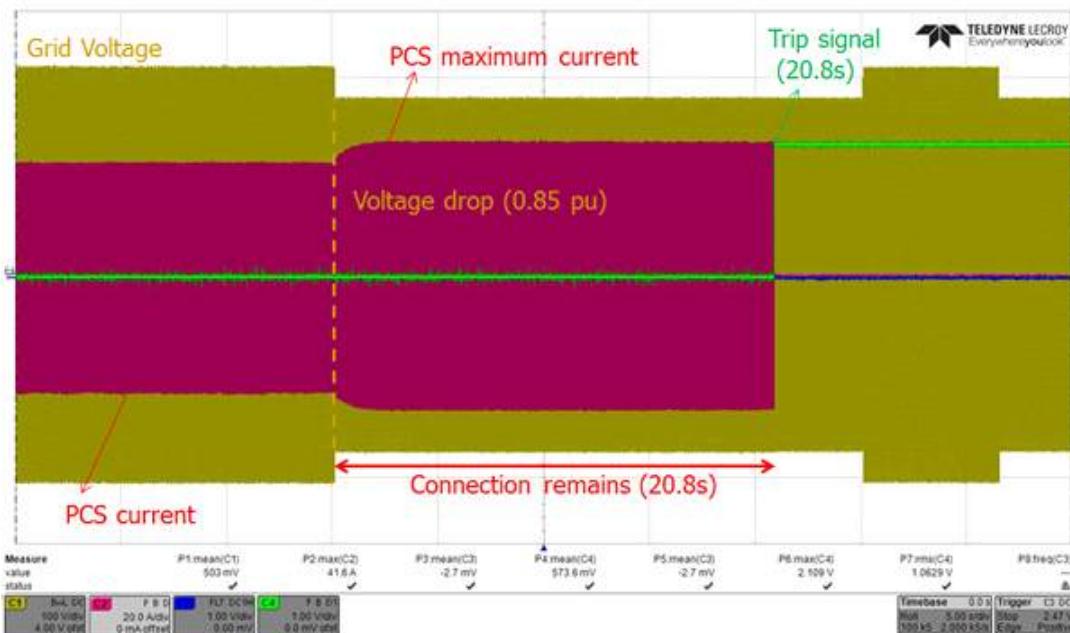


그림 3.32 Test 4, LVRT 시험 결과 (계통 전압, 출력 전류)

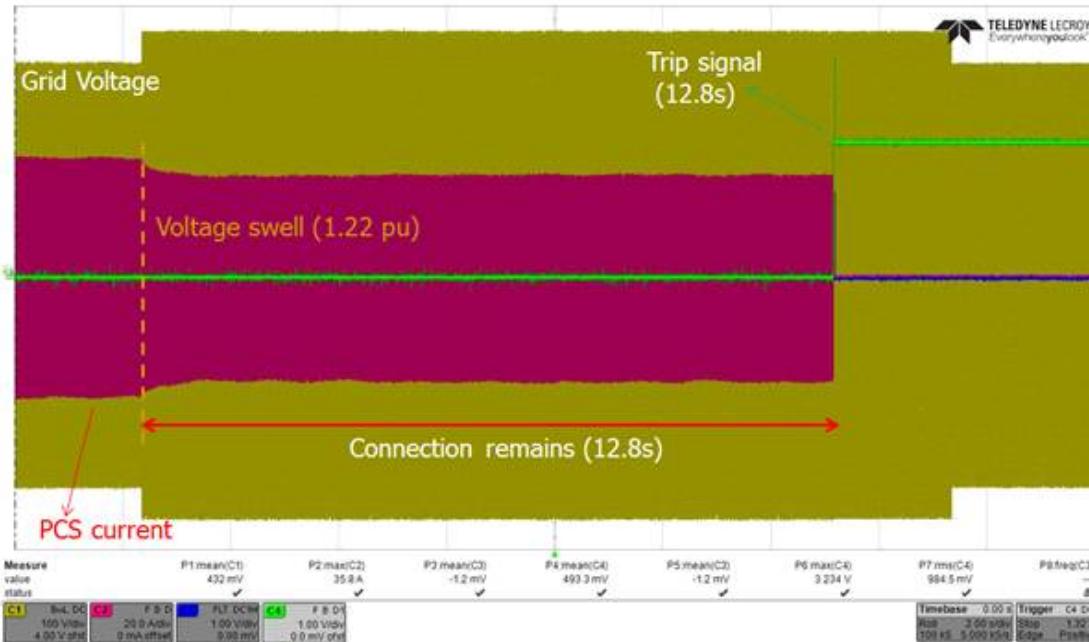


그림 3.33 Test 8, HVRT 시험 결과 (계통 전압, 출력 전류)

4. 스마트 분산전원 시험 환경 구축

본 과제에서 개발 중인 스마트 분산전원 및 통합관리시스템의 기능 및 성능 시험을 위한 환경을 구축하였다. 계통 모의장치, 선로 모의장치, 부하 모의장치(2대)로 구성하였다. 계통 모의 장치는 계통 전압 및 OLTC(On-load Tap Changer)를 모의하고, 선로 모의 장치는 배전 계통의 변압기 및 케이블의 임피던스를 모의하기 위해 사용한다. 부하 모의 장치는 선로 모의 장치에 연결되어 유무효 전력의 출력량을 변경함으로써 부하를 모의할 수 있도록 제작하였다.



그림 3.34 스마트 분산전원 및 통합관리시스템 시험 환경 구축

가. 계통 모의 장치

계통 모의 장치는 배전 계통의 전압 변동, 주파수 변동, 사고 상황 등을 모의하며 스마트 인버터 기능 및 성능 시험에 사용한다. 계통 모의 장치의 출력은 3상 0 ~ 400 V 까지 조작 가능하며 배전 선로 모의 장치에 연결하여 사용한다. 계통 모의 장치 전면부의 디스플레이 장치를 이용해 출력 전압 파형 및 메뉴 조작을 확인 할 수 있으며 통신을 통해 원격으로도 조작이 가능해야 한다. 조작 대상으로는 출력 전압의 크기, 주파수, 파형, 고조파 등이 있다.

계통 모의 장치의 주요 기능은 다음과 같다.

◎ Source/Sink 변환 기능

- 배전계통 모의를 위한 source/sink 모드 제어 (그림 3.35)

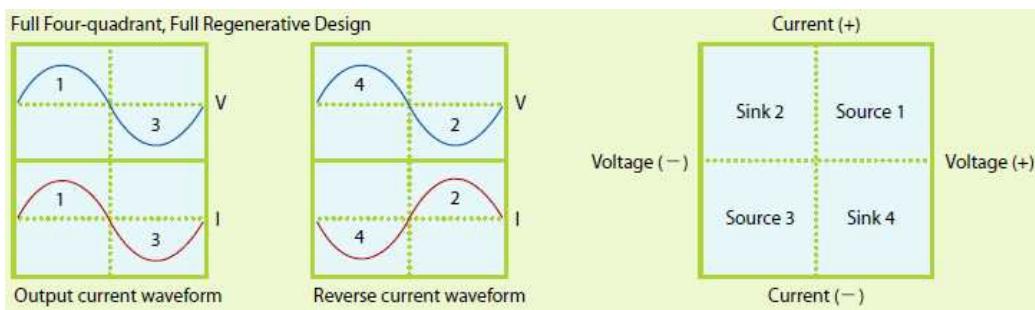


그림 3.35 Source/Sink 모드 제어

- 주 계통에서 배전계통으로 전력을 공급하는 경우와 배전계통에서 주 계통으로 전력을 공급하는 경우 모두 모의가 가능해야 함

◎ 출력 전압 파형 제어 기능

- 모의 계통의 전압파형을 다양한 형태로 연출할 수 있는 파형 제어 모드가 내제 (그림 3.36)

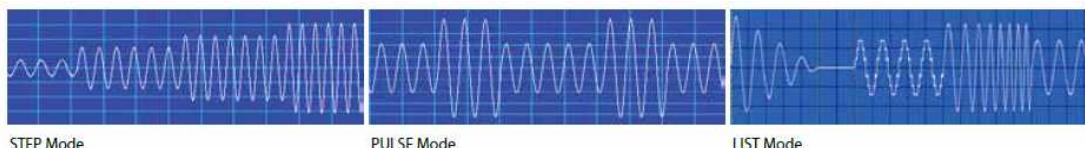


그림 3.36 출력 전압 파형 제어 모드

- STEP 모드: 전압 파형의 크기를 단계적으로 변경 가능

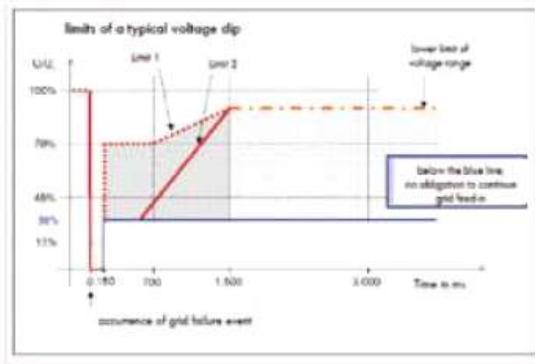
- PULSE 모드: 전압 파형의 크기를 주기적 pulse 형태로 입력 가능
- LIST 모드: 사용자가 원하는 대로 전압 파형을 변경 가능
- 모의 계통의 다양한 상황을 연출하기 위해 필요

◎ 주파수 제어 기능

- 출력 전압의 주파수 제어 가능
- 출력 전압의 주파수 증감률 제어 가능

◎ LVRT 테스트 기능

- LVRT 테스트 기능 내제 (그림 3.37)



Test number	U/UN	LVRT duration (ms)
1	≤ 0.05	≥ 150
2	0.2 - 0.5	≥ 550
3	0.45 - 0.55	≥ 950
4	0.7 - 0.8	≥ 1400

그림 3.37 LVRT 테스트 기능

- 어드밴스드 인버터의 고급 기능 중 LVRT 성능 시험 테스트를 위해 필요

◎ 고조파 제어 기능

- SYNTHESIS 기능 : 사용자가 50/60 Hz의 기본 주파수에서 40차 고조파까지 생성 가능
- INTERHARMONIC 기능 : 사용자가 50/60 Hz의 기본 주파수에서 0.01 ~ 2400 Hz의 주파수 변화를 생성 가능

가. 배전 계통 모의 장치 설계 및 제작

스마트 분산전원 및 통합관리시스템의 배전 계통 내 전압 변동에 따른 성능 시험환경을 위해 배전 계통 모의 장치를 설계/제작 하였다. 실제 배전 계통에 사용하는 22.9 kV ACSR 160mm² 가공 선로의 저항 및 인덕턴스 비율을 사용하여 모의 배전 계통을 설계 하였다. 스마트 분산전원의 배전 계통에 대한 효과 분석을 위해 모의 배전 계통은 전압 380 V, 부하 10 kW를 기준으로 각 선로 구간별로 2%의 전압 강하가 발생하도록 하였다.

* 모의 대상 계통 설정

- 전원: 380[V]
- 부하: 10[kW]
- 변압기 임피던스: 0.015[Ω], 3.61[mH]
- 각 구간의 전압강하가 2%일 때 구간 임피던스: 0.28[Ω], 1.455[mH]

배전 계통 모의 장치 구축을 위한 380 V - 45 A 변전소 및 계통연계선로 모의 장치를 그림 3.38과 같이 구성하였다. 모의 장치는 3상 4선식으로 구성하며, 변압기 임피던스 및 선로 임피던스는 3상 3선식으로 구성하였다. 또한, 계통연계선로 모의 부는 변압기 고압측(1차측) 모선으로부터 상위 분전반 연계단자까지로 계통 연계선로 임피던스를 구현한 등가선로와 상위 분전반 접속 스위치, 연계변전소 보상장치 모의를 위한 단자대로 구성하였다. 표 3.13에 변압기 임피던스 및 선로 임피던스를 나타내었다.

각 구성 모듈 및 단자에 인가된 전압, 전류, 전력을 표시하기 위해 6개의 디지털 미터기를 설치하였으며 통신을 통해 각 구간별 데이터를 계측할 수 있다.

표 3.13 배전 계통 모의 장치 설계 임피던스

	변압기임피던스 (상당)	선로임피던스 (상당)
R(Ω)	0.015	0.28
L(mH)	3.61	1.455
정격 전류 (A)	45.0	45.0

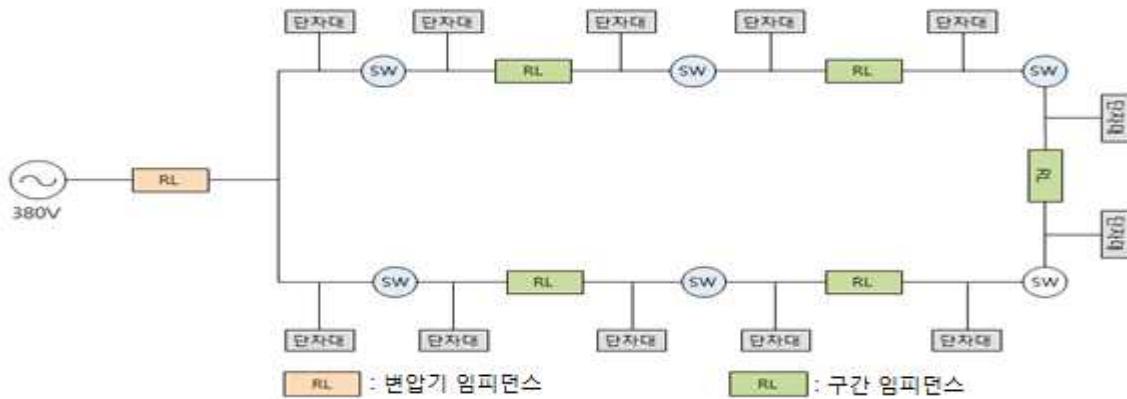


그림 3.38 배전 계통 모의 장치 구성도

그림 3.39와 그림 3.40은 배전 선로 모의 장치의 설계 도면을 보여준다. 시스템 과열을 방지하기 위해 팬 냉각 방식을 사용하였다.

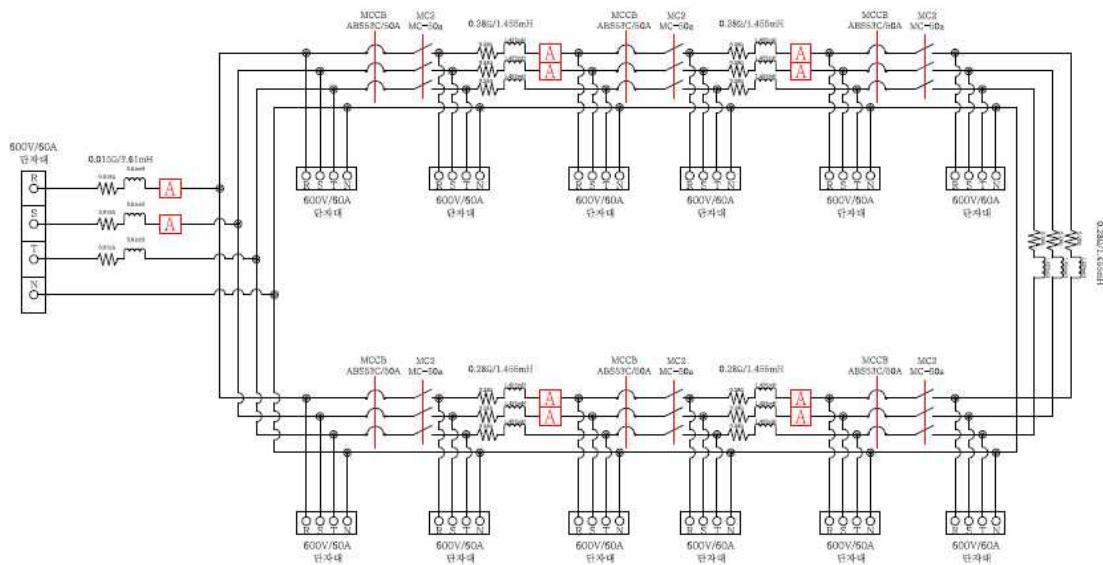


그림 3.39 배전 선로 모의 장치 설계도면 (전기도면)

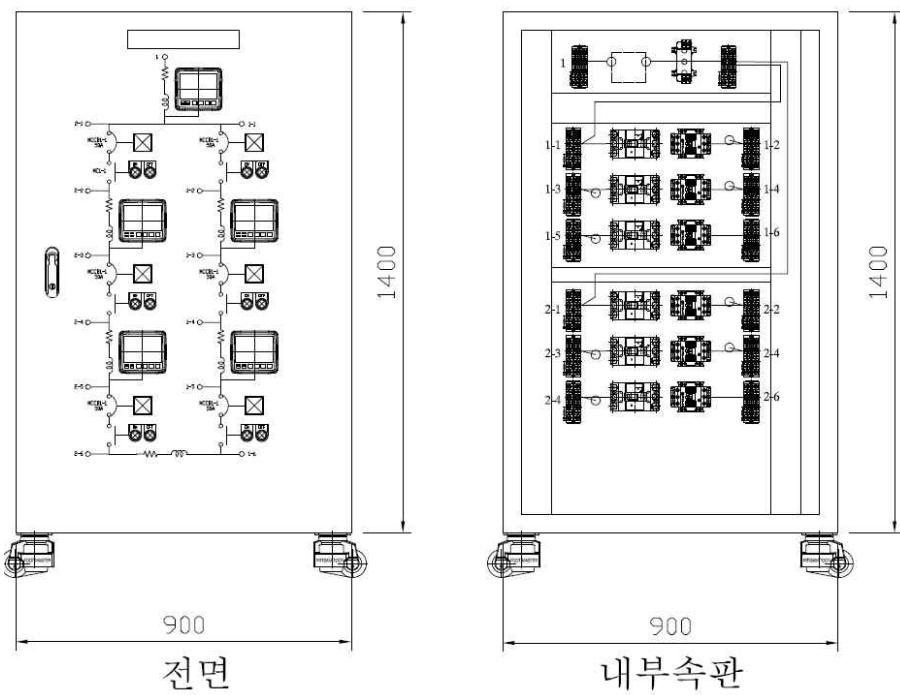


그림 3.40 배전 선로 모의 장치 설계도면 (외형도)

나. 부하 모의 장치 설계 및 제작

부하 모의 장치는 배전 선로 모의 장치에 연계되어 계통 상황(전압 변동)을 모의하기 위해 사용한다. 부하 모의를 위해 양방향 Full bridge back-to-back converter의 형태로 설계하였으며, $10 \text{ kW} \pm 10 \text{ kVar}$ 의 출력이 가능하도록 하였다. 시스템의 주요 기능은 아래와 같다.

