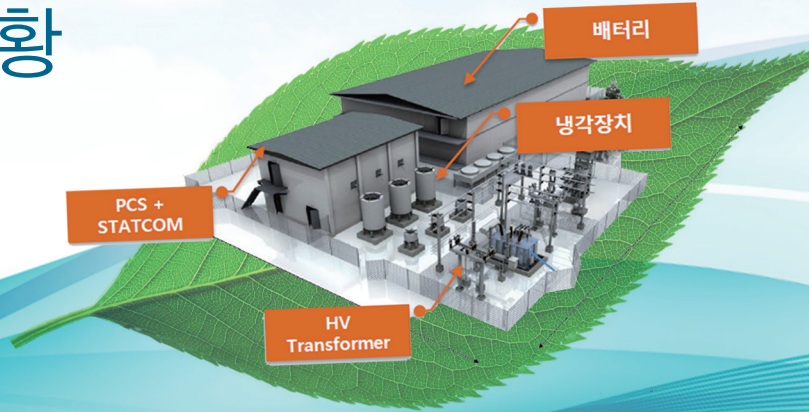


ESS 활용과 관련 PCS 기술 현황



박성준 | 전남대학교 교수
박성미 | 한국승각기대학교 조교수
이정환 | EPS

1. ESS의 개요

경제

성장과 생활수준의 향상으로 소비 전력량이 증가하면서 전력 수급의 불균형 문제가 심화되고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 ESS(Energy Storage System)가 각광을 받고 있으며 태양광, 풍력 발전소에 ESS를 설치 시 신재생에너지공급인증서(REC) 가중치 부여, 공공건물에 ESS 설치 의무화, 비상전원 사용 등 다양한 정부 정책과 맞물려 최근 3~4년간 ESS 프로젝트 수가 급증하고 있다. ESS를 활용한 다양한

비즈니스 모델들이 등장하면서 특히, REC 가중치 적용으로 신재생에너지 시장이 다시 활성화되고 있으며 ESS 시장의 수요 공급, 정책으로 볼 때 ESS 시장의 개화가 시작되었으며 기업의 수익성으로 연결 될 것으로 보인다.

ESS용 전력변환장치(PCS)는 배터리로부터 저장된 DC 전력을 교류로 변환하여 전력계통이나 Off-grid에 AC 전력을 공급하며, 전력계통으로부터 배터리에 전력을 저장하는 기능이 가능하다. 최근에는 신재생에너지, DC 배전에 활용되면서 DC 전력에서 배터리로 충전/방전이 가능한 양방향 DC/DC 컨버터로 구성된다. 필수 가능으로 생산된 전력을 저장하였다가 전력이 필요한 시점에 공급하는 것으로 PCS의 효율이 중요하다. 활용되는 시스템에 따라 ESS용 PCS의 시스템 구성은 달라지며 요구기술 또한 다양한데 활용분야 별로 필요 성능, 기술을 본 내용에서 살펴본다.

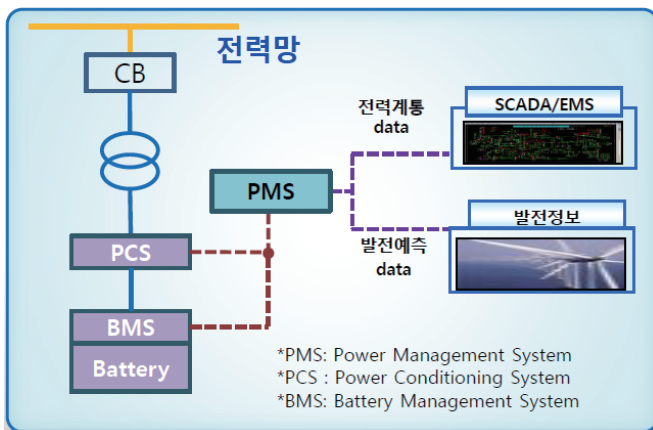


그림 1. ESS 시스템 구성도

*PMS: Power Management System
*PCS : Power Conditioning System
*BMS: Battery Management System

2. ESS 활용 및 추진 동향

2-1. 전력사업에서 ESS 활용 분류

최근에는 ESS의 활용 범위가 다양해지면서 고객/용도별로 발전 및 송배전 영역에서 세분된 영역들로 분류가 가능하다. 발전영역에서는 기존 대형 발전에 부하평준(Load Leveling)용, 신재생에너지 통합 발전용

