



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

신재생에너지원과 BESS가 연계된 DC

배전 시스템에서 전압 제어를 위한

스케줄링 및 실시간 제어

A Scheduling and Real-time Control

for Voltage Control in DC Distribution System

Including Renewable Energy Sources and BESS

2013 年 2 月

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

신 다 영

신재생에너지원과 BESS가 연계된 DC 배전
시스템에서 전압 제어를 위한 스케줄링 및
실시간 제어

A Scheduling and Real-time Control for Voltage Control in
DC Distribution System Including Renewable Energy Sources and BESS

지도교수 문승일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2013년 2월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

신다영

신다영의 공학석사 학위논문을 인준함.

2013년 2월

위원장 박정근 박정근
부위원장 문승일 Man Hee
위원 윤용태 Yongtae

국 문 초 록

기존의 배전 시스템과 달리 미래의 배전 시스템에는 다양한 신재생에너지원, 분산전원, 전기자동차와 에너지 저장시스템 등이 연계될 것으로 예상된다. 하지만 배전망에 연계되는 신재생에너지원, 분산전원 및 에너지 저장시스템의 대부분은 직류전원을 생산하고 전력을 소비하는 부하도 직류인데 반해, 기존의 전력시스템이 교류전원을 공급함에 따라 불필요한 전력변환과정이 증가하고 있는 실정이다. 이와 같이 증가하는 직류전원과 직류 부하를 직접 연계해 에너지 효율을 향상시키는 DC 배전 시스템에 대한 연구의 중요성이 높아지고 있다. 이에 본 논문에서는 배전계통의 모든 모선의 전압을 규정 범위 내에서 유지하여 시스템의 안정도를 증가시키면서 계통의 손실을 최소화하는 것을 목표로 SLP(Sequential Linear Programming) 알고리즘을 이용하여, 계통 연계 컨버터(Grid Connected Converter)의 출력 전압과 BESS(Battery Energy Storage System)의 충·방전을 스케줄링 하는 기법을 제안하였다. 또한 부하 예측 오차나 신재생에너지원 발전량 예측 오차로 인해 전압이 규정 범위 내를 벗어나면 전압민감도 기반 가변 드롭 제어(Variable Droop Based on Voltage Sensitivity)기법을 제안하여 전압을 실시간으로 제어하는 방안도 제안하였다. 아울러 본 논문에서 모의 계통을 구성하고, 제안된 스케줄링 기법 및 실시간 전압 제어 방식을 사례 연구를 통해 검증하였다.

주요어 : DC 배전 시스템, BESS 충·방전 스케줄링, 손실 최소화, 전압민감도 기반 가변 드롭(Droop) 제어

학 번 : 2011-20867

목 차

국문 초록.....	i
목차.....	ii
그림목차.....	iv
표 목차.....	v
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 연구 내용.....	1
1.2 논문의 구성 및 개요.....	4
제 2 장 계통 손실 최소화를 위한 스케줄링.....	5
2.1 계통손실최소화를 위한 스케줄링의 타당성.....	5
2.2 문제의 정식화.....	6
2.3 SLP기법을 이용한 계통 전압 컨버터 출력 및 BESS의 충·방전 스케줄링	
	11
제 3 장 실시간 전압 제어	19
3.1 DC 배전 시스템에서 실시간 전압 제어 전략.....	20
3.2 계통 연계 컨버터의 실시간 제어 기법.....	22
3.3 BESS의 실시간 제어 기법.....	22
3.3.1 기존의 드롭 제어 기법.....	22

3.3.2 전압 민감도 기반 가변 드롭 제어 기법.....	25
제 4 장 사례 연구.....	29
4.1 모의 계통의 구성.....	29
4.2 스케줄링의 사례 연구.....	33
4.3 실시간 전압 제어의 사례 연구.....	37
제 5 장 결론.....	43
Abstract.....	45
참고문헌.....	46
부록.....	49

그림 목차

그림 1 DC 배전 시스템.....	1
그림 2 DC 배전 시스템의 스케줄링 및 실시간 제어 시간 영역.....	3
그림 3 BESS의 SOC와 출력 제어 전략.....	7
그림 4 스케줄링 시작과 종료 시 SOC 레벨 유지.....	8
그림 5 SLP 기법을 통한 스케줄링 순서도.....	18
그림 6 계통 상황 변화 시 실시간 제어.....	19
그림 7 계통 연계 컨버터의 실시간 전압 제어 블록 다이어그램.....	22
그림 8 고정 드롭 제어 기법.....	23
그림 9 고정 드롭 제어 기법의 블록 다이어그램.....	23
그림 10 가변 드롭 제어 기법.....	24
그림 11 가변 드롭 제어 기법의 블록 다이어그램.....	25
그림 12 전압민감도 기반 드롭 제어 기법.....	27
그림 13 전압민감도 기반 드롭 제어 기법 블록 다이어그램.....	28
그림 14 모의 계통.....	30
그림 15 시간에 따른 부하 변동 추이.....	31
그림 16 시간에 따른 PV 변동 추이.....	32
그림 17 계통 손실 패턴.....	33
그림 18 계통 연계 컨버터의 출력 전압 변화.....	34
그림 19 최적화 후 모선의 전압.....	35
그림 20 BESS의 출력.....	36
그림 21 BESS의 SOC.....	36

그림 22 실시간 전압 제어 운영 제어 전략.....	39
그림 23 계통의 전압 변화.....	40
그림 24 계통의 최저 전압.....	40
그림 25 BESS1의 출력 변화.....	41
그림 26 BESS2의 출력 변화.....	41
그림 27 여러 가지 드롭 제어 기법의 BESS 출력 비교.....	42