▣ 유무효전력 제어 (출력부)

- 부하 모의를 위한 유무효 전력 제어
- 주어진 부하 데이터를 이용해 부하 모의가 가능해야 함

▣ DC-link 전압 제어 (입력부)

- DC link부 커패시터의 일정 전압제어

▣ 운전 상태 표시 (표시부)

- 운전 상태 표시등, 고장 표시등
- 현재 부하 표시(\pm 유효전력, \pm 무효전력, 역률)
- 부하 설정치 표시 (유효전력 설정치, 무효전력 설정치, 역률 설정치)

▣ 감시 제어 기능

- 현재 운전 상태 모니터링 기능 (운전/정지, 고장/정상, 현재 부하 표시, 부하 설정치 등)
- On/Off 제어
- 부하 제어 (유효전력 설정, 무효전력 설정, 역률 설정)

그림 3.41은 부하 모의 장치의 구성을 보여주며, 표 3.2.10은 설계 사양이다.

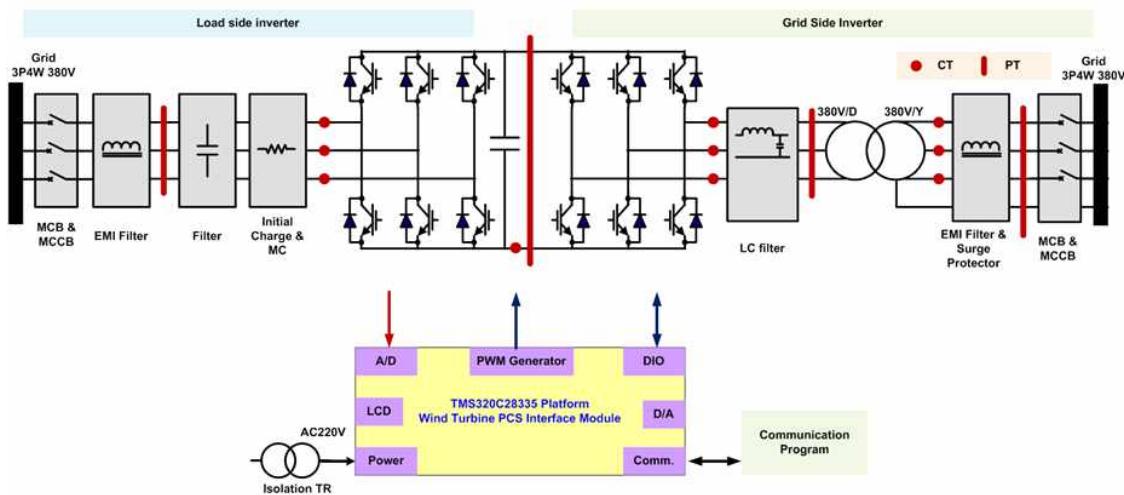


그림 3.41 부하 모의 장치 구성

그림 3.41에서 DC 링크는 평판 형태로 구성하여 가능하나 인덕턴스가 작도록 설계, 제작하였다. 또한, DC 전압의 리플이 정격에서 5% 이하가 되도록 커패시턴스를 설계하였다.

출력 전압 및 전류의 고조파 제거를 위해 LC 필터를 사용하였으며, 인덕터는 과도한 전압강하 방지를 위해 20% 이하의 임피던스를 갖도록 하였다. LC 필터에 사용되는 커패시터는 스위칭 주파수와 인덕턴스를 고려하여 1.5kHz 이하의 공진 주파수가 되도록 구성하였다.

초기 충전 시 IGBT가 소손 되는 것을 막기 위해 초기 충전 저항을 입력 측 스위치에 병렬로 설치하여 초기 충전 전류를 제한하도록 제작 하였다. 입출력 변압기는 입력전원과 시스템의 절연을 위하여 복권 변압기를 사용하였다.

표 3.14 부하모의 장치 설계 사양

항목		사양
일반사항	출력용량	10kW±10kVar
	과부하 정격	125% - 10분
	냉각방식	강제 풍냉식
	사용정격	100% 연속사용
	스위칭방식	PWM
	사용소자	IGBT
	시스템효율	90% 이상
	동작온도	0 ~ 40°C
	소음	60dB 이하
입력	연계방식	3상 4선 380V 일반 저압연계
	연계변압기 절연계급	H종
	형태	3상 PWM 계통연계형 인버터
	전압	380V ± 10%
	주파수	60Hz ± 5%
	전류고조파	5% 이하, THD 3% 이하
출력	연계방식	3상 4선 380V 일반 저압연계
	연계변압기 절연계급	H종
	형태	3상 PWM 계통연계형 인버터
	전압	380V ± 10%
	주파수	60Hz ± 5%
	전류고조파	5% 이하, THD 3% 이하
절연특성	절연내압	AC 2000V 60Hz로 1분간 인가
	절연저항	DC 500V MEGGER로 측정시 5MΩ이상
온도특성	변압기 및 리액터	140°C
	반도체 소자	80°C 이하

제 3 절 스마트 분산전원 시뮬레이션 연구

스마트 분산전원 통합관리 시스템의 기능 및 성능을 시험하기에 앞서, 실제 시험 환경에서 수행할 다양한 시나리오들에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션의 목적은 실제 시험환경에서 발생할 수 있는 위험요소 제거, 시험환경의 효율적 구성, 그리고 시험결과의 정확성 확인 등에 있다.

본 연구에서 시뮬레이션의 적용 범위는 두 가지로 분류된다. 첫째는 시험 대상 모의배전계통과 분산전원들의 동특성을 고려한 시뮬레이션이다. 해당 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 진행하였다. PSCAD/EMTDC는 전력시스템의 과도상태 해석과 분산전원 모델링 등 전력시스템 및 전력전자 분야에서 널리 활용되고 있는 공학 도구다. 본 시뮬레이션 연구에서 얻고자하는 결과는 정상상태 결과이지만 과

도상태를 확인할 수 있기 때문에 실제 시험에서 일어날 수 있는 문제를 미리 파악 할 수 있다.

본 연구에서 수행한 두 번째 시뮬레이션의 적용 범위는 정상상태 분석이다. 정상 상태 분석 시뮬레이션에는 MATLAB을 이용하였다. MATLAB은 뛰어난 성능의 수치 해석 기능으로 인해 광범위한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다.

1. PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 연구

가. 이론검증을 위한 시뮬레이션

(1) 대상 모의계통 모델

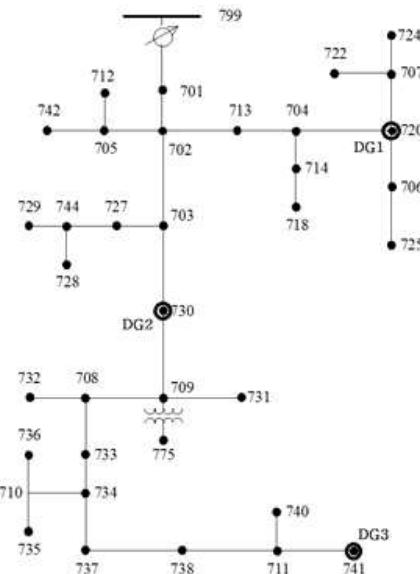


그림 3.42 IEEE 37 node test feeder

본 연구에서는 스마트 분산전원 통합관리 시스템의 기능 및 성능을 시험하기 위해 두 가지 배전계통을 대상으로 시뮬레이션을 진행하였다. 그 중 첫 번째는 본 연구에서 제안하는 방법의 이론적 검증을 위한 배전계통으로, IEEE test feeder를 사용했다. IEEE test feeder는 전력계통 분야의 연구에서 제안하는 이론을 검증하기 위해 널리 사용되고 있다.

본 연구에서도 첫 번째 대상 모의계통으로 스마트 분산전원 통합관리 시스템의 기능 및 성능을 이론적으로 검증하기 위해 IEEE 37 node test feeder[13]를 사용했다. 본 연구의 목적을 달성하는 데에 불필요한 내용을 제거하기 위해 IEEE 37 node test feeder를 약간 수정하여 사용했다. 수정한 내용은 3상 선간 상호 인더턴스와 각 node의 부하 불평형성⁵⁾을 제거한 것이다. 케이블의 상호 인더턴스를 무시하기

5) 실제 배전계통에서는 각 상의 부하량이 모두 달라 불평형성이 있다. 하지만 본 연구에서는 3상 불평형 부하를 고려하지 않 으므로 문제의 간소화를 위해 3상의 부하가 모두 고르게 되도록 수정하였다.

위해 정상 임피던스만을 고려하였다.

대상 모의계통은 그림 3.42와 같다[14]. 대상 모의계통에는 3개의 분산전원(DG, Distributed Generation)이 각각 720, 730, 741번 node에 연계되어 있다고 가정했다. 799, 701번 node 사이에 연결된 OLTC(On-Load Tap Changer)의 파라미터와 케이블 임피던스는 각각 표 3.15와 표 3.16와 같다.

표 3.15 OLTC 파라미터

용량	1차측 전압	2차측 전압	임피던스		OLTC 고려		Bandwidth	
			R	X	보상 임피던스			
					R	X		
2.8 MVA	230 kV	4.8 kV	2 %	8 %	1.5 %	3 %	1.67 %	

표 3.16 케이블 임피던스

Node 번호		임피던스 (pu)		Node 번호		임피던스 (pu)	
From	To	저항	인덕턴스	From	To	저항	인덕턴스
799	701	0.004473	0.002951	744	728	0.003463	0.001285
701	702	0.003770	0.002364	744	729	0.004850	0.001800
702	705	0.006928	0.002570	703	730	0.006416	0.003336
705	712	0.004156	0.001542	730	709	0.002138	0.001112
705	742	0.005540	0.002057	709	731	0.006416	0.003336
702	713	0.003849	0.002002	709	708	0.003421	0.001780
713	704	0.005557	0.002892	708	732	0.005540	0.002056
704	714	0.001385	0.000514	708	733	0.003421	0.001780
714	718	0.001385	0.000514	733	734	0.005987	0.003115
704	720	0.008551	0.004449	734	710	0.009007	0.003343
720	707	0.015931	0.005913	710	735	0.003463	0.001285
707	722	0.002078	0.000771	710	736	0.022165	0.008226
707	724	0.013158	0.004885	734	737	0.006842	0.003559
720	706	0.006416	0.003336	737	738	0.004276	0.002225
706	725	0.004850	0.001800	738	711	0.004276	0.002225
702	703	0.005184	0.003251	711	740	0.003463	0.001285
703	727	0.004156	0.001542	711	741	0.004276	0.002225
727	744	0.002993	0.001557				

그림 3.42, 표 3.13, 표 3.14의 정보를 토대로 PSCAD/EMTDC 상에서 구현한 IEEE 37 node test feeder는 그림 3.43과 같다.

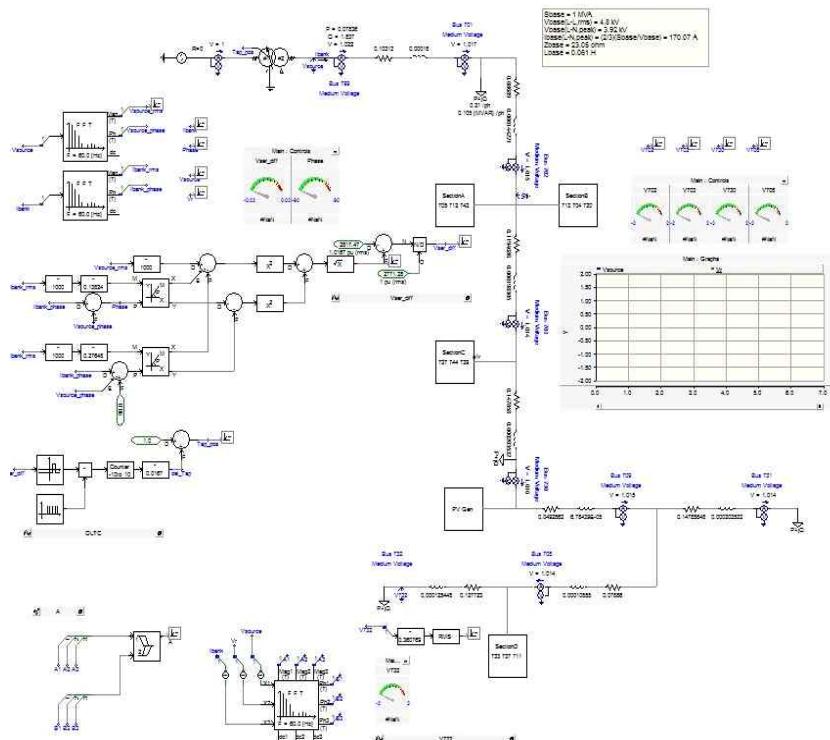


그림 3.43 PSCAD/EMTDC 상에서 구현한 IEEE 37 node test feeder

(2) 분산전원 모델

태양광 모듈, 풍력발전기 등 대부분의 분산전원들은 인버터를 통해 계통에 연계된다. 인버터는 스위칭 소자로 구성되어 있기 때문에 스위칭 소자를 모두 고려하여 분산전원을 설계할 경우 시뮬레이션의 속도가 현저하게 느려지고 고조파를 제거하기 위한 필터 등의 설계가 추가로 필요하다. 본 연구에서는 고조파 등 전력 및 전압 품질 문제를 고려하지 않기 때문에 편의상 그림 3.43과 같이 이상 전류원을 사용하여 분산전원을 설계했다.

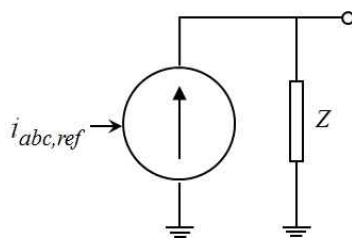


그림 3.44 이상 전류원을 사용한 분산전원 모델

그림 3.44에서 $i_{abc,ref}$ 는 분산전원의 3상 전류 reference, Z 는 계통의 임피던스를 나타낸다. 분산전원의 3상 전류는 그림 3.44와 같이 분산전원의 유효전력 reference PDG,ref와 무효전력 reference QDG,ref에 의해 정해진다. 그림 3.45에서 PDG는 분산전원의 유효전력, QDG는 분산전원의 무효전력, PI는 PI (Proportional-

Integral) 제어기, $i_{d,ref}$ 와 $i_{q,ref}$ 는 각각 d-축과 q-축 전류 reference 값, θ 는 dq0-abc 변환[15]의 기준 전압 각도다.

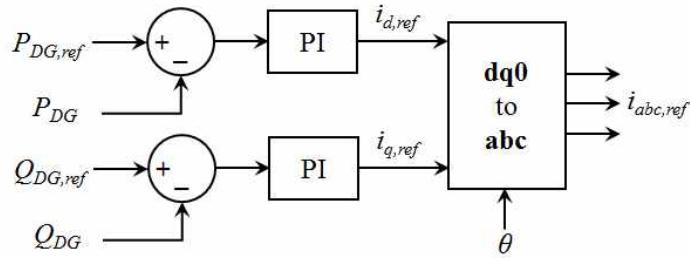


그림 3.45 분산전원 제어 블록

분산전원의 유효전력 reference 값 $P_{DG,ref}$ 는 시뮬레이션 시나리오에 따라 임의로 설정하였다.

(3) 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션은 그림 3.42의 배전계통을 대상으로 스마트 분산전원 기능의 효율성에 대해 알아본다. 스마트 분산전원의 기능 중에서도 계통의 전압 안정도를 향상시킬 수 있는 Volt/VAR 기능의 효과에 대해 검증해본다. 그림 3.42에서 세 분산전원 DG1, DG2, DG3의 용량은 각각 1 MW, 1 MW, 0.5 MW다. 스마트 분산전원의 효율성을 검증하기 위해 부하, 분산전원 출력, 스마트 분산전원 기능의 유무를 조절함으로써 다양한 시나리오 연구를 수행했다. 시나리오 내용은 표 3.18과 같다.