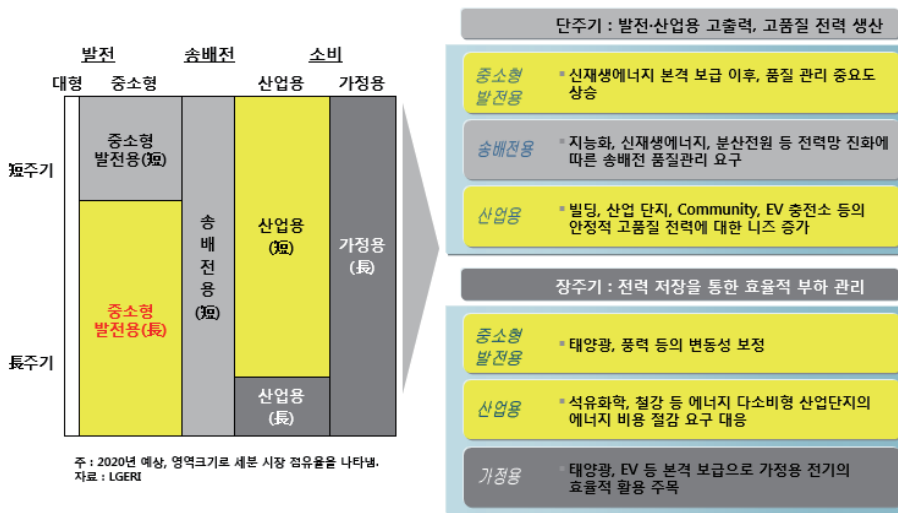


그림 2. ESS 활용 분야별 분류

세분 시장	사업 특성	고객	응도	편익
신재생에너지 발전 통합	인프라 사업	로컬발전 /송배전회사	발전 변동성 평준화	전력 공급 용량 시장에 입찰
예비력			발전기 가동률 최대화	예비력 시장에 입찰하여 수익창출
전력망 부하분산			송배전 추가 투자 유예	송전 혼잡시 방전을 통한 이익창출
주파수 조정			발전기 가동률 최대화	주파수변동에 즉각반응(GFC,AGC)
수요 관리(평준)	솔루션 사업	주택, 상용빌딩, 산업단지	전기 사용 요금 절감	비상 시 수요반응에 참여
PV 연계 자가소비				신재생 출력을 일정하게 유지
비상발전장치	세트 사업	주택, 상용빌딩, 산업단지	장시간 정전 대응, 가동 실패율 최소화	정전 시 비상전원으로 활용
무정전전원 공급장치				

그림 3. 세분 시장별 사업 특성과 응도

으로 세분화되며 송배전 영역에서는 최대 피크 수요 및 발전량 변동 대응을 위한 여유 용량 확보 차원에서 예비력, 전력망 부하 분산, 주파수 조정영역으로 나누어진다. 소비 단에서도 피크 수요 대응을 위한 에너지저장, 신재생에너지 발전 저장, 정전 시 출력 대응(Seamless 기능)등 용도별로 다양한 시장에서의 요구사항이 있다. 배터리 용량에 따라 단주기/장주기용으로 그 용도를 구분할 수 있다. 단주기의 경우 발전/산업용에 고효율, 고품질 전력 생산에 적용되며 장주기의 경우 전력 저장을 통한 효율적인 부하 관리용도로 활용가능하다. 최근에 태양광 발전에 ESS가 적용되면서 장주기-중소형 발전용 분야가 성장하고 있다.

ESS 시장을 세분 시장 별로 나눠봤을 때 발전 및 송배전용은

인프라 사업의 영역이고, 소비용에서 수요 평준(Peak Demanding Response), PV 연계 자가 발전 솔루션 사업, 비상발전장치 또는 비상발전기 연동 무정전 전원 공급장치는 세트 사업영역에 가깝다. 아직은 ESS 단독으로 매출을 발생하기는 어려운 단계이다. PV 연계 자가소비 사업 모델의 경우 ESS 설치 시 5배의 REC를 부여하는 정책이 올해 9월 발표되어 태양광 발전 사업자와 파트너십을 맺어 가장 활발히 매출이 발생하고 있는 사업 영역이다. 또한 시간대별 요금반응(SMP: System Marginal Pricing)으로 수요관리 사업 Part가 주목받고 있다.

2-2. 글로벌 추진 동향

(1) 미국 : ESS 설치 의무화 및 주파수 조정용 ESS의 전력시장 참여 허용.

○ 캘리포니아 주는 세계 최초 ESS 설치 의무화 법안 제정

발전사업자	2014년	2016년	2018년	2020년	누적
Southern California Edison	90MW	120MW	160MW	210MW	580MW
pacific Gas and Electric	90MW	120MW	160MW	210MW	580MW
San Diego Gas&Electric	20MW	30MW	45MW	70MW	165MW
전체	200MW	270MW	365MW	490MW	1,325MW

* 출처 : California Public Utilities Commission, "California's Energy Storage Mandate", '14.6

그림 4. 캘리포니아주 전력사업자별 ESS 설치 의무

○ 주파수 조정용 ESS의 전력시장 참여 허용

- ESS를 발전원, 마이크로그리드 분산 자원 및 송배전 분야 기술로 인정
- 미국에서 진행 중인 ESS 사업 중 50% 이상이 주파수 조정용 ESS로 활용

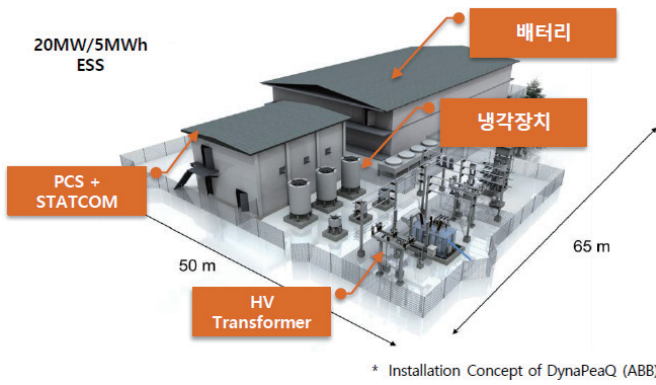


그림 5. Indoor Type 20MW급

(2) 호주 : 가정용 태양광 증가에 따른 ESS 보급 확대.

- 풍부한 신재생에너지 자원을 기반으로 태양광이 지속적으로 성장 전망
- '15년 태양광 설비는 '08년 대비 235배 성장 : 4,200MW ('15년)
- 태양광의 효율적 운영을 위해 호주에서는 태양광 ESS를 설치하여 운영
- ESS의 가정용 태양광 연계를 통한 전기요금 절감에 관심 증대

(3) 중국 : 신재생에너지 출력 및 전력계통 안정화를 위한 ESS 보급 확대.

- 중국은 최근 지역 간 송전제약으로 인해 풍력발전의 출력을 크게 삭감
- 전력계통에 연계되어 있는 풍력발전의 약 40% 손실 발생.
- 중국 국가전력망 공사는 설치된 풍력 발전설비 용량의 약 14%에 해당하는 ESS 설치 및 운영을 통해 계통 문제 해결 검토.

3. 활용분야에 따른 기술 현황

현재 ESS용 PCS는 활용분야에 따라 높은 신뢰성 향상과 효율 개선을 위한 기술 개발이 진행되고 있다. 이를 위해 멀티 레벨 인버터, 불 평형 3상 부하에 효율적인 운전을 위한 시스템 구성, PWM 제어 방법의 이중화(SVPWM, DPWM 교차적용), 안정성 확보를 위한 인증에 대한 연구 및 적용, 컨테이너에 대용량 PCS 병렬 설치 및 상위 EMS에 연동하여 동작 하기

위한 응답 속도 향상에 관한 연구 등이 진행되고 있다. 다음은 활용분야별로 요구되는 기술 현황을 나타낸다.

3-1. 주파수 조정용

계통에서는 사용 부하량과 총 발전기 출력량에 의해 계통 주파수가 결정되므로, 주파수제어 목적으로 운영되는 ESS가 현행 중앙급발전기의 부하추종 운전에 비해 경제성 확보가 가능하다. 발전사가 주파수 제어를 위해 감발 운전 시 연료효율 저감 및 발전기 수명감소로 인해 연간 약 5천만원/MW의 비용이 발생한다. 계통 주파수 증감 현상 및 계통 주파수 조정용으로 ESS 동작 원리는 아래와 같다.