표 3.18 사례연구 상세내용

사례 번호	부하 조건	분산전원 출력 (MW)	스마트 분산전원 기능
1	첨두부하/경부하/무부하 (2.5/0.5/0.0 MW, 1.2/0.25/0.0 MVAR)	-	-
2	첨두부하	DG1/DG2/DG3 = 1.5/1.5/0.8	있음/없음
3	경부하	DG1/DG2/DG3 = 1.2/1.2/0.6	있음/없음
4	무부하	DG1/DG2/DG3 = 1.0/1.0/0.5 DG1/DG2/DG3 = 0.9/0.9/0.4	있음/없음
5	첨두부하	DG1+DG2+DG3 = 0.0/0.5/1.0/1.5/2.0/2.5	있음/없음
6	경부하	DG1+DG2+DG3 = 0.0/0.5/1.0/1.5/2.0/2.5	있음/없음

총 6가지 사례에 대한 연구를 진행하였다. 사례1은 부하조건이 바뀜에 따라 배전

계통에 투입될 수 있는 최대 분산전원의 용량을 알아본다. 사례1에서 알아본 각각의 부하조건(첨두부하/경부하/무부하)에 대한 최대 분산전원 용량을 투입하여 스마트 분산전원 기능의 효과를 사례 2, 3, 4에서 알아본다. 사례 5와 6에서는 각각 부하조건이 첨두부하일 때와 경부하일 때, 세 분산전원들의 출력이 변함에 따라 스마트 분산전원 기능의 효과가 어떠한지 알아본다.

(4) 시뮬레이션 연구 결과

(가) 사례1 – 분산전원 설치 한계 용량 검토

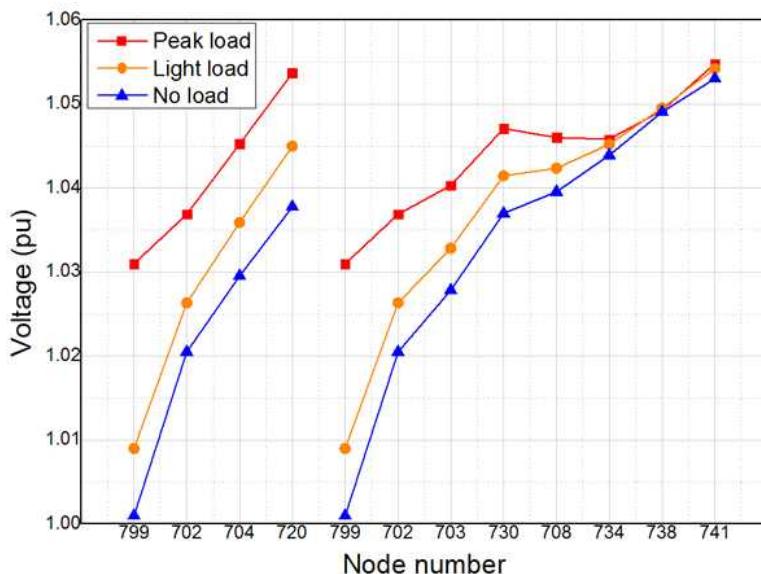


그림 3.46 사례1 시뮬레이션 결과 – 분산전원 설치 한계 용량 검토

그림 3.46은 IEEE 37 node test feeder(그림 3.42)에서의 분산전원 설치 한계 용량을 검토하기 위해 각각의 부하조건(첨두부하/경부하/무부하)에서의 node 별 전압을 나타낸 것이다. IEEE 전압 유지 규정에 따르면 모든 node의 전압은 0.95~1.05 pu를 유지해야 한다. 이 규정에 따라 연구 대상계통에 투입할 수 있는 분산전원의 용량은 첨두부하, 경부하, 무부하의 경우에 대해 각각 3.8 MW, 3 MW, 2.2 MW로 조사되었다. 이를 바탕으로 사례 2, 3, 4 연구를 진행하였다.

(나) 사례2 – 첨두부하 시 최대 분산전원 용량 적용

본 사례에서는 사례1의 연구결과를 바탕으로 첨두부하일 때 수용할 수 있는 분산전원의 최대 용량을 적용하여 스마트 인버터 기능 중 하나인 Volt/VAR 기능의 효과를 검증해본다. 부하는 총 2.5 MW, 1.2 MVAR고 DG1, DG2, DG3의 용량은 각각 1.5 MW, 1.5 MW, 0.8 MW로 총 3.8 MW다. 이와 같은 환경에서 분산전원에 스마트

인버터 기능(Volt/VAR 기능)의 유무를 비교하였고 그 결과는 그림 3.47과 같다.

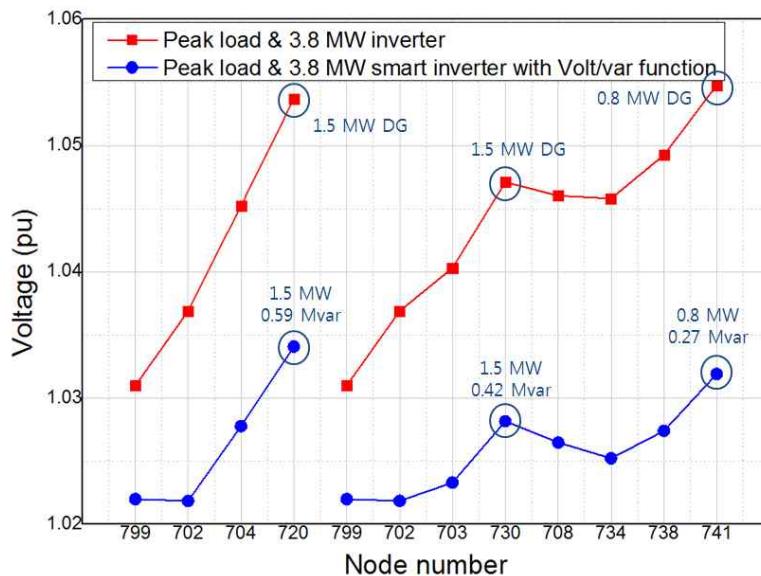


그림 3.47 사례2 시뮬레이션 결과 - 첨두부하 시 스마트 인버터 기능 효과

그림의 빨간선과 파란선은 각각 스마트 인버터 기능이 없는 경우와 있는 경우에 대해 node 별 전압을 나타내고 있다. 스마트 인버터 기능이 없는 경우 전압제약조건을 위배하는 경우(720, 741번 node의 전압이 1.05 pu를 초과)가 발생한다. 하지만 Volt/VAR 기능을 이용하면 모든 node의 전압이 허용범위 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

(다) 사례3 – 경부하 시 최대 분산전원 용량 적용

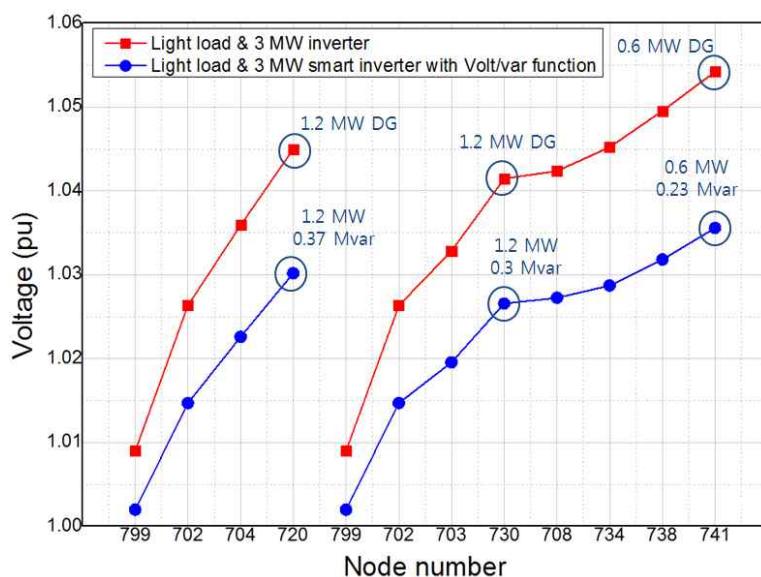


그림 3.48 사례3 시뮬레이션 결과 – 경부하 시 스마트 인버터 기능 효과

본 사례에서는 사례1의 연구결과를 바탕으로 경부하일 때 수용할 수 있는 분산 전원의 최대 용량을 적용하여 스마트 인버터 기능 중 하나인 Volt/VAR 기능의 효과를 검증해본다. 부하는 총 0.5 MW, 0.25 MVAR고 DG1, DG2, DG3의 용량은 각각 1.2 MW, 1.2 MW, 0.6 MW로 총 3.0 MW다. 이와 같은 환경에서 분산전원에 스마트 인버터 기능(Volt/VAR 기능)의 유무를 비교하였고 그 결과는 그림 3.48과 같다.

그림의 빨간선과 파란선은 각각 스마트 인버터 기능이 없는 경우와 있는 경우에 대해 node 별 전압을 나타내고 있다. 첨두부하의 사례와 마찬가지로 경부하 시에도 스마트 인버터 기능이 없으면 전압제약조건을 위배하는 경우(741번 node의 전압이 1.05 pu를 초과)가 발생한다. 마찬가지로 Volt/VAR 기능을 이용하면 모든 node의 전압이 허용범위 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

(라) 사례4 – 무부하 시 최대 분산전원 용량 적용

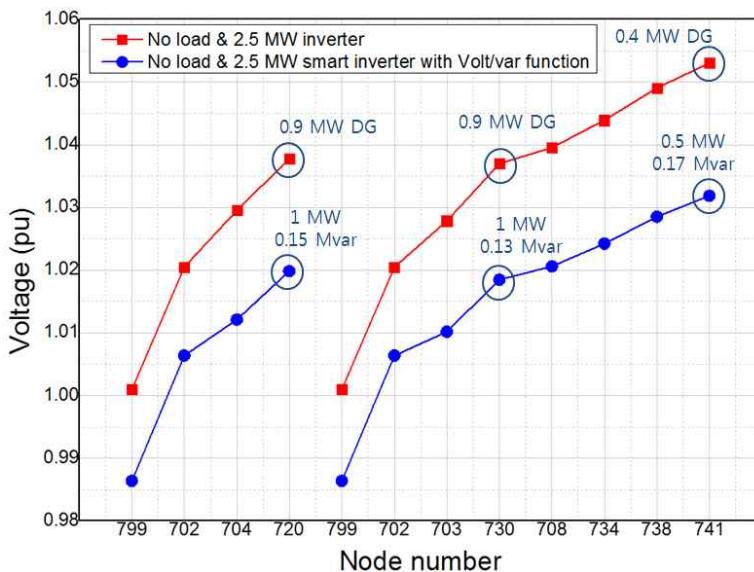


그림 3.49 사례4 시뮬레이션 결과 – 무부하 시 스마트 인버터 기능 효과

본 사례에서는 사례1의 연구결과를 바탕으로 무부하일 때 수용할 수 있는 분산 전원의 최대 용량을 적용하여 스마트 인버터 기능 중 하나인 Volt/VAR 기능의 효과를 검증해본다. DG1, DG2, DG3의 용량은 각각 0.9 MW, 0.9 MW, 0.4 MW로 총 2.2 MW다. 이와 같은 환경에서 분산전원에 스마트 인버터 기능(Volt/VAR 기능)의 유무를 비교하였고 그 결과는 그림 3.49와 같다.

그림의 빨간선과 파란선은 각각 스마트 인버터 기능이 없는 경우와 있는 경우에 대해 node 별 전압을 나타내고 있다. 사례 2, 3과 마찬가지로 무부하 시에도 스마트 인버터 기능이 없으면 전압제약조건을 위배하는 경우(741번 node의 전압이 1.05 pu

를 초과)가 발생한다. 마찬가지로 Volt/VAR 기능을 이용하면 모든 node의 전압이 허용범위 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

(마) 사례5 - 첨두부하 시 분산전원 출력 변화에 따른 스마트 인버터 기능 효과

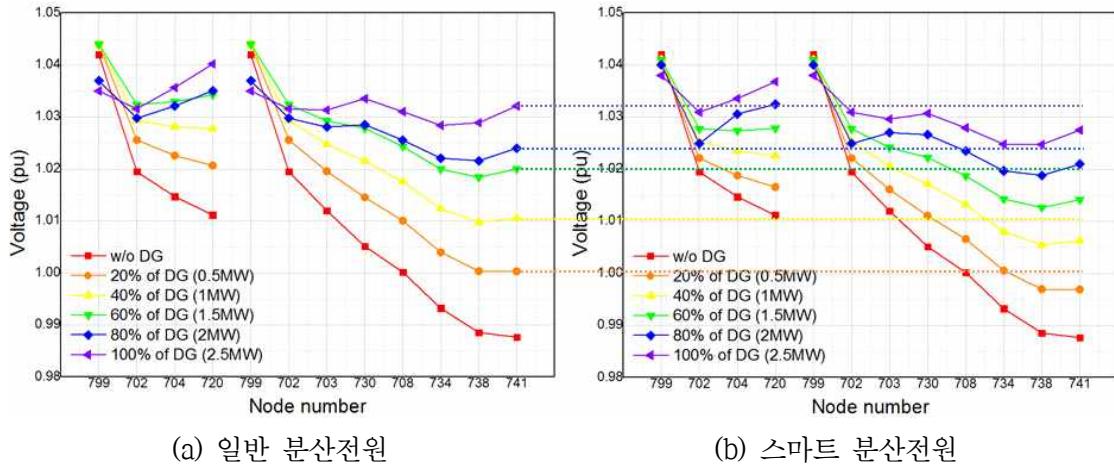


그림 3.50 사례5 시뮬레이션 결과 - 첨두부하 시 분산전원 출력 변화에 따른 node 별 전압

본 사례에서는 첨두부하(2.5 MW, 1.2 MVAR) 시 분산전원의 출력 변화에 따른 node 별 전압을, 스마트 인버터 기능이 있을 때와 없을 때로 구분하여 비교해본다. 분산전원 DG1, DG2, DG3의 용량은 각각 1 MW, 1 MW, 0.5 MW다. 사례연구에서는 세 분산전원의 출력 총합을 0%에서 20%단위로 100%까지 변화시켜 각 node 별 전압의 변화를 알아본다.

그림 3.50 (a)에서는 스마트 인버터 기능이 없는 일반 분산전원을 적용한 경우, (b)에서는 스마트 분산전원을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 사례2~4와 달리 일반 분산전원을 적용한 경우에도 모든 node의 전압이 허용범위를 벗어나는 경우는 없지만, 전압 프로파일이 더욱 평坦해진다. 그림 3.50의 (a)와 (b)를 비교해보면 스마트 인버터 기능이 적용된 후 전압이 1 pu를 초과한 node에서는 전압이 조금 더 하강하고 1 pu에 못 미치는 node는 전압이 조금 더 상승하는 효과를 확인할 수 있다.

(바) 사례6 - 경부하 시 분산전원 출력 변화에 따른 스마트 인버터 기능 효과

본 사례에서는 경부하(0.5 MW, 0.25 MVAR) 시 분산전원의 출력 변화에 따른 node 별 전압을, 스마트 인버터 기능이 있을 때와 없을 때로 구분하여 비교해본다. 그 외의 시뮬레이션 환경은 사례5와 모두 동일하다.

그림 3.51 (a)에서는 스마트 인버터 기능이 없는 일반 분산전원을 적용한 경우, (b)에서는 스마트 분산전원을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있

다. 사례5와 마찬가지로 일반 분산전원을 적용한 경우에도 모든 node의 전압이 허용범위를 벗어나는 경우는 없지만, 전압 프로파일이 더욱 평坦해진다. 그럼 3.51 (a) 와 (b)를 비교해보면 스마트 인버터 기능이 적용된 후 전압이 1 pu를 초과한 node에서는 전압이 조금 더 하강한다. 경부하 사례이기 때문에 전압이 1 pu에 못 미치는 node는 없다.

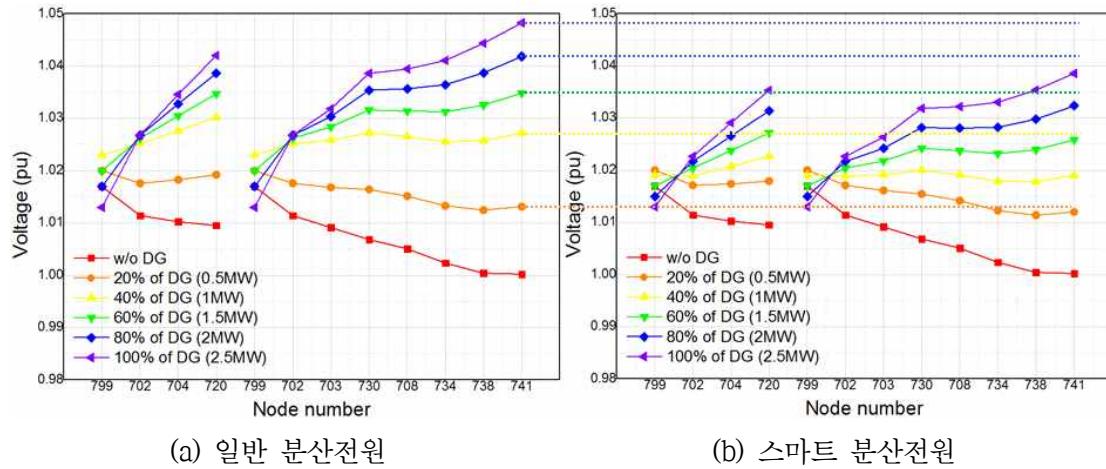


그림 3.51 사례6 시뮬레이션 결과 - 경부하 시 분산전원 출력 변화에 따른 node 별 전압

나. 시험 대비를 위한 시뮬레이션

(1) 대상 모의계통 모델

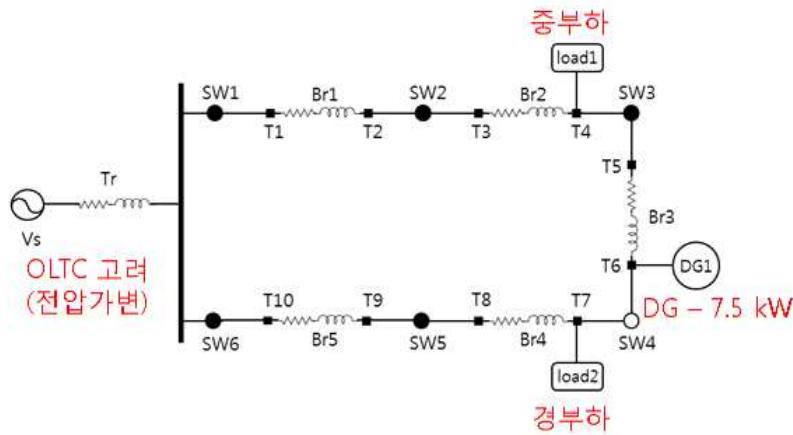


그림 3.52 모의배전계통

본 연구에서 대상계통으로 선정한 두 개의 배전계통 중 앞서 연구한 그림 3.42의 계통은 스마트 분산전원의 성능을 이론적으로 검증하기 위해 널리 사용되는 시뮬레이션 계통에 적용하였다. 본 절에서 소개하는 두 번째 시뮬레이션 대상 배전계통은 본 연구의 실제 시험을 위해 제작된 모의배전계통으로 그림 3.52과 같다.

표 3.19 모의배전계통 파라미터

선로	저抵抗 (Ω)	인덕턴스 (H)
Tr (변압기)	0.0436	0.004892
Brl5	0.295	0.00163638

그림 3.52과 표 3.19를 토대로 PSCAD/EMTDC 상에서 설계한 모의배전계통은 그림 3.53과 같다.

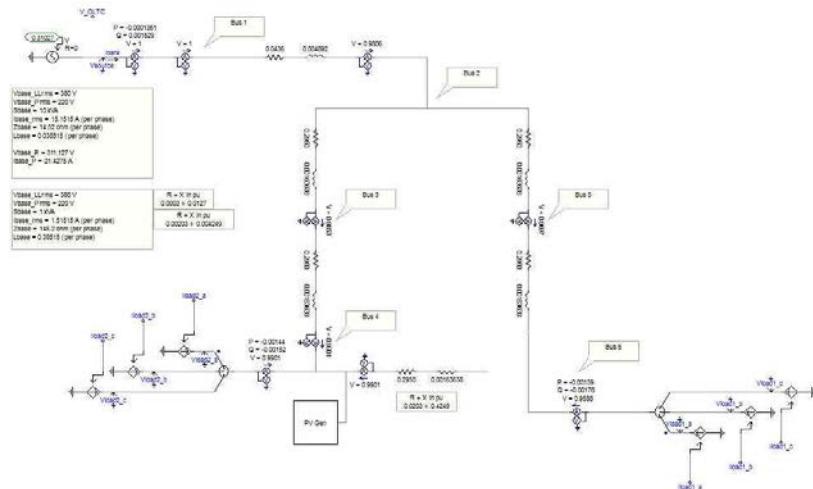


그림 3.53 PSCAD/EMTDC 상에서 구현한 모의배전계통

(2) 분산전원 및 부하 모델

본 시뮬레이션에서의 분산전원 모델은 이전 절에서 알아본 모델과 같다(그림 3.44, 그림 3.45 참조). 실제 시험에서 부하를 모의할 장치도 인버터로 구성되어 있기 때문에 분산전원과 똑같이 설계하였고 유효전력 reference 값만 반대로 주었다.

(3) 시뮬레이션 환경

표 3.20 시험 대비 시뮬레이션 입력 조건

STEP	1차측 전압	개폐기 상태						부하량			
		SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	load1		load2	
								P[W]	Q[Var]	P[W]	Q[Var]
1	226.8	C	C	C	O	C	C	4140	1763	950	312
2	226.8	C	C	O	C	C	C	4140	1763	950	312
3	230.0	C	C	O	C	C	C	4140	1763	950	312

표 3.21 Volt/VAR 파라미터

STEP	분산전원 DG1 Curve[%]							
	V1	Q1	V2	Q2	V3	Q3	V4	Q4
1	97	50	99	0	101	0	103	0
2	97	50	99	0	101	0	103	0
3	97	50	99	0	101	0	103	-50

그림 3.52와 같은 모의배전계통에서 표 3.20와 표 3.21의 내용에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 각 STEP 별 시뮬레이션 내용은 다음과 같다.

- STEP 1 : SW4가 개방되어 있어 DG1이 중부하와 같은 feeder에 있고 경부하는 다른 feeder의 말단에 연결되어 있다.
- STEP 2 : SW3이 개방되고 SW4가 폐쇄되어 DG1은 경부하와 같은 feeder에 연결되고 중부하는 흘로 다른 feeder에 연결되어 있다.
- STEP 3 : DG1 Volt/VAR 기능의 파라미터를 변경한다.

(4) 시뮬레이션 연구 결과

표 3.22 시험 대비 시뮬레이션 결과

STEP	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6
			중부하	DG1	경부하	
1	220.05	219.55	219.12	222.34 218.62	219.34	220.05
2	219.87	216.40	212.98 224.66	224.66	222.18	219.87
3	220.09	216.62	213.19 222.97	222.97	221.43	220.09

표 3.22는 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. STEP1의 SW4와 STEP2, 3의 SW3은 개방되어 있는 상태여서 양단의 전압을 나타내기 위해 전압이 두 개로 표시된다.

STEP1에서는 중부하와 DG1이 같은 feeder에 연결되어 있고 경부하는 다른 feeder에 흘로 연결되어 있다. STEP2에서는 feeder가 재구성되어 DG1이 경부하와 연결되면서 SW4, SW5에 전압이 상승한다. STEP3에서 DG1의 Volt/VAR 파라미터를 표 3.22와 같이 변경해주었다. 변경한 파라미터는 과전압에서 DG1이 무효전력을 흡수하여 전압을 낮출 수 있도록 해준다. 따라서 STEP2에 비해 STEP3에서 DG1과 경부하의 전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

2. MATLAB을 이용한 시뮬레이션 연구

가. 이론검증을 위한 시뮬레이션

MATLAB을 이용한 시뮬레이션 연구는 스마트 분산전원 통합관리 시스템의 성능을 이론적으로 검증하기 위해 진행되었다.

(1) 대상 모의계통 모델

본 시뮬레이션 연구의 대상 모의계통 모델은 3장 3절 1. 가. (1)의 내용(그림 3.42, 표 3.16과 같다.

(2) 분산전원 모델

본 시뮬레이션 연구는 조류계산을 이용한 정상상태 해석 연구다. 본 연구에서 분산전원은 유효전력 및 무효전력을 제어할 수 있는 요소기기이기 때문에 조류계산상에서 분산전원이 연계되어 있는 모선을 PQ(유·무효전력)모선으로 모델링하였다.

(3) 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션은 스마트 분산전원의 Volt/VAR 기능을 이용하여 계통의 선로 손실을 줄이는 효과를 검증하기 위해 진행되었다. 연구의 사례별 내용과 부하량은 각각 표 3.23, 표 3.24와 같다.

표 3.23 연구사례 내용

사례번호	분산전원 출력 (%)	부하량
1	100	중부하
2	0	중부하
3	100	경부하
4	0	경부하

표 3.24 모선별 부하

모선번호	중부하		경부하	
	유효전력(MW)	무효전력(MVAR)	유효전력(MW)	무효전력(MVAR)
701	0.6300	0.3150	0.1260	0.0630
712	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
713	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
714	0.0378	0.0180	0.0075	0.0036
718	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
720	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
722	0.1608	0.0800	0.0322	0.0160
724	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
725	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
727	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
728	0.1260	0.0630	0.0252	0.0126
729	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
730	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
731	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
732	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
733	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
734	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
735	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
736	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
737	0.1400	0.0700	0.0280	0.0140
738	0.1260	0.0620	0.0252	0.0124
740	0.0850	0.0400	0.0170	0.0080
741	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
742	0.0930	0.0441	0.0186	0.0088
744	0.0420	0.0210	0.0084	0.0042
합계	2.457	1.201	0.4913	0.2402

연구 사례들은 다양한 조건에서 계통의 선로 손실을 최소화하기 위해 조사되었다. 선로 손실을 최소화하기 위해 세 분산전원들의 Volt/VAR 파라미터들을 제어한다. 사례1은 계통이 중부하이고 분산전원의 출력이 최대일 때, 사례2는 중부하 조건에 분산전원 출력이 없을 때이고 사례3, 4는 각각에 대해 경부하 조건인 경우이다. 각 사례별로 두 가지 방법을 적용하여 선로 손실의 감소량을 비교해본다.

첫 번째 방법은 기존에 통상적으로 사용해왔던 Volt/VAR 제어 방법으로, 계통의 전압이 높을 때는 분산전원이 무효전력을 흡수하고 계통의 전압이 낮을 때는 분산전원이 무효전력을 공급하는 방법이다. 무효전력 가용 공급량을 0%, 50%, 100%로 변경해가며 변화를 알아본다.

두 번째 방법은 최적화 알고리즘을 적용하여 계통의 손실 최소화에 목적을 두고 Volt/VAR 제어를 하는 방법이다. 최적화 알고리즘은 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 선택하였다. PSO 알고리즘을 포함하여 손실을 최소화하기 위한 전체 알고리즘 순서도는 그림 3.54와 같다.

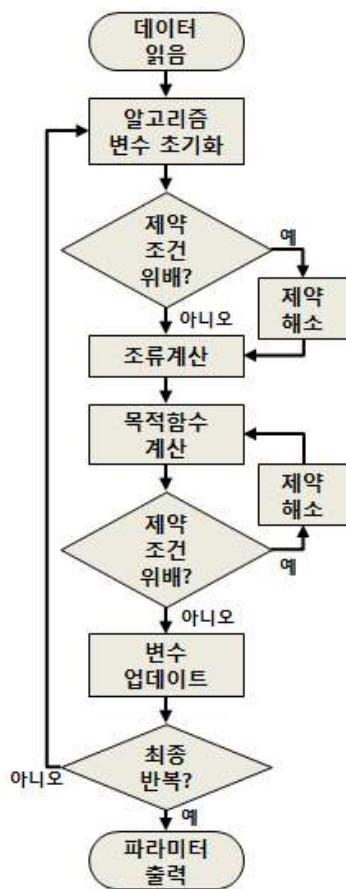


그림 3.54 알고리즘 순서도

그림의 알고리즘 순서도에서 조류계산은 Newton-Raphson 방법을 사용하였다. 제약조건은 모든 모선의 전압이 0.95~1.05 pu 이내로 유지되어야 한다는 내용만을 포함하고 있다.

(4) 시뮬레이션 연구 결과

(가) 사례1 - 중부하 시 분산전원의 출력이 최대인 경우

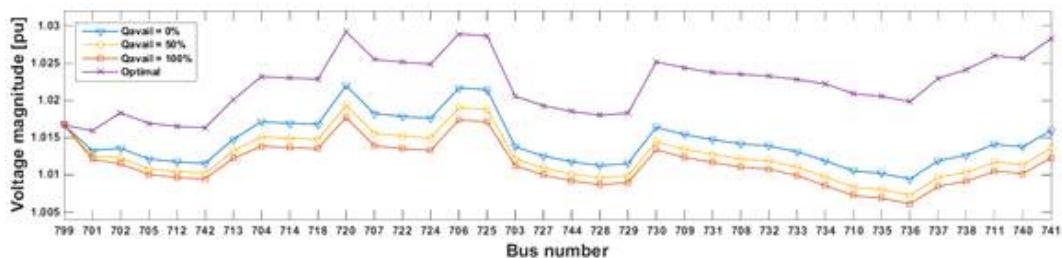


그림 3.55 사례1 시뮬레이션 결과 - 중부하 시 분산전원의 출력이 최대인 경우 모선별 전압[14]

그림 3.55는 사례1의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림의 범례에서 ‘Optimal’은 최적 알고리즘을 적용한 경우를 나타내고, ‘Qavail’은 가용 무효전력량을 나타낸다. 가용 무효전력량이 증가할수록 계통의 모선 전압이 1 pu에 가까워지는 것을 알 수 있다. 반면 최적화 알고리즘을 적용하였을 때는 전압이 상승한다. 이에 대한 원인은 모든 사례연구에 대한 결과 확인 후 논의하도록 한다.

(나) 사례2 – 중부하 시 분산전원의 출력이 없는 경우

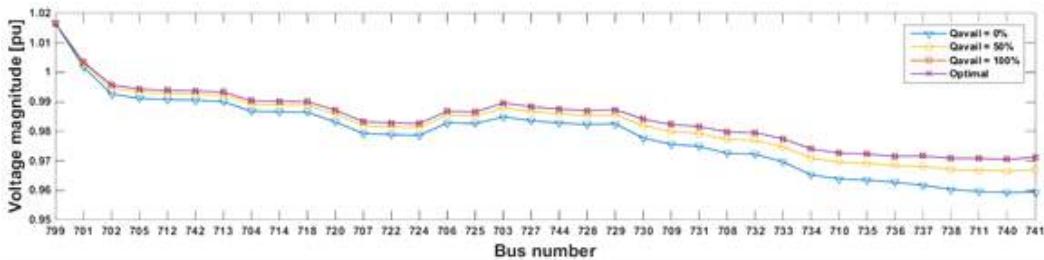


그림 3.56 사례2 시뮬레이션 결과 - 중부하 시 분산전원의 출력이 0인 경우 모선별 전압[14]

그림 3.56은 사례2의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 사례1과 마찬가지로 가용 무효전력량이 증가할수록 계통의 모선 전압이 1 pu에 가까워지는 것을 알 수 있다. 최적화 알고리즘을 적용하였을 때는 전압이 상승하여 결과적으로 모선 전압도 1 pu에 가까워진다.

(다) 사례3 – 경부하 시 분산전원의 출력이 최대인 경우

그림 3.57은 사례3의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 마찬가지로 가용 무효전력량이 증가할수록 계통의 모선 전압이 1 pu에 가까워지는 것을 알 수 있다. 하지만 가용 무효전력량이 0%인 경우에는 전압 제약조건인 1.05 pu를 초과하는 모선이 발생한다. 최적화 알고리즘을 적용하였을 때는 전압이 상승하지만 전압 제약조건을 위배하지는 않는다.

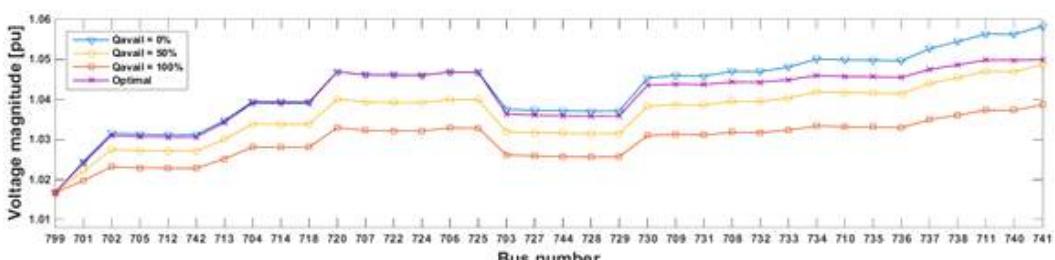


그림 3.57 사례3 시뮬레이션 결과 - 경부하 시 분산전원의 출력이 최대인 경우 모선별 전압[14]

(라) 사례4 - 경부하 시 분산전원의 출력이 없는 경우

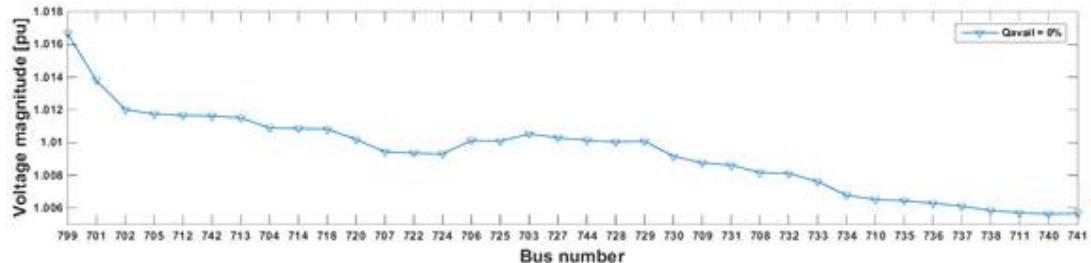


그림 3.58 사례4 시뮬레이션 결과 - 경부하 시 분산전원의 출력이 0인 경우 모선별 전압[14]

그림 3.58은 사례4의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 경부하 시 분산전원의 출력이 0인 경우에는 전압 제약조건이 발생하지 않는다. 또한, 분산전원이 연계되어 있는 모선(720, 730, 741번)에서 전압이 dead band⁶⁾(0.99~1.01 pu) 이내의 범위에 있기 때문에 Volt/VAR 제어도 동작하지 않는다.