○ 계통 주파수 감소 시 ESS 동작

- 발전출력이 사용부하에 비해 낮을 경우 주파수가 감소
- 전동기 회전수 감소, 송배전 시설 부담 증가 및 전력 품질 저하
- 계통 주파수 감소 시 ESS가 방전, 전체 발전출력을 증가시켜 사용부하와 균형 맞춤

○ 계통 주파수 증가 시 ESS 동작

- 발전출력이 사용부하에 비해 높을 경우 주파수가 증가
- 전동기 회전수 증가, 송배전 시설 부담 증가 및 전력 품질 저하
- 계통 주파수 증가 시 ESS가 충전, 전체 발전출력을 증가시켜 사용부하와 균형 맞춤

주파수 조정용의 경우 비상시 2시간 이하 예비력 제공이 가능해야 하며 20분 이내 주파수 조정이 되어야 한다. 화력발전의 주파수 제어 시 소모되는 연료비 및 시설 손상 제거, 짧은 응답시간으로 안정적 계통 운영, 사용 전력 품질 향상에 대한 PCS 요구 사항이 있다.

주파수 추종운전을 수행하는 ESS의 모델은 아래와 같다. 속도조정율(R_{BESS})에 의한 주파수 변동량이 결정되고 시정수(T_{BESS})에 의해 출력이 지연된다. 그리고 설비의 용량을 고려하여 출력이 제한되는 구조이다. 가스, 수력 발전기들의 속도 조정율은 일반적으로 3~6%의 범위 내에서 설정된다. 이는 주파수변동이 3~6%가 되어야 발전기의 출력이 100% 변동한다

구분	항목	정격	비고
배터리측 (DC측)	입력전압	750VDC ~ 1,100VDC	배터리 전압, 전류 총족조건
	입력전류	2000ADC (1MW급) 3000ADC (2MW급)	
	DC 차단기	1500V, 2,000A, 45kA (1MW급) 1500V, 3,000A, 45kA (2MW급)	
계통측 (AC측)	단위용량	1MW 또는 2MW	PCS Panel 기준
	정격용량	4MW [1MW*4 또는 2MW*2]	컨테이너 기준
	PCS 출력전압	3상 AC 440V	PCS 1차측 기준
	계통연계전압	3상 AC 22.9kV	변압기 출력전압 기준
	정격 주파수	60 Hz	
	AC 차단기	520V, 2000A, 65kA(1MW급) 520V, 3000A, 65kA(2MW급)	단위용량(1MW or 2MW) 단위 1대씩 설치
	왜형률	THD 5% 이하(개별 3%이하) TDD 5%이하	IEEE 519
	효율	90%이상	AC/DC변환/DC/AC변환