(마) 시뮬레이션 결과 논의

표 3.25 시뮬레이션 결과 정리[14]

방법	선로 손실 (kW)			
	사례1	사례2	사례3	사례4
Qavail = 0%	29.6	82.3	69.5	3.1
Qavail = 50%	37.2	71.9	84.0	-
Qavail = 100%	42.5	69.6	117.7	-
Optimal	16.2	69.6	74.3	-

표 3.25는 본 시뮬레이션 연구에서 진행한 사례들에 대해 적용한 방법별로 선로 손실량에 대해 나타내고 있다. 모든 사례들에 대해 최적화 알고리즘을 적용했을 때 선로 손실이 가장 적은 것을 알 수 있다. 하지만 모든 사례들에 대해 선로 손실을 줄이기 위해 분산전원이 Volt/VAR 제어를 통해 전압을 상승시키는 것을 알 수 있다. 이는 사례2와 같이 계통이 전반적으로 저전압인 상황에서는 계통의 전압을 1 pu에 가깝게 유지하는 데에는 도움이 되지만 사례1, 3과 같은 경우에는 오히려 전압을 더 상승시키는 역할을 한다. 이는 시뮬레이션에서 적용한 부하의 종류 때문이라고 할 수 있다.

부하는 전력 소비 방식에 따라 정전류, 정전력, 정임피던스 부하로 구분 지을 수 있다. 선로 손실을 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례한다. 따라서 정전류 부하의 경우 부하가 연계된 지점의 전압이 선로 손실에 영향을 미치지 않지만 정전력 부하와 정임피던스 부하의 경우 계통의 전압이 선로 손실에 영향을 미치게 된다. 정전

6) Volt/VAR 파라미터 설정에 따라 분산전원 연계지점의 전압이 변동해도 무효전력을 보상하지 않도록 dead band 범위를 설정 할 수 있다. 본 연구에서는 dead band 범위를 0.99~1.01 pu로 설정하였다.

력 부하의 경우 전압이 상승하면 전류가 줄어들기 때문에 부하 연계지점의 전압이 높아지면 선로 손실이 줄어들 수 있다. 반대로 정임피던스 부하의 경우 부하 연계지점의 전압이 상승하면 부하가 소비하는 전류도 증가하기 때문에 선로 손실이 증가할 수 있다. 본 시뮬레이션 연구에서는 모든 부하를 정전력 부하로 고려했기 때문에 최적화 알고리즘을 통해 선로손실을 줄이기 위해 전압을 상승시키는 효과가 나타났다.

따라서, 정전력 부하가 우세한 계통에서는, 선로 손실 최소화만을 고려한다면, 기존에 사용하던 Volt/VAR 파라미터 설정 방법(전압이 높으면 무효전력을 흡수하고 전압이 낮으면 무효전력을 공급하는 방법)과 반대되는 방법을 사용해야 효과를 볼 수 있다는 의미다. 스마트 분산전원 통합관리 시스템에 다양한 목적함수를 적용할 수 있지만, 선로 손실을 적용하려고 할 때는 이와 같이 부하의 종류에 대해서도 고려해야 한다.

제 4 절 스마트 분산전원 통합관리 시스템 개발

스마트 분산전원 통합관리 시스템은 전력 품질을 향상시키기 위해 분산전원을 직접 또는 파라미터 기반으로 제어하고, 이를 통해 얻은 데이터를 축적하여 향후 운영에 반영한다. IEC 61850 기반으로 분산전원과 통신하여 분산전원의 전압, 전류, 주파수, 유효전력, 무효전력과 같은 상태 정보를 얻고, 분산전원의 출력 제어와 함께 분산전원 상에 구현된 Volt/Var 시험, Frequency/Watt 시험, FRT 시험과 같은 분산전원 고급 기능을 통합 관리 시스템을 통해 제어 할 수 있도록 구현되었다. 분산전원 이외에도 배전 계통 상태를 모니터링하고 제어할 수 있으며 시험을 위한 부하 모의 장치나 계통 모의 장치의 모니터링 및 제어 기능도 구현되었다.

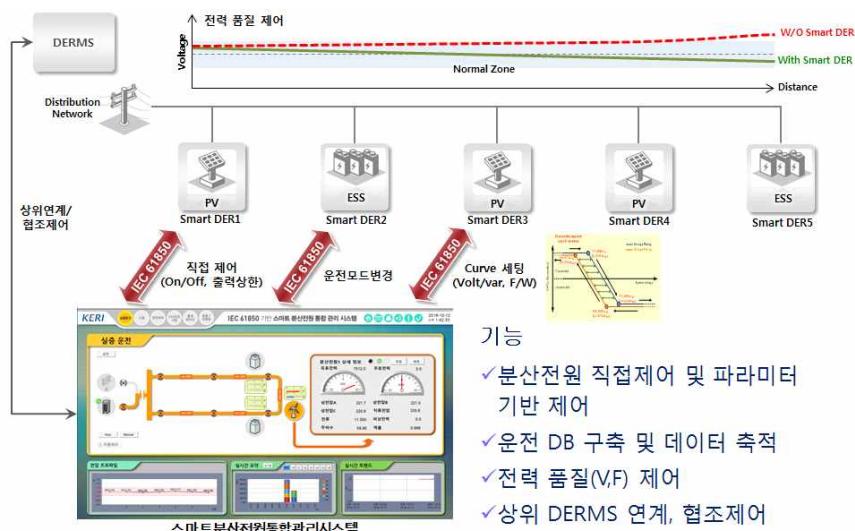


그림 3.59 스마트 분산전원 통합관리시스템 기술 개념도

1. 스마트 분산전원 통합 관리 시스템 개발

가. 마이크로그리드 환경 구성

통합 관리 시스템을 이용해 기술 시험을 수행하기 위해 먼저 장치들을 연결하여 마이크로그리드 환경을 구축해야 한다.

(1) 마이크로그리드 구성 하드웨어 장치

마이크로그리드는 부하 2대, 스마트 분산전원 5대, 배전모의장치, 전원공급장치로 구성되어 있으며 각 장치의 모델명과 통신 방식은 표 3.27 과 같다.

표 3.27 마이크로그리드 구성 장치 특성

장치	모델명	통신 방식
부하1	제작 (Programmable LD)	Modbus RTU (RS485: COM13)
부하2	제작 (Programmable LD)	Modbus RTU (RS485: COM14)
분산전원 1	제작 (WT Simulator)	IEC 61850 (I/F Module: 192.168.0.21)
분산전원 2	제작 (WT Simulator)	IEC 61850 (I/F Module: 192.168.0.22)
분산전원 3	제작 (WT Simulator)	IEC 61850 (I/F Module: 192.168.0.23)
분산전원 4	제작 (WT Simulator)	IEC 61850 (I/F Module: 192.168.0.24)
분산전원 5	제작 (WT Simulator)	IEC 61850 (I/F Module: 192.168.0.25)
배전모의장치	제작	디지털 미터 : Modbus RTU (RS485: COM15) 스위치 : Modbus TCP (IP: 192.168.0.3)
전원공급장치	Chroma Regenerative Grid Simulator 61860	Modbus RTU (RS232)

배전모의장치의 경우 스위치를 제어는 Modbus TCP 방식으로 통신하고 각 디지털미터의 값을 받아오기 위해서는 Modbus RTU 방식으로 통신이다

모든 장치는 현재 ESS Lab에 설치되어 있으며 각 장치 사진은 그림3.60과 같다.

왼쪽부터 순서대로 스마트 인버터, 배전계통모의장치, 전원장치, 부하 장치 2대로 구성되어있다.



그림 3.60 시험을 위한 마이크로그리드 환경 구성

(2) 통합 관리 시스템과 장치 통신 연결

대부분의 장치가 Modbus RTU(RS485) 방식으로 통신을 수행하므로 USB to RS485 multi port를 이용해 통합 관리 시스템 데스크탑에 부하 2대, 배전모의장치 연결되어 있다.

Modbus RTU(RS232) 통신을 하는 계통모의장치는 USB to RS232 single-port로 통합 관리 시스템 데스크탑에 연결되어 있다.

Modbus TCP 통신을 하는 배전모의장치의 경우 이더넷 케이블을 스위치에 연결하여 통합 관리 시스템과 네트워크로 연결되어 있다.

IEC 61850 통신을 하는 스마트 분산전원(분산전원 인터페이스 모듈 연결된 상태) 또한 이더넷 케이블을 스위치에 연결하여 통합 관리 시스템과 네트워크로 연결되어 있다.

(3) 배전계통모의장치(배선)에서의 분산전원/부하 장치 투입

시나리오시험을 위해 경남대에서 제공한 통합 관리 기술 시험 시나리오 1, 2, 3에서 시나리오 1에 맞춰 장치가 투입되어 있고, 통합 관리 시스템 디자인 업체에는 시나리오 1, 2, 3을 취합한 형태의 마이크로그리드 구성도 디자인이다.

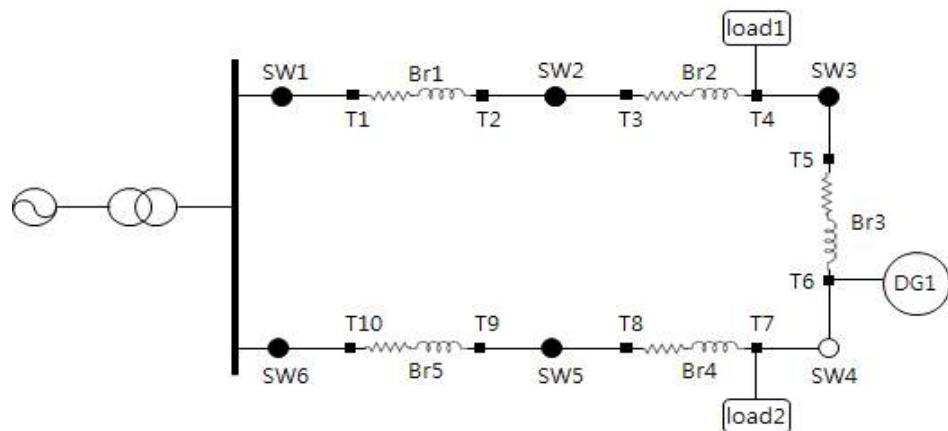


그림 3.61 현재 장치 투입 상태 - 경남대 시나리오 1

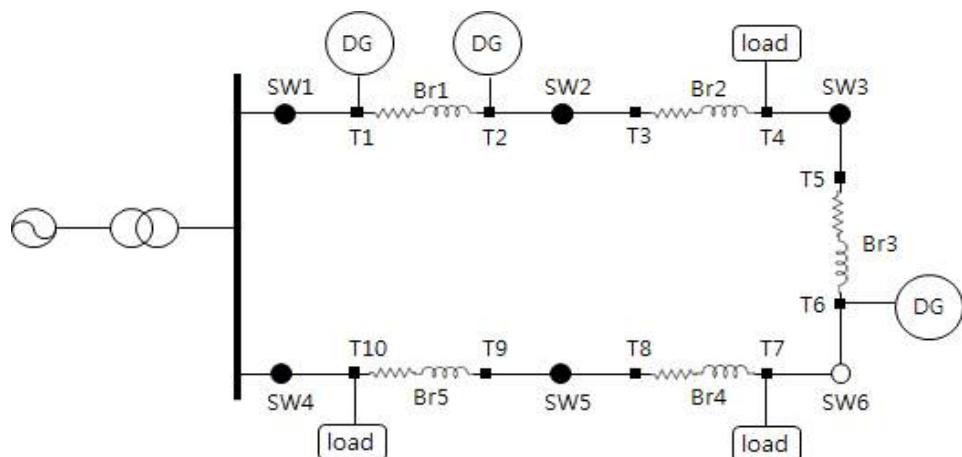


그림 3.62 MG 디자인 - 경남대 시나리오 1, 2, 3 취합

マイクロプログラ드 구성도에서 DG : 분산전원, load : 부하

나. 통합관리 시스템 구축을 위한 필요 프로그램

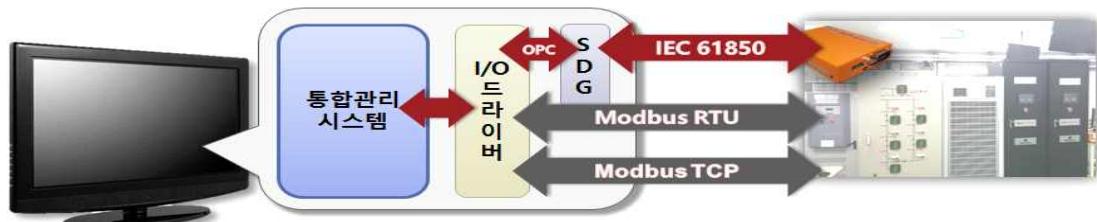


그림 3.63 스마트 분산전원 통합 관리 구축

(1) Proficy HMI/SCADA-iFIX

Proficy HMI/SCADA-iFIX는 SCADA/HMI 개발을 지원하는 솔루션으로, GUI 구성과

쉽게 할 수 있도록 도와주며 Visual Basic 코딩을 통해 복잡한 기능도 구현 가능

(2) Proficy Historian

Proficy Historian은 데이터 수집을 도와주는 프로그램으로, iFIX 프로그램의 DB에서는 실시간 데이터만 보유할 수 있으므로 장기적인 데이터 수집을 위해서 Proficy Historian을 연동하여 사용

(3) I/O Driver (Modbus RTU, Modbus TCP, OPC)

iFIX 프로그램의 DB를 이용해 편리하게 장치의 데이터를 받아오고 장치에 데이터를 쓰기 위해서 여러 통신 방식에 대한 driver 지원

(4) TMW(Triangle Microworks) SCADA Data Gateway

SCADA Data Gateway는 통신 방식 변환을 수행해주는 소프트웨어

iFIX 프로그램에서 IEC 61850 기술을 지원하는 드라이버가 없어 바로 장치와 통신을 할 수 없음. 그러므로 SCADA Data Gateway에서 IEC 61850 통신 방식을 OPC 방식으로 변환해주고, iFIX 프로그램에서 OPC 통신 드라이버를 이용해 데이터를 받아오는 방식으로 동작

(5) TMW(Triangle Microworks) IEC 61850 Test Suite

TMW IEC 61850 Test Suite에는 IEC 61850 기술을 사용하고 관련 장치를 개발하기 위해 필요한 3개의 소프트웨어를 포함

- SCL Forge : SCL 파일(cid)을 손쉽게 만들 수 있도록 지원하는 소프트웨어
- Hammer : IEC 61850 테스트 클라이언트. IEC 61850 서버를 개발했을 경우 Hammer를 이용해 서버 동작을 테스트 할 수 있음
- Anvil : IEC 61850 테스트 서버. IEC 61850 클라이언트를 개발했을 경우 Anvil을 이용해 클라이언트 동작을 테스트 할 수 있음

(6) Chart FX

iFIX 프로그램 상에서 Visual Basic 코딩을 이용해 다양한 형태의 그래프를 그릴 수 있도록 지원하는 프로그램

(7) 기타 테스트 툴

통합 관리 시스템으로 마이크로그리드 제어 테스트를 할 때 문제가 발생하면 각각 프로그램 테스트하기에 유용한 툴

- WireShark : 패킷 캡쳐 툴로 유명. IEC 61850 관련된 네트워크 패킷과 Modbus TCP 패킷에 대해 필터링을하고 패킷 내용 분석 가능
- Modbus poll : Modbus RTU/TCP 클라이언트 툴. 사용자가 원하는 Modbus 명령을

생성하여 전송하므로 Modbus RTU/TCP server를 테스트하고 싶을 때 사용 가능

- Modbus RTU RS-232 PLC - Simulator : Modbus RTU/TCP 서버 툴. 시뮬레이터로 Modbus 명령을 받아 레지스터에 어떻게 처리를 하였는지 확인할 수 있음. Modbus RTU/TCP client를 테스트하고 싶을 때 사용 가능
- TMW OPC Client : TMW SCADA Data Gateway를 설치할 때 같이 설치되는 테스트 툴로 SCADA Data Gateway에서 OPC 명령이 왔을 때 제대로 통신 변환을 하여 명령을 수행하는지 확인하기 위해 사용할 수 있음

가. IEC61850 기반 통합 관리 시스템 기능 설계

- (1) 스마트분산전원 직접 제어/간접 제어 기능 - 스마트 분산전원의 시작, 정지, 출력 제어와 같은 직접적인 제어와 고급 기능을 활용한 간접 제어 기능 구현
- (2) 배전 계통 상태 모니터링 기능 - 배전 계통의 전압, 전류, 유효전력, 무효전력 등의 상태 모니터링
- (3) 통계 데이터 처리, 알람/이벤트 기능 - 분산전원별 출력과 부하별 부하량을 시간순으로 기록하고 이에 대한 열람 기능 구현 및 알람/이벤트 기능 구현

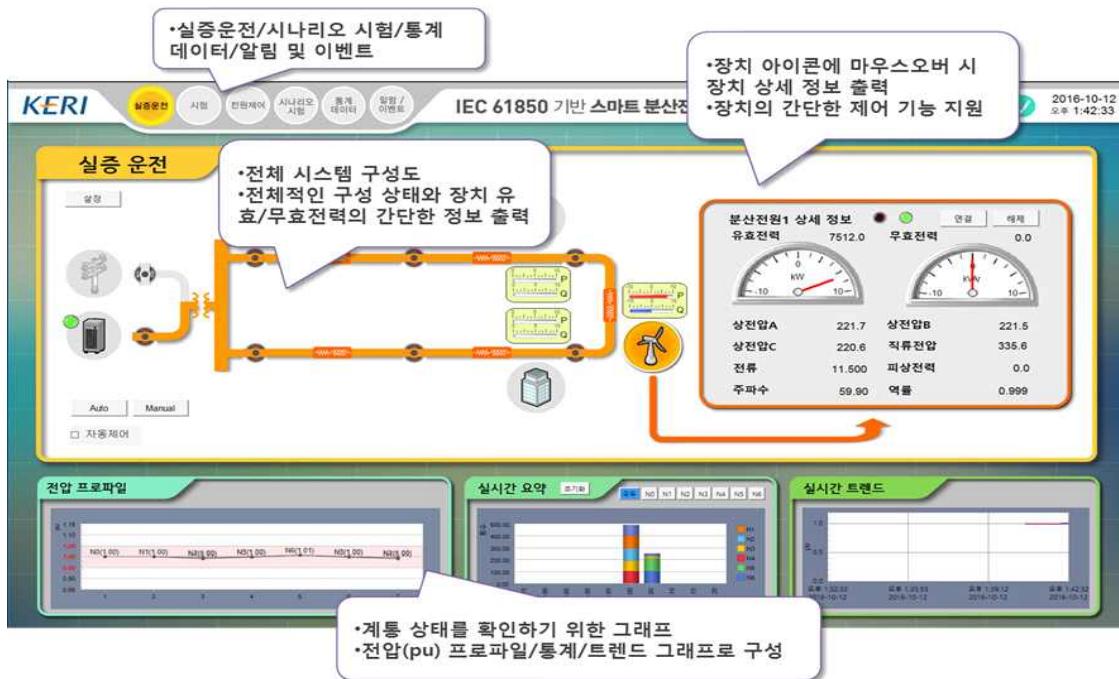


그림 3.64 스마트 분산전원 통합관리시스템 구성

다. 스마트 분산전원 시험 기능

- (1) 스마트 분산전원 고급 기능 시험 - 분산전원 상에 구현된 Volt/Var 시험, Frequency/Watt 시험, FRT 시험 등을 수행 가능하도록 통합 관리 시스템 상

에 구현

- (2) 스마트 분산전원 효과 검증 시험 (배전 계통 적용 시나리오 구성) - 세 가지 배전 계통상의 시나리오를 설정하고 이 시나리오를 검증 가능하도록 시험 기능 구현
- (3) 스마트 분산전원 관리 알고리즘 시험 - 계통의 상황에 따른 스마트분산전원 최적 설정 알고리즘 구현 및 시험 기능 구현

라. 스마트 분산전원 통합관리시스템 UI 디자인

- (1) 분산전원 통합 관리 화면 - 전체 시스템의 구성도를 확인할 수 있으며 배전 계통과 분산 전원, 부하 등에 대한 제어 및 정보 확인 가능하도록 구성
- (2) 스마트 인버터 기능 시험 화면 - Volt/Var 시험 (그림 3.65), Frequency/Watt 시험 (그림 3.66), FRT 시험 (그림 3.67)을 위해 세부 파라미터 조절 화면 구성, 각 시험별로 제어 모드 활성화/비활성화 선택이 가능하며 설정 그래프의 변경이 가능하도록 구성

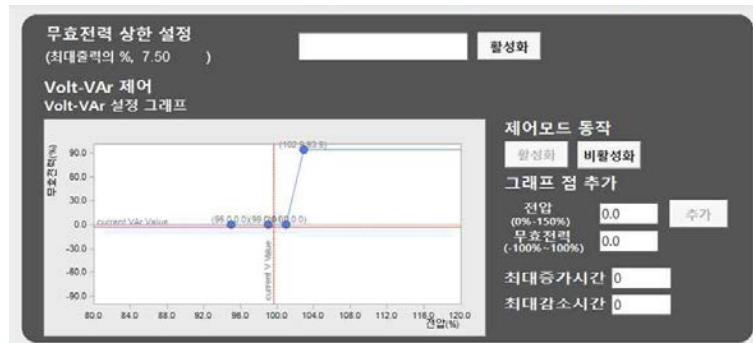


그림 3.65 Volt/Var 시험 세부 파라미터 조절 화면



그림 3.66 Frequency/Watt 시험 세부 파라미터 조절 화면

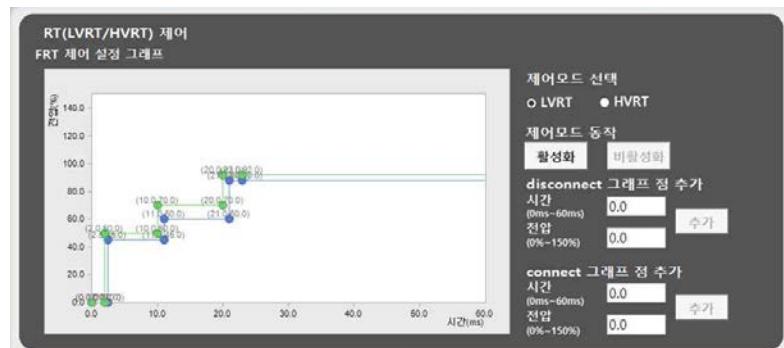


그림 3.67 FRT 시험 세부 파라미터 조절 화면

- (3) 시나리오 시험 화면 - 배전계통에서 일어날 수 있는 세 가지 시나리오가 설정되어 있으며 이 시나리오에 대한 시험을 단계별로 진행할 수 있도록 설정된 화면

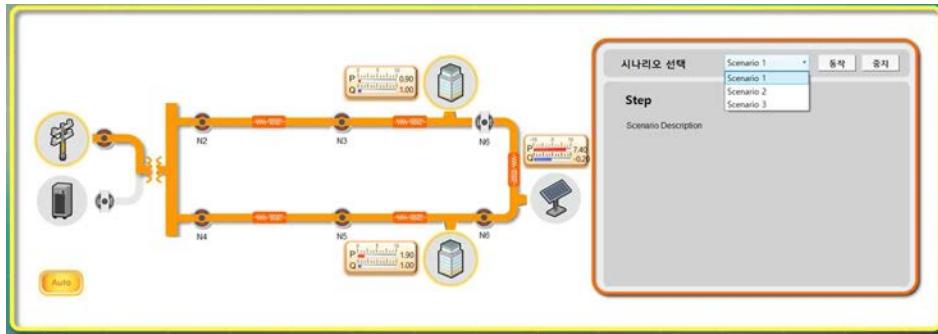


그림 3.68 시나리오 시험 화면

- (4) 통계 및 알람 화면 - 통계 화면에서는 특정 시기의 분산전원의 출력이나 부하의 부하량이 선택하여 그래프 형태로 볼 수 있도록 구성되어 있으며 알람 화면에서는 각 장비의 세부 파라미터와 관련된 알람 정보를 확인할 수 있도록 구성

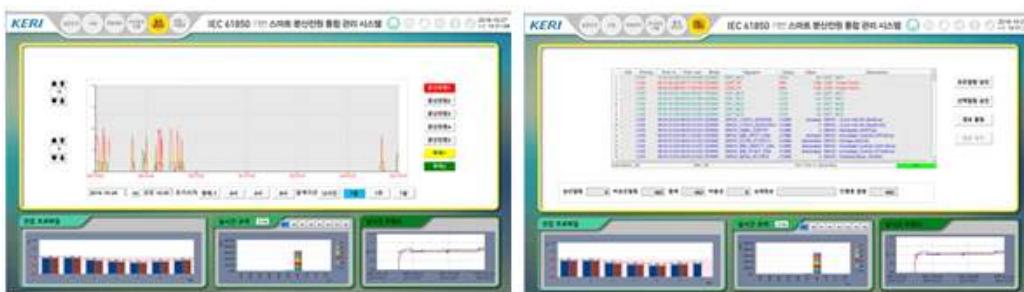


그림 3.69 통계 및 알람 화면

2. 스마트 분산전원 최적 설정 알고리즘

계통의 상황에 따른 스마트분산전원 최적 설정 알고리즘을 구현하고 이를 IEC 61850 기반으로 분산전원에 전달하여 최적 파라미터를 적용하였다. 3.3.2 장에서 시뮬레이션에 사용한 그림 3.54의 최적 설정 알고리즘을 스마트 분산전원 통합관리 시스템에 적용하였다. 해당 알고리즘을 사용할지 여부는 사용자의 설정에 의해 선택 가능하도록 통합관리 시스템 상에 구현되었다.

가. 최적화 알고리즘 – PSO(Particle Swarm Optimization)

스마트 분산전원 최적 파라미터 설정 알고리즘에 적용된 최적화 알고리즘은 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘이다. PSO 알고리즘은 구조가 간단하고 연산속도가 빠르다는 장점에 의해 널리 사용되고 있다. 특히, 전력계통과 같은 비선형 시스템 문제를 해결하는데 효율적이다 [16].

PSO 알고리즘에서는 입자(Particle)들이 서로 정보를 교류하며 최적의 해를 구하기 위해 움직인다. 입자들의 움직임에는 확률적인 속도(Velocity) 항이 적용되는 데, 이로 인해 전역해(Global Solution)를 구할 수 있다는 장점이 있다. PSO 알고리즘의 속도는 다음과 같이 구한다.

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c_1 rand_1(X_{pb,i}^k - X_i^k) + c_2 rand_2(X_{gb}^k - X_i^k) \quad (3.3)$$

수식 (3.3)에서 V_i^k 는 알고리즘의 k번째 반복(iteration) 연산에서 i번 입자의 속도를 나타낸다. $X_{pb,i}^k$ 는 k번까지의 반복 연산중에서 i번 입자가 가졌던 최적의 위치(최적해)고, X_{gb}^k 는 모든 입자들 중에서의 최적 위치다. c_1 과 c_2 는 속도를 조절할 수 있는 파라미터로, 보통 두 파라미터 모두 2를 대입한다[16]. 본 연구에서는 반복적인 모의실험을 통해 0.5를 대입하는 것이 효율적이라고 판단하여 0.5를 대입하였다. $rand_1$ 과 $rand_2$ 는 0에서 1사이의 실수다. 이 값들은 알고리즘의 반복(iteration)이 진행될 때마다 확률적으로 변경된다.

나. 문제 정식화

(1) 제어변수

본 연구에서는 스마트 분산전원 통합관리를 위해 분산전원의 Volt/VAR 파라미터를 설정한다. 본 연구에서 설정하는 Volt/VAR 파라미터는 분산전원 한 대에 총 8개 (4점의 2차원 좌표 - 전압 대 무효전력 좌표)가 있다. 분산전원 한 대에 총 8개의 파라미터를 설정한다면 분산전원이 증가할수록 연산이 복잡해진다. Volt/VAR 제어

는 궁극적으로 원하는 무효전력 값을 설정하는 것이므로 본 연구에서는 알고리즘의 효율성을 위해 분산전원의 무효전력만을 제어변수로 설정하였다. 알고리즘을 통해 원하는 무효전력 값을 얻게 되면, 이 값을 토대로 Volt/VAR 파라미터를 산출한다.

(2) 목적함수

본 연구에서는 두 가지 목적함수를 설정하였다. 배전계통의 선로 손실 최소화와 전압 안정도 향상이다. 시스템 운영자가 두 목적함수 중에서 선택적으로 사용할 수 있도록 설정하였다. 두 목적함수는 다음과 같다.

$$J = P_{loss} + f_p \quad (3.4)$$

$$J = \sum_{n=1}^N |V_n - V_{nom}|^2 + f_p \quad (3.5)$$

수식 (3.4)는 선로 손실(P_{loss})과 벌점함수(Penalty Function)를 포함하는 목적함수이고 수식 (3.5)은 배전계통의 모든 모선(N개)의 전압(V_n)이 정격전압(V_{nom})에서 벗어나 있는 정도와 벌점함수를 포함하는 목적함수이다. PSO 알고리즘 특성 상 제약조건을 반복 연산중에 제외시키기가 어려워 제약조건을 위배하면 벌점함수를 가중시키는 방향으로 문제를 해결했다.

본 연구의 시험에서는 전압 안정도 향상을 위한 목적함수(수식 (3.5))만 적용하였다.

(3) 제약조건

본 연구에서의 제약조건은 다음과 같다.

- 모든 모선에 대해 모선 전압을 허용 범위(0.95~1.05 pu) 내로 유지
- 모든 분산전원의 무효전력 출력이 허용 범위 내로 유지
- 분산전원 연계지점의 전압이 Volt/VAR 제어의 dead band 범위(0.99~1.01 pu) 내에 있을 때는 분산전원의 무효전력 출력이 0 VAR
- 분산전원 연계지점의 전압 ≥ 1.01 pu 이면, 분산전원의 무효전력 ≤ 0
- 분산전원 연계지점의 전압 ≤ 0.99 pu 이면, 분산전원의 무효전력 ≥ 0
- 배전계통 내 발전량 = 부하량 + 손실

다. 스마트 분산전원 최적 파라미터 설정

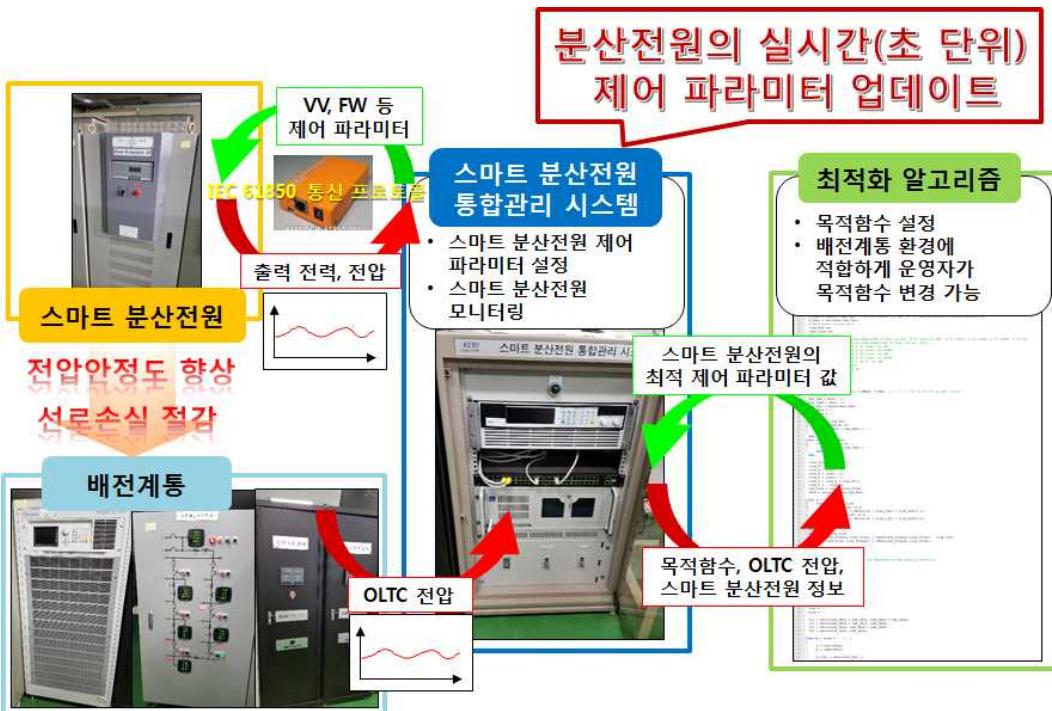


그림 3.70 스마트 분산전원 통합관리 시스템의 스마트 분산전원 최적 파라미터 설정 개념도

스마트 분산전원의 최적 파라미터를 설정하기 위한 전체 알고리즘은 그림 3.54에 나타나 있다. 최적화 알고리즘은 앞 절에서 언급한 PSO 알고리즘을 적용하였고 목적 함수 내의 선로 손실 또는 전압 안정도를 구하기 위한 조류계산은 Newton-Raphson 방법을 적용하였다. 알고리즘 코드는 MATLAB과 Python으로 각각 작성하였으며 시험에는 MATLAB만을 적용하였다. 최적화 알고리즘을 통해 스마트 분산전원의 최적 무효전력 값을 구하게 되면, 분산전원 연계지점의 전압 값을 바탕으로 Volt/VAR 파라미터들을 산출하여 이 값을 스마트 분산전원에 전달한다.