그림 6. 한전 주파수조정용 PCS 사양서

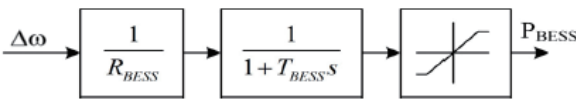


그림 7. 주파수 추종운전 BESS 모델

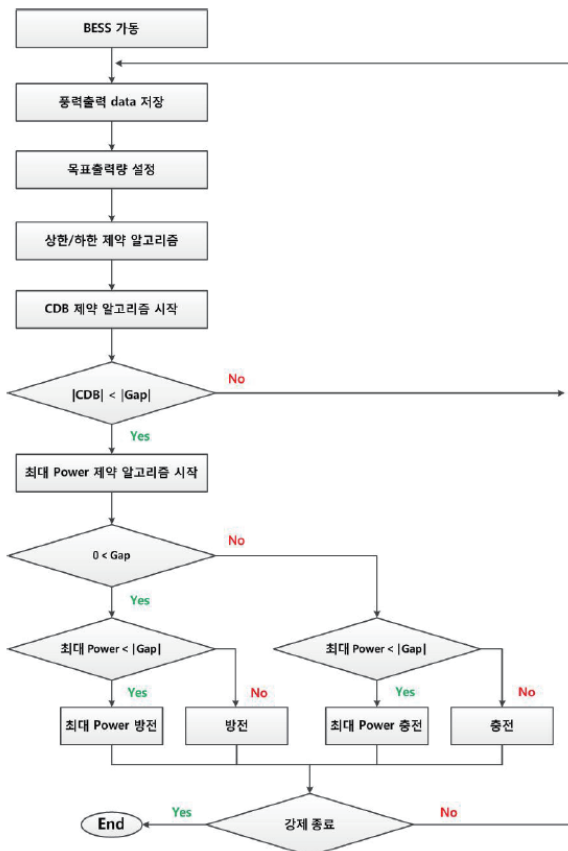


그림 8. CDB 제약 알고리즘과 최대전력 제약 알고리즘

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1)$$

여기서, Δf : 주파수 변동율(60Hz 기준)

ΔP : 발전기 출력변동(정격출력 기준)

3-2. 신재생 출력 안정용

신재생에너지 발전의 경우 통제가 불가능한 발전원으로 시간에 따른 발전 출력의 변동성이 매우 높아 전력 계통의 불안정성이 증대되므로, Smoothing 제어 및 정격 출력 제어로 불규칙한 신재생에너지 출력을 안정화가 가능하다. ESS를 설치하므로 인해 풍력, 태양광발전 출력 변동이 제어 가능하다. 방전시간은 통상 0.5~2시간이며 저장 후 판매단가 모니터링 통한 발전 전력 판매가 효율적이다.

특히, 풍력 발전이 출력 변동이 심한데 이에 대한 출력 안정 알고리즘으로 CDB 알고리즘을 살펴보면, CDB(Control Dead Band)를 나타내고, Gap은 목표 출력량에서 현재 발전하고 있는 풍력 발전량의 차이를 나타낸 것이다. CDB 제약 알고리즘에서 CDB 절대값이 Gap 절대값보다 작다는 것은 현재의 풍력 발전량을 출력으로 내보내도록 운영하는 알고리즘이다. CDB 제약조건을 확인한 후, 최대전력 제약조건을 고려하여 알고리즘을 진행한다. 아래 그림과 같이 최대 전력보다 절대값 Gap이 작으면 최대전력으로 충·방전을 하는 운영 알고리즘이다.

3-3. 수요관리용

전기요금이 낮은 시간에 충전, 높은 시간에 방전하는 거래를 통해 이익 확보 가능하다. 전력 단가가 높은 Peak time을 이용하여 계통 전력예비율을 확보 가능하므로 새로운 발전소의 추가 건설 등의 대규모 투자에 대한 대안으로 활용 가능하다. 한전의 다양한 수요관리 요금제도를 활용하여 수익을 창출할 수 있다.

ESS가 수요관리 기능을 하기 위해서는 Peak Cut(Load Leveling) 기능이 있어야 한다.

Peak Cut 동작은 정해진 시간에 설정된 부하이상 한전 전력을 사용할 경우 배터리에 저장된 에너지를 계통으로 방전하는 동작이다. 이 때, 사용 시간, Peak Cut 동작 조건인 한전 사용량, ESS 계통 연계 전력 설정값을 통해서 수요관리가 가능하다.

는 의미이다. 즉, 60Hz 기준으로 주파수 변동이 1.8~3.6Hz가 일어나야 출력의 100%가 변동된다.