스마트 분산전원 통합관리 시스템에 파라미터 설정 알고리즘을 적용하여 구현되는 전체 시스템의 개념도는 그림 3.70과 같다. 먼저 스마트 분산전원 통합관리 시스템에서 배전계통의 전압, 부하량, 분산전원의 발전량을 측정한다. 측정된 값은 초단위의 주기로 지속적으로 갱신된다. 이 정보를 토대로 최적 파라미터 설정 알고리즘이 스마트 분산전원의 최적 Volt/VAR 파라미터 값을 구한다. 최적 파라미터는 약 5초의 주기로 계산되어 새 값을 갱신된다. 이 값을 IEC 61850 기반으로 스마트 분산전원에 전달이 되고 스마트 분산전원 전달받은 값을 토대로 Volt/VAR 파라미터 값을 갱신한다.

3. 스마트분산전원 적용 효과

스마트분산전원의 적용 효과를 확인하기 위하여 다음과 같은 시험을 진행하였다. 우선 아래 그림과 같은 모의 배전망에 두개의 부하와 하나의 분산전원을 연결하였

다. 또한 각각의 부하와 분산전원에 대해 하루 동안의 유효전력과 무효전력에 해당하는 패턴을 입력하였다.

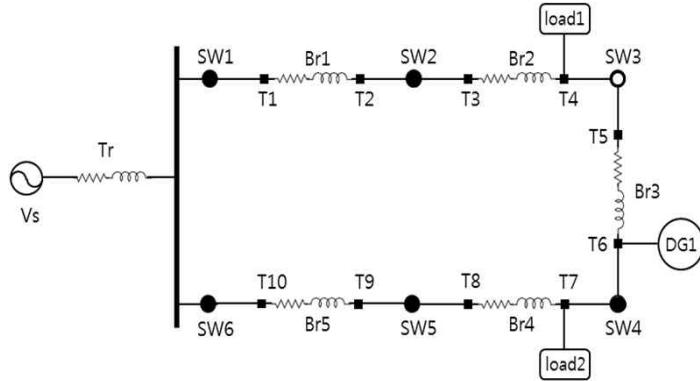


그림 3.71 스마트분산전원 적용 시험 모의 배전 계통

시험에 사용된 부하1과 부하2의 하루 동안의 유효전력, 무효전력 패턴은 다음 그림과 같다. 해당 그래프는 06:30분부터 다음 날 06:30분까지의 부하패턴을 나타낸다. 분산전원의 패턴은 하루 동안의 태양광 발전의 출력을 모의하였다.

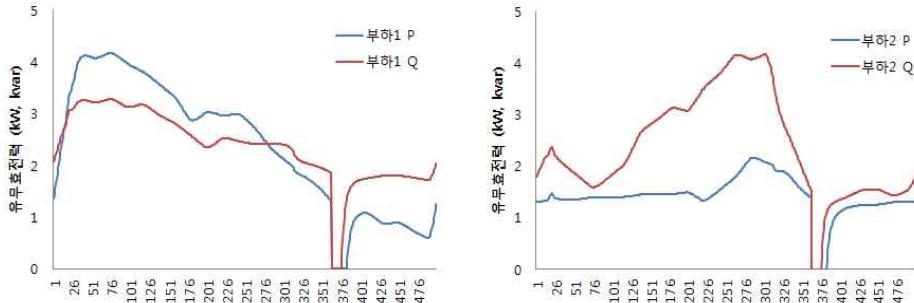


그림 3.72 모의 부하 유무효전력 입력 패턴

본 시험을 진행하는 동안 하루 동안의 배전망의 분산전원 연계점 전압을 측정하고 이를 정리하여 변화를 확인하였다. 분산전원과 부하에 설정된 모의 패턴은 시험에서는 그림 3.73의 오른쪽 그래프와 같은 출력으로 나타났다. 해당 출력은 그림 3.72의 입력된 패턴과 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 해당 패턴에 대해 그림 3.73의 왼쪽 그래프는 모의 배전 계통에 스마트 분산전원을 적용하기 전과 후의 분산전원 연계점 전압을 보여준다.

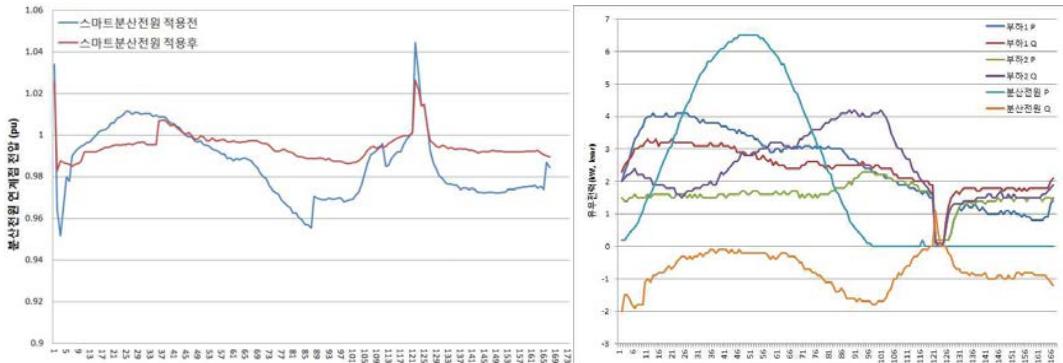


그림 3.73 모의 배전 계통에 스마트분산전원 적용 결과 (연계점 전압, 부하 및 분산전원 유무효전력)

그림에서 보는바와 같이 스마트 분산전원을 적용하기 전에 비해 적용한 후 1 pu에 가까운 안정적인 전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 해당 전압 변동률을 표로 정리하면 다음의 표와 같다. 스마트 분산전원을 적용 시 최대 전압 변동률이 2.2% 개선되었으며 평균 전압 변동률이 1.0% 개선되었음을 확인할 수 있다.

표 3.27 모의 배전 계통에 스마트분산전원 적용 시 전압 변동율

전압변동율	일반 분산전원	스마트분산전원
최대 전압 변동율	4.8 %	2.6 %
평균 전압 변동율	1.7 %	0.7 %

4. 분산전원 효과 검증을 위한 시나리오 구성 및 시험

분산 전원의 효과를 검증하기 위해 배전계통에서 일어날 수 있는 세 가지 시나리오를 제시하고 이 시나리오에 대한 시험을 진행하였다. 시나리오 시험을 위해 그림 3.60과 같이 분산전원, 배전 계통 모의장치, 전원 모의장치, 부하 모의 장치를 통합 관리 시스템상에 연결하여 시나리오 상에 설정된 패턴으로 운행 가능하도록 설정하였다.

가. 스마트 분산전원의 유용성 검증을 위한 시나리오 구성

(1) 시나리오 시험을 위한 계통 구성

(가) OLTC⁷⁾를 고려한 배전 계통 모의 시스템 설계 및 구현

7) OLTC (On load tap changer) - 부하가 걸렸을 때도 전압 조정이 가능한 텁 철환 장치, LDC(Line drop compensation) 알고리즘을 적용함

- (나) PQ 가변 부하 모의 장치 구현
 (다) 통합관리시스템을 통해 모의 배전 계통 모니터링

(2) 배전 계통에서 일어날 수 있는 세 가지 시나리오 제시

- (가) 배전 계통 내 스마트분산전원의 연계 점이 이동할 경우
 (나) 말단에 중부하가 존재하고 분산전원이 모션 인출단에 있는 경우
 (다) 분산전원이 인출단과 말단에 동시에 있는 경우

나. 시나리오1 - 배전 계통 내 스마트분산전원의 연계 점이 이동할 경우

- (1) 분산전원이 중부하 선로에 연결되어 있다가 연계점 이동에 따라 경부하 선로로 절체
 (2) 분산전원이 경부하 선로로 이동하여 전압을 상승시킴
 (3) 통합관리시스템에서 스마트분산전원의 Volt/Var 설정 곡선을 변경하여 전압 상승을 억제함

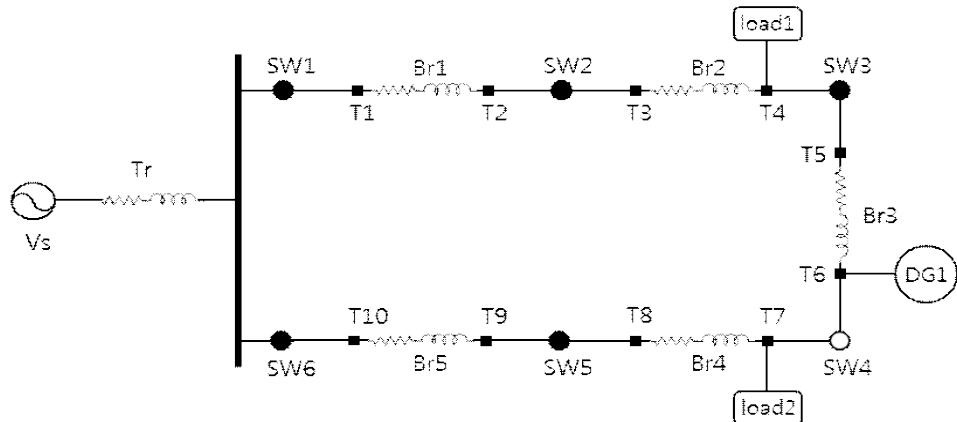


그림 3.74 시나리오1 모의 배전 계통 (Load1 : 중부하, Load2 : 경부하 / 선로 절체: SW3(ON),SW4(OFF) → SW3(OFF), SW4(ON))

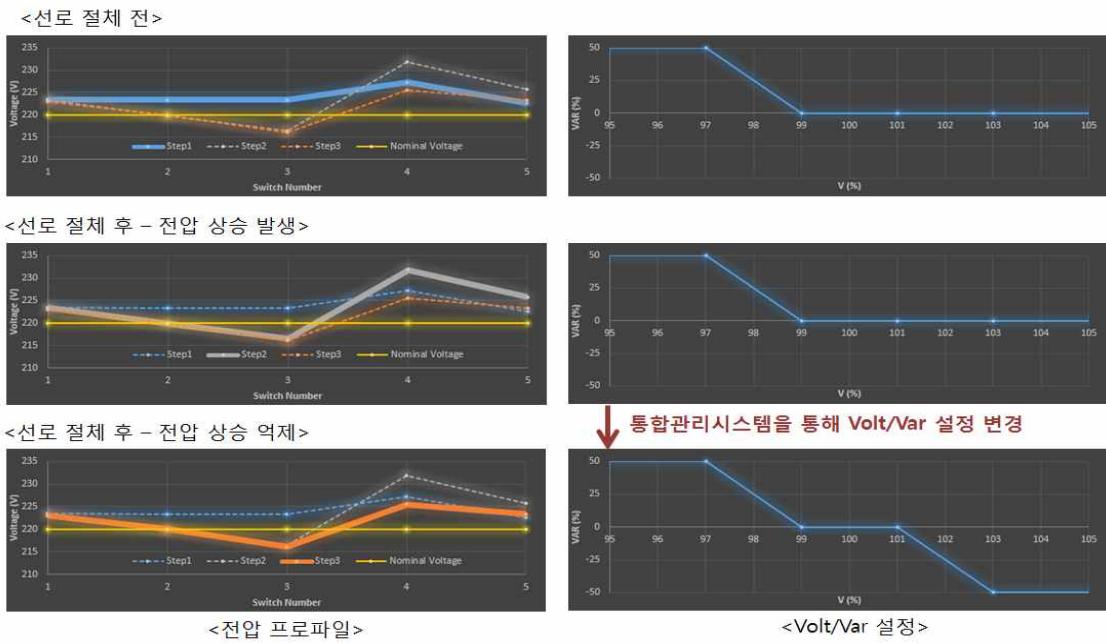


그림 3.75 시나리오1 시험 결과

다. 시나리오2 - 말단에 중부하가 존재하고 분산전원이 모선 인출단에 있는 경우

- (1) 분산전원의 설치점은 전압이 높지만 말단은 저전압이 발생되는 상황
- (2) 분산전원 설치점의 전압이 1pu보다 높아 발생한 무효전력에 의해 말단의 저 전압을 심화시킴
- (3) 통합관리시스템에서 분산전의 Volt/Var 설정치를 변경하여 말단의 저전압을 방지할 수 있음

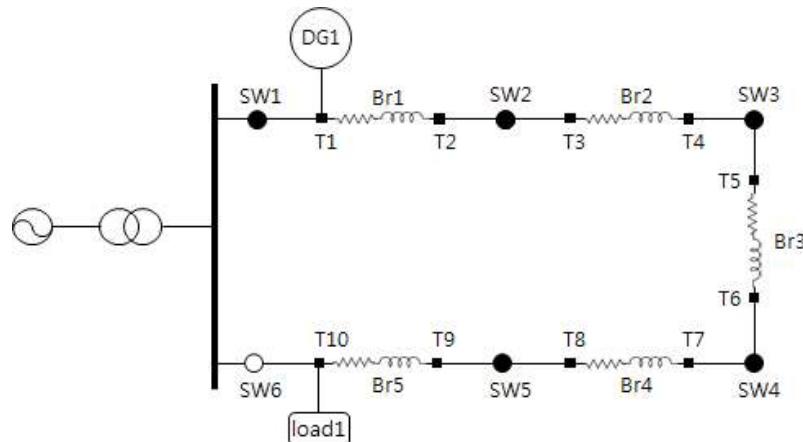
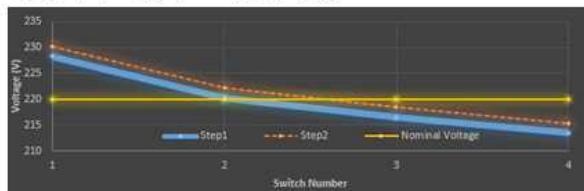
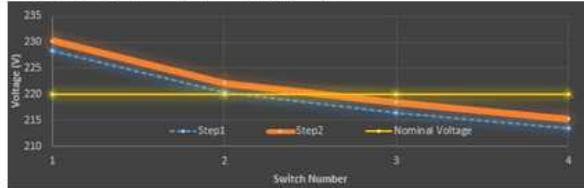


그림 3.76 시나리오2 모의 배전 계통 (Load1 : 중부하)

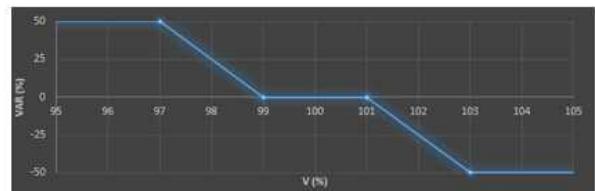
<말단의 부하 증가로 저전압 발생>



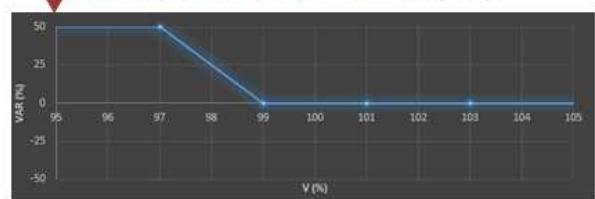
<설정 변경 후 - 말단 저전압 억제>



<전압 프로파일>



통합관리시스템을 통해 Volt/Var 설정 변경



<Volt/Var 설정>

그림 3.77 시나리오2 시험 결과

라. 시나리오3 - 분산전원이 인출단과 말단에 동시에 있는 경우

- (1) 두 개의 분산전원이 서로 인출단과 말단에 설치되어 있음
- (2) 선로의 부하량이 중부하에서 경부하로 변경됨에 따라 전압 상승이 발생
- (3) 인출단 분산전원이 말단 분산전원보다 상대적으로 낮은 전압에서 무효전력을 출력해야 함
- (4) 기존 시스템은 초기에 정해진 설정치에 따라 동작하므로 대응이 불가능하지만 분산전원통합관리시스템과 스마트인버터를 통해 문제를 해결할 수 있음

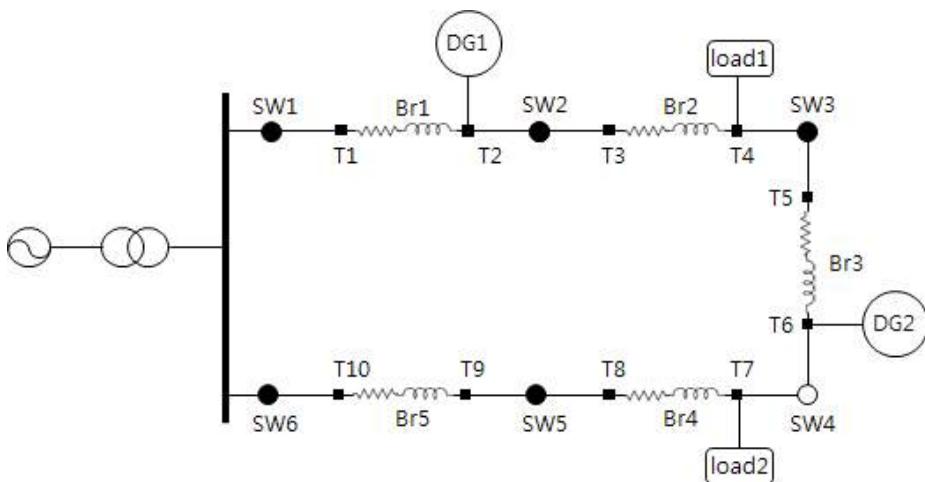


그림 3.78 시나리오3 모의 배전 계통 (Load1 : 중부하 → 경부하, Load2 : 중부하)