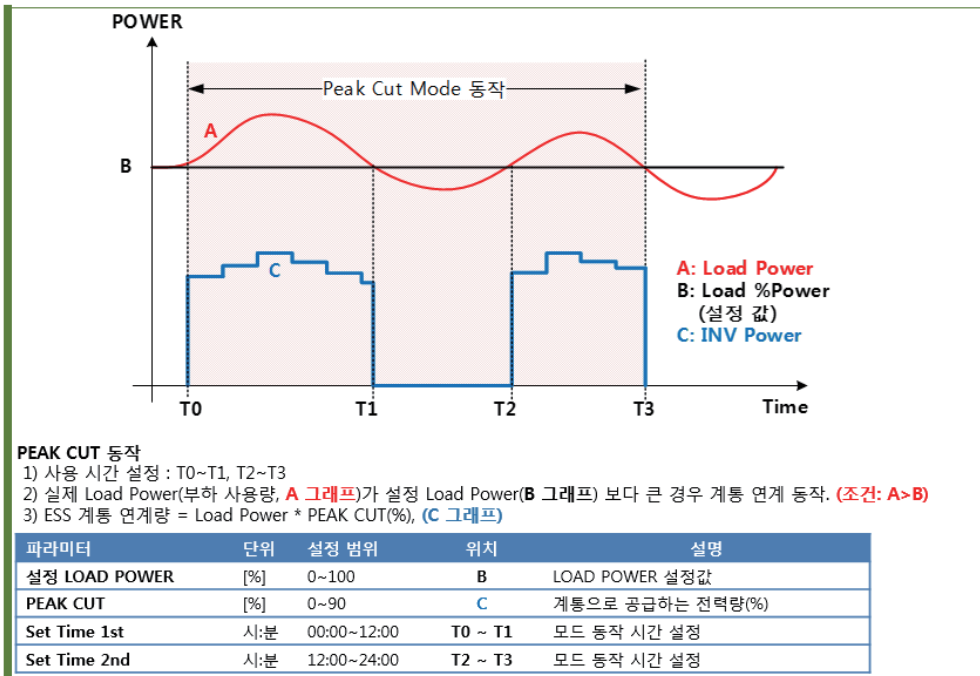
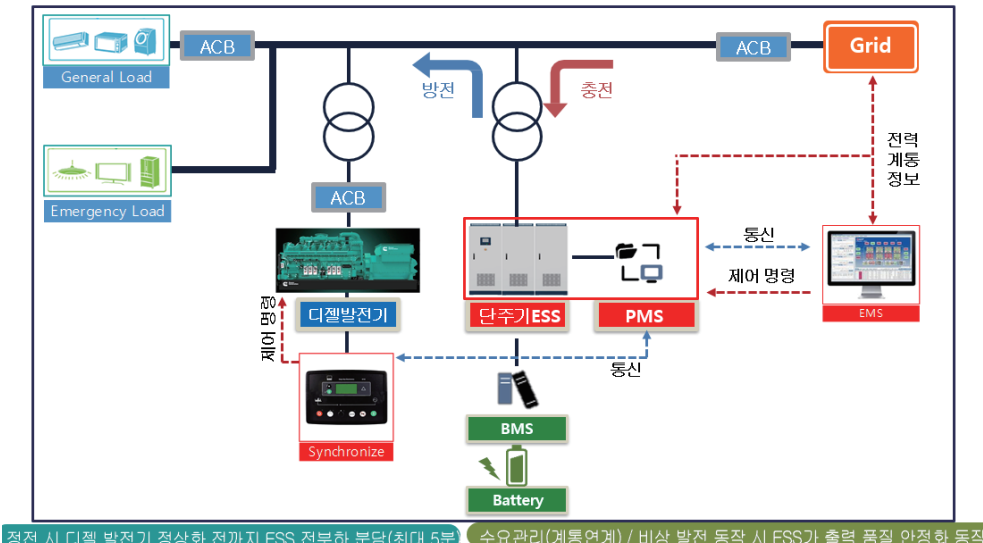


그림 9. Peak Cut 동작



ESS의 배터리 용량을 최소화 디젤 + ESS 구축 시 1[MW] 비용 3억원

그림 10. 비상발전기 연동 무정전 시스템 구성도

3-4. 디젤발전기 연동 무정전 시스템용

기존 비상발전기 무정전시스템은 예고 정전 시에는 무정전 투입이 가능했지만, 갑작스럽게 전원 공급이 끊길 경우 비상발전기 가동과 전원 투입에 필요한 시간 동안 정전이 불가피하다. ESS를 비상전원으로 활용할 경우 이 같은 문제는 해결되지만 부하를 감당하기 위해 배터리 용량을 과도하게 높아진다.

비상발전기·ESS 연계 시스템을 통해서 정전 문제와 비용 문제를 동시에 해결할 수 있다. ESS는 비상발전기 가동 전 짧은 시간 동안 부하를 감당하며, 발전기가 가동되면 ESS는 부하를 발전기에 넘겨주면 된다. 비상발전기는 지속적으로 전력을 공급하다 한전 전원이 살아나면 다시 한전으로 부하를 절체하면 된다.

이와 같은 시스템을 구성하기 위해서는 몇 가지 기술들을 요구한다. 디젤발전기 병렬 운전, Seamless 기능, 용량 증설에 따른 autonomous control 이다. 디젤발전기 병렬 운전의 경우 이종의 두 시스템의 응답 속응성이 다르므로 출력 전압이 불안정해지거나 시스템 fault와 같은 상황이 발생할 수 있으므로 속응성이 느린 디젤발전기 출력 특성을 고려한 ESS용

PCS 제어 기술이 요구된다. autonomous control의 경우 무정전 시스템의 전체 용량이 커질 경우 하나의 PCS로 시스템 구성이 불가능하게 된다. 이 때 2대 이상의 PCS를 구성하게 되는데 독립운전의 경우 급작스런 부하 변동 시 다수 PCS간의 부하 분담이 가장 큰 이슈가 된다. 가장 일반적인 방법은 Master-Slave 형태로 통신을 통해서 전력 제어를 하는 방법

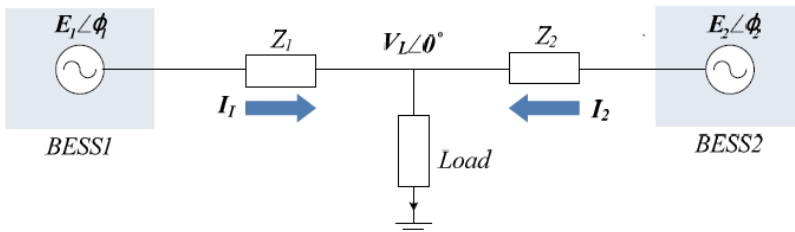


그림 11. 선로 임피던스를 고려한 병렬 운전 시 ESS 등가회로

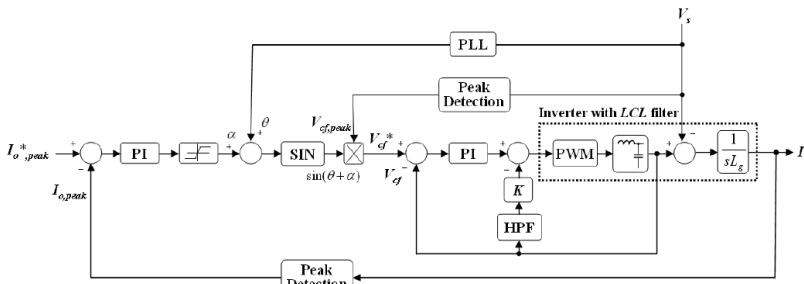


그림 12. 간접전류제어방식의 제어시스템 블록도

인데 이는 과도 상태에서 전력 분담이 되지 않고 부하변동이 큰 경우 시스템이 fault가 되는 경우가 발생한다. 이러한 과도기 특성을 보완하기 위해서 출력전압과 위상을 가지고 droop control 형태로 PCS의 자율제어에 의해서 전력 부하를 분담하는 autonomous control이 필요하다. 마지막으로 seamless 제어는 한전 정전을 인식하고 standby, 충전, 방전 어떤 운전 모드라도 바로 독립운전으로 전환하여 부하에 정전 없이 전력을 공급하는 제어 기술이다.

일반적인 드롭 제어는 인버터에서 출력되는 전압의 위상과 크기가 유·무효전력제어로 가능하다. 아래 그림은 선로 임피던스를 고려한 병렬 운전되는 ESS의 등가회로이다. 선로의 임피던스가 고려되면 병렬 운전되는 각 ESS 사이에는 전압차가 발생한다. 이를 동기 회전 좌표 변환을 거쳐 수식적으로 알아보면 병렬 운전되는 2대의 인버터에서 각각의 P-ω 드롭 제어 수식은 (2), (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\omega = k_p^* - k_p P \quad (2)$$

$$E = E^* - k_q Q \quad (3)$$

E는 인버터 출력전압의 크기, ω는 인버터 출력전압의 주파수를 나타낸다. ω*와 E*는 각각 무부하 상태에서의 PCC(Point of Common Connection) 단 전압의 주파수와 크기이다. 그리고 k_p와 k_q는 주파수와 전압 드롭 계수이다.