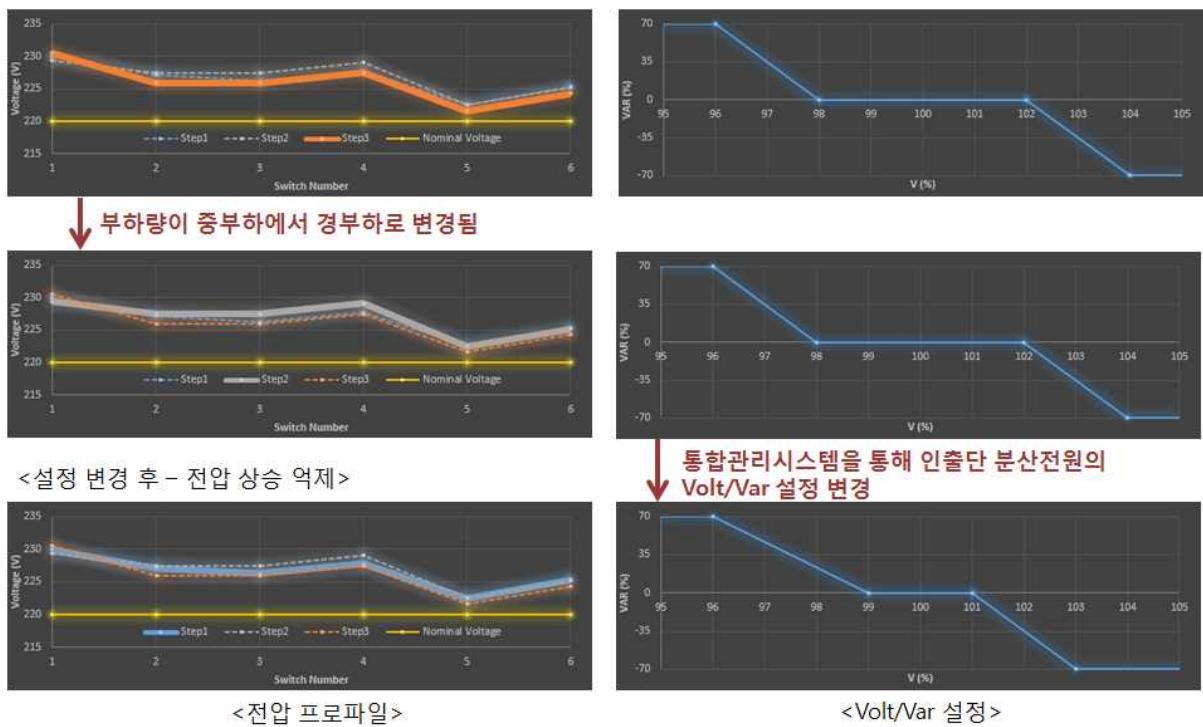


그림 3.79 시나리오3 시험 결과

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 과제의 개발 목표는 IEC 61850 통신기술을 기반으로 하며 첨단 인버터 기능을 갖는 스마트 분산전원과 개별 스마트 분산전원을 최적 관리하여 시스템 신뢰도와 안정성을 높인 분산전원 통합관리 시스템 개발하는 것으로 크게 i) IEC 61850 기반 분산전원 개발과 ii) IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 기술 개발의 두개의 연구 내용으로 구성된다.

i) IEC 61850 기반 분산전원 개발은 IEC 61850 국제 표준 정보 모델과 정보교환 모델이 구현된 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스와 직접 제어, 운전 모드 제어, 무효전력 제어, 주파수 제어, LVRT 제어 등 첨단 인버터 기능이 구현된 스마트 분산전원을 개발하는 것이다.

ii) IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템은 스마트 분산전원이 포함되는 전력 계통의 신뢰도와 안정성을 높이기 위한 최적 설정을 하는 통합관리 알고리즘을 포함하는 분산전원 통합관리 시스템을 개발하는 것이다.

표 4.1 최종 목표

구분	연구 개발 목표
최종목표	IEC 61850 기반 스마트 분산전원 및 분산전원 통합관리 시스템 개발 <input type="checkbox"/> IEC 61850 기반 스마트 분산전원 개발 <input type="checkbox"/> IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템 개발

표 4.2 당해단계 목표 종합요약

연도	연구 개발 목표	개발목표 설명(의미/중요성)
당해단계 목표	IEC 61850 기반의 스마트 분산전원 및 분산전원 통합관리 시스템 개발	IEC 61850 통신기술을 기반으로 하며 어드밴스드 인버터 기능을 갖는 스마트 분산전원과 개별 스마트 분산전원을 최적 관리하여 시스템 신뢰도와 안정성을 높인 분산전원 통합관리 시스템 개발
1차년도	IEC 61850 기반의 스마트 분산전원 개발	- 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발 →스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 →국제 표준 정보모델 및 정보교환 모델 구현 - 스마트 분산전원 개발 →스마트 분산전원 시뮬레이션 모델 개발 →스마트 분산전원 개발환경 구축 →어드밴스드 인버터 기본 기능 구현 (직접제어, 모드제어, 무효전력제어)

2차년도	IEC 61850 기반의 분산전원 통합관리 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 스마트 분산전원 기능 보완 및 시험 →어드밴스드 인버터 고급 기능 구현 (주파수제어, LVRT제어) - IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템 개발 →스마트 분산전원 계통 안정화 최적 설정 모의 →IEC 61850기반 통합관리 프로그램 개발 →스마트 분산전원 통합관리 알고리즘 개발
-------------	--------------------------------------	---

이와 관련하여 구체적인 연구 내용에 대해서는 3장에서 상세히 기술한 바 있으며 과제 계획서에서 제안하였던 연구 개발 내용을 충실히 달성하였다. 여기에서는 본 과제의 목표 달성을 위한 내용을 요약하면 다음과 같다.

i) IEC 61850 기반 분산전원 개발 (목표 달성을 = 100%)

○ 스마트 분산전원용 IEC 61850 인터페이스 개발

- IEC 61850 상용 프로토콜 스택을 적용하여 임베디드 컨트롤러에 구현함으로써 데이터 전송 (MMS/GOOSE), 리포트 (버퍼드/언버퍼드), 컨트롤 (Direct/SBO with Normal/Enhanced security), 파일 서비스 등 IEC 61850 표준에 적합한 인터페이스 모듈을 개발함 (레벨A 시험기관 시험 완료)
- 인버터 기반 분산전원의 표준 데이터 모델 및 데이터 교환 모델 적용 완료 (IEC 61850-7-420, IEC 61850-90-7 모델 적용)

○ 스마트 분산전원 개발

- 스마트 분산전원의 투입 효과를 검증하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고 검증 시나리오를 이용하여 스마트 분산전원 투입 효과를 확인함
- 스마트 분산전원의 기능 및 성능을 확인하기 위한 실험실 스케일의 개발 및 시험 환경을 구축함
- 스마트 분산전원의 첨단 인버터 기능 (인버터 직접 제어, 전압-무효전력 제어, 주파수 제어, LVRT 제어)을 개발하고 시험함

ii) IEC 61850 기반 분산전원 통합관리 시스템 개발 (목표 달성을 = 100%)

○ 분산전원용 IEC 61850 통합관리 시스템 개발

- 상용 IEC 61850 프로토콜 게이트웨이 (SCADA Data Gateway)를 이용하여 IEC 61850과 OPC 통신 연결을 수행하고 그 밖의 IO 드라이버 (모드버스 RTU, OPC)를 통해서 SCADA 시스템에 연계함으로써 IEC 61850 클라이언트를 완성함.
- 통합관리 시스템이 기능 요구조건에 맞춰서 통합관리 SCADA를 개발하여

시스템 실증 운전, 스마트 분산전원 시험, 전원 시뮬레이터의 제어, 시나리오 시험, 통계 데이터 분석, 알람/이벤트 확인 등을 구현함

- OLTC 설정 전압과 모션의 발전량, 부하량을 토대로 조류 계산을 수행한 뒤, 목적 함수에 맞는 최적화 문제를 풀어서 스마트 분산전원의 최적 파라미터 설정을 결정하고 스마트 분산전원에 원격 지령으로 운전 모드 및 파라미터를 전달하여 전력계통 안정화를 수행하는 스마트 분산전원 최적 설정 알고리즘을 개발함
- 모의시험으로 검증한 분산전원 투입효과 검증 시나리오를 하드웨어 기반의 기능 및 성능 시험 환경에 적용하여 스마트 분산전원의 최적화 알고리즘이 적용된 통합관리 시스템을 시험하고 배전 선로의 각 접속점에서의 전압 안정화 효과를 확인함

iii) 정량적 기술개발 결과

■ SCI 논문(실적 : SCI-E 1건)

김윤수 외 3인, New Requirements of Voltage/VAR Function for Smart Inverter in Distributed Generation Control, Energies (SCIE, IF: 2.077), 게재

■ 산업재산권(실적 : 특허 3건 출원, 프로그램 2건 등록 완료)

특허1. “분산전원의 기능을 시험하기 위한 시스템 및 그 방법” 특허 출원 (출원번호 : 1020150164037 출원일 : 2015/11/23, 출원인 : 이재덕 외)

특허2. “운전시간이 연장 가능한 디젤발전 하이브리드 에너지 저장 시스템” 특허 출원 (출원번호 : 1020150167563 출원일 : 2015/11/27, 출원인 : 조창희 외) - 특허 명세 및 청구 범위에 스마트 분산전원 기능을 포함

특허3. “스마트 분산전원의 전압-무효전력 및 주파수-유효전력 제어 곡선 설정 방법, 그 방법을 수행하는 장치 및 컴퓨터 프로그램” 특허 출원 (출원번호 : 10-2016-0138557 출원일 : 2015/11/27, 출원인 : 김윤수 외)

프로그램1 “IEC 61850기반 스마트 분산전원 시험 프로그램” (등록번호 C-2015-027371)

프로그램2 “스마트 분산전원용 SunSpec Modbus 통신 인터페이스 프로그램” (등록번호 C-2015-027370)

■ 개발 결과의 홍보 (전시회 참가 1건, 언론 홍보 1건)

홍보1. 한국전기산업대전 SIEF 2015 “IEC 61850기반 태양광 발전 시스템 인터페이스 모듈”

홍보2. 베트남국영뉴스 “VN eyes renewable energy” ,

<http://vietnamnews.vn/economy/279509/vn-eyes-renewable-energy.html>

홍보3. 한국전기산업대전 SIEF 2016 (2016.10.5 ~ 2016.10.7, 코엑스) “IEC 61850

기반 스마트 분산전원 통합관리 시스템”

홍보4. 전기산업브리핑 이슈분석 (전기산업연구원) 기고(2015년7월) “스마트 분산전원 기술”

관련 분야에의 기여도를 정량적으로 판정하기는 어려운 것이 사실이다. 본 과제의 결과물에서 볼 수 있듯이 논문 게제 및 발표를 통해서 연구 결과의 유효성과 우수성을 산업계 및 학계에 전파했으며 전시회에 적극적으로 참여하여 스마트 분산전원의 필요성에 대해서 활발하게 전달하였다. 또한 전기 전문지[3] 등에 기고를 통해서 연구 결과를 홍보함으로써 관련 산업분야의 활성화에 앞장섰다고 자부한다.

제 5장 연구개발 결과의 활용계획

신재생 에너지 분산전원의 계통 투입 비율이 점차 높아짐에 따라서 전통적인 계통 연계 기술로는 전력계통의 안정성과 신뢰도를 보장하기 힘든 상황이다. 첨단 인버터 기능을 구비한 스마트 분산전원은 전력 계통의 안정도와 신뢰도 그리고 운용 효율을 상당 부분 개선시킬 수 있는 수단으로 기대되는 장치로서 세계적으로 많은 노력과 투자가 이루어지고 있다.

미래의 신재생 에너지 분산전원의 도입 확대를 위해서는 개별 분산전원의 스마트 인버터 기능과 표준화된 정보통신을 이용한 정보 교환이 필수적이며 차세대 전력망을 구성하는 기반이 될 것이다.

본 과제에서 개발한 IEC 61850 기반 스마트 분산전원과 분산전원 통합관리 기술은 각 부분 기술의 개발과 더불어서 연구원에 구축한 시험 설비에서의 연속 운전을 통한 실증 시험을 함으로써 개발품의 신뢰성, 내구성, 운전성능 확인 등 상용화 가능성을 확인하였다.

따라서 과제에서 개발한 IEC 61850 기반 스마트 분산전원은 기술이전 등의 방법을 통하여 국내기업들이 국내외적으로 경쟁력 있는 분산전원 공급자로서 역할을 할 수 있도록 하는데 활용할 계획이며 또 스마트 분산전원 관련 기술의 선도 및 기술 확산 등의 목적으로 활용할 계획이다.

특히 본 과제의 직접적 결과물과 더불어 개발된 하드웨어 테스트베드는 변화하는 계통 연계 규정에 대응할 수 있으므로 여타 산업계나 하계의 연구 개발 결과의 기능 및 성능을 확인 할 수 있는 수단으로 활용할 수 있으며 향후 좀 더 발전된 관련 기술 개발을 지원하는 토대가 될 것으로 기대된다.

국제 표준의 공통정보 모델과 정보통신 기술을 바탕으로 개발된 기술은 IEC 61850 관련 산업의 후발 주자들 (특히 분산전원 분야)의 기술적 모범이 되며 상호 운용을 위한 기술 지원을 위해서 활용될 수 있으며 연구 결과가 스마트 그리드의 국가 표준 확립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

분산전원 통합관리 기술은 기존의 전력회사가 운영하고 있는 배전 관리 시스템에 융합되어 적용될 수 있으며 스마트 분산전원을 효율적으로 관리할 수 있는 판단 근거를 제공할 수 있다. 이 기술은 분산전원의 도입이 확대되어 기존 배전망에 신재생 전원이 한계량에 도달할 때, 전력계통의 신뢰도와 안정도를 높여주는 수단으로 활용할 수 있다.

현재 스마트 인버터의 상호 운용성과 성능을 시험할 수 있는 시험 플랫폼이 각 국의 연구 기관과 인버터 공급사에서 개발되고 있는 상황으로 국제 공동연구를 통해서 개발 내용과 시험 결과를 공유함으로써 글로벌 공감대를 형성하고 있다. 이러한 연구 추세에 우리나라도 적극 동참하여 신재생 분산전원 관련 산업을 국제적으로 선도할 수 있기를 기대한다.

제 6 장 참고문헌

- [1] “The Integrated Grid : Realizing the Full Value of Central and Distributed Energy Resources,” EPRI, Palo Alto, CA, 2014, 3002002733.
- [2] “Integrating Smart Distributed Energy Resources with Distribution Management Systems,” EPRI, Palo Alto, CA, 2012, 1024360.
- [3] “스마트 분산전원 기술” 전기산업 브리핑, 2015년 7월, 한국전기산업연구원
- [4] Roland Brundlinger, “Advanced smart inverter and DER functions Requirements in latest European Grid Codes and future trends,” Solar Canada 2015 conference. Dec. 2015.
- [5] “DER management Systems 2014 : Technology, Deployments and Market Size,” Oct 2014, GTM research report
- [6] IEC 61850, Communication networks and systems for power utility automation
- [7] IEC 61850-7-420: Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes
- [8] IEC TR 61850-90-7, Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems
- [9] Mi-Rim Do, Changhee Cho, Jae-Duck Lee and Gyeong-Hun Kim “Development of IEC 61850 Interface Module using Off-The-Shelf Embedded Board” , Oct. 13, 2015.
- [10] seong-jeong im, “전력유틸리티 자동화 표준, IEC61850의 표준 개발 현황” , 전기 저널, pp.14-21, Aug. 2015.
- [11] Recommendations for Updating the Technical Requirement for Inverters in Distributed Energy Resources, Smart Inverter Working Group Recommendations, December 2013
- [12] 기본사업보고서, “계통기여형 풍력발전단지 출력제어 시스템 개발” , 2014
- [13] Distribution System Analysis Subcommittee (1992), IEEE 37 Node Test Feeder, IEEE, [Online]. Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>
- [14] Y.-S. Kim, G.-H. Kim, J.-D. Lee, and C. Cho, “New requirements of the voltage/VAR function for smart inverter in distributed generation control” , Energies, vol. 9, no. 11, pp. 1-14, Nov. 2016.
- [15] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [16] Y. Valle et al., “Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems,” IEEE Trans. Evol. Computat., vol. 12, no. 2, pp. 171-195, Apr. 2008.

주 의

1. 이 보고서는 국가과학기술연구회에서 시행한 주요사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국가과학기술연구회에서 시행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.