무정전 시스템의 경우 정전이 발생 하더라도 비상 주요 부하에 원활한 전력 공급이 이루어져야 한다. 인버터는 전류원모드에서 전압원 동작모드로 전환해야 되는데 이 과도 상태에서 sag나 swell 또는 순시 정전 등과 같은 심각한 과도상태가 발생할 수 있다.

기존의 전류제어방식의 토폴로지에서는 인버터에 L형 교류필터를 접속하여 전류제어를 하고, 전류리플성분이 계통으로 유입되는 것을 억제하기 위하여 CL형 교류필터를 사용한다. 그림 12의 간접전류제어 방식의 토폴로지는 LC형 교류필터를 기본으로 동작하여 필터 커패시터 양단의 전압을 제어함으

로써, 계통쪽의 Line 인덕터 L_g 양단에 걸리는 전압을 제어하여 간접적으로 계통에 주입되는 전류를 제어하는 방식이다.

4. 결 론

에너지 저장 기술은 기존 전력시장의 배전 안정성, 신재생 에너지의 공급불균형해결 및 전력 피크 평준화에 크게 기여하고 있으며 선진국 주도하에 시장이 형성되고 있다. 이에 국내에서도 태양광, 풍력 REC 적용, 디젤-신재생에너지-ESS를 적용한 다양한 마이크로그리드 솔루션, 그리고 다양한 전기요금 제도를 활용한 수요관리를 통한 수익 창출 등을 진행하고 있다. 이와 관련된 다양한 PCS 기술들의 개발이 필요하며, 또한 ESS는 정보통신기술과 융합하여 기존 전력시장에 신시장 창출을 하고 있다. 이를 위해 정부차원의 공공/민간 시범설치사업자원을 통해 기술 R&D 투자, 표준화 정책 등 인프라 구축에 투자와 관심이 많이 이루어지고 있다.

현재까지는 혁신기술의 경제성 미확보와 대규모 용량설비에 대한 투자 불확실성은 존재하지만, 앞으로 PCS의 수명을 배터리 수명(7~10년 이상)과 동일하게 충족시키면서, 소모품의 비용과 동작 비용을 줄일 수 있는 경제성을 확보가 필요하며 에너지저장기술에 대한 관심과 활발한 기술개발은 꾸준히 요구된다. 

참고문헌

- [1] 한국방송통신전파진흥원, “스마트그리드 시대의 에너지 저장기술 동향 분석”, 방송통신기술 이슈&전망, 2014 제64호
- [2] 조성민, 장병훈, 운용범, 전용재, 김철우, “주파수추종 운전 적용을 위한 BESS의 운용 방법 및 효과” 전기학화 논문지 2015년 1월
- [3] 류기환, “풍력발전기 출력 안정화를 위한 BESS 운영에 관한 연구”, 숭실대학교 대학원 석사 학위 논문, 2012
- [4] 정아진, “에너지저장시스템을 위한 무순단 절체기능을 갖는 인버터의 병렬운전” 서울과학기술대학교 일반대학원 석사 학위 논문, 2014
- [5] 신은석, 김현준, 양원모, 한병문, “BESS의 병렬운전 시 발생하는 순환 전류 저감을 위한 드롭 제어 기법”, 전기학회 논문지, 2015년 5월
- [6] 유태식, 배영상, 최세완, 김효성, “연속적인 운전모드의 전환을 위한 계통연계형 인버터의 간접전류 제어기법” 전력전자학술대회, 2005
- [7] 강병관, 이충우, 김희중, 정용호 “ESS용 PCS의 현황과 전망”, 기획시리즈 제63권 11호, 2014,
- [8] (주)효성, “ESS, The Future Energy Solution”, 2013. 11월
- [9] 하일곤, “에너지저장시스템 시장 개화 시기 빨라지고 있다.” LG Business Insight 2014, 05
- [9] 김재홍, “Autonomous AC 마이크로그리드에서의 배터리 인버터 제어”, 한국생산기술연구원-기술세미나, 2015
- [10] 황우현, “대용량 전력저장시스템 기술실증 현황 및 향후전망”, kepcO SG사업처, 2012. 07
- [11] 김응상, “ESS를 활용한 안정화 기술 방안” 한국전기연구원 스마트배전연구센터, 2014, 10
- [12] 한국전기공업협동조합, “특집 글로벌 ESS 추진 동향 및 전망”, 전기정보 2015, 11