표 목차

표 1 모의 계통 정보.....	30
표 2 시간에 따른 부하 예측량.....	31
표 3 시간에 따른 PV 발전 예측량.....	32
표 4 감소된 손실.....	33
표 5 스케줄링 결과.....	37
표 6 재스케줄링 결과.....	38
표 7 기존의 드롭 기법과 제안한 기법의 결과 비교.....	42

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 연구 내용

최근 에너지 소비 증가에 따른 에너지 효율 개선 방안에 대한 필요성이 높아지는 가운데 효율적인 에너지 공급을 위해 기존 전력 시스템의 변화가 요구되고 있다. 기존의 전력 시스템의 비효율성과, 전력 손실은 이산화탄소 발생을 증대시키고 있어 배전 시스템에서 손실을 줄이기 위한 노력은 환경에 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 예측 된다 [1]. 미래에는 태양광, 풍력 등 신재생에너지원이 주요 에너지원으로 부각될 것이고 대용량 에너지저장장치가 상용화될 것으로 전망되고 있는데, 신재생 에너지원, 분산전원 및 에너지 저장시스템의 대부분은 DC 전원을 생산하여 공급하고 있다 [2]. 또한 DC 부하인 전기자동차도 증가할 것으로 예상된다. 하지만 기존의 전력시스템이 교류 전원을 공급함에 따라 불필요한 전력변환과정이 증가하고 있는 실정이다. 따라서 전력 시스템의 효율 증가를 위해 그림 1과 같은 DC 배전 시스템에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

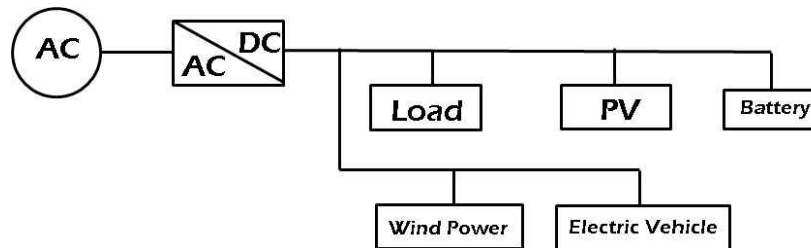


그림 1. DC 배전 시스템

DC 배전 시스템은 기존의 AC 배전 시스템과 비교하여 많은 장점을 가지고 있다. [1, 3]에서는 AC 시스템과 비교하여 DC 배전 시스템의 효율성을 연구하여 DC 배전 시스템의 효율이 더 높은 것을 검증하였다. DC 배전 시스템은 DC 출력 전원과 부하 사이의 인버터 변환 손실이 감소하여 AC 배전 시스템보다 효율이 증대된다. 또한 계통에 블랙아웃이나 정전이 일어났을 경우 DC Capacitor와 에너지 저장 시스템에 저장된 에너지로 DC 배전 시스템의 모션 전압은 영향을 받지 않으므로 분산전원과 전기자동차 등이 받는 손상은 줄어든다 [4].

DC 배전 시스템에서 계통의 전압은 전송 전력, 손실 등 시스템의 특성을 결정하는 주요 파라미터이다. 분산전원 및 DC 부하의 증가로 좀 더 큰 규모의 DC 배전 시스템의 필요성이 높아지고 이에 따라 선로의 길이 또는 부하 규모가 증가할 경우 이에 따른 계통의 전압 안정도 분석은 필수적이다. 이전 논문들은 1 모선을 모델로 한 DC 마이크로그리드의 전압 혹은 전력 제어에 대해 다루었다 [5-9]. 특히 주로 비통신 기반의 배전 계통에서 전압 signaling 기법을 통해 실시간으로 전압을 제어하는 방안을 제안하였다. 그러나 DC 마이크로그리드보다 더 큰 규모의 통신 기반 DC 배전시스템의 운영 및 제어에 관한 연구는 미진한 실정이며, 이 경우 대상 계통의 규모가 확장됨에 따라 계통 운영 및 제어 방법을 연구함에 있어서 기존 연구와는 다른 관점의 접근 방법론이 요구된다. [10]에서는 BESS를 단기적으로 스케줄링함으로써 경제적 운영과 함께 효과적으로 전력 시스템을 제어할 수 있었다. 따라서 기존의 논문이 비통신 기반의 실시간 전압 제어를 다룬 반면 본 논문에서는 스케줄링을 통한 경제적 운영 및 실시간 전압 제어 운영 방안을 제안하였다.

본 연구에서 대상으로 한 DC 배전 시스템은 상위 계통과 계통 연계컨버터를 통해 연계되어 있으며 태양광 시스템과 같은 신재생 에너지원과 BESS가 연계되어 있는 배전 시스템이다. 태양광 시스템과 BESS를 함께 운영하면 추가적인 에너지원을 제공할 뿐만 아니라 신뢰성을 높여 경제적 운영을 가능하게 해준다 [11]. 이 시

시스템을 대상으로 DC 배전 시스템에서 손실최소화를 목적으로 계통 연계 컨버터의 출력 전압 및 BESS의 충·방전을 스케줄링하여 DC 배전 시스템의 전압을 적정 수준으로 유지하고 전 스케줄링 구간에 대해 BESS의 SOC(State of Charge) 및 출력을 적정 범위로 유지하는 방안을 수립하였다. 또한 부하 예측과 신재생 발전량 예측 오차로 인해 발생하는 전압 변동량 및 전력을 실시간으로 모니터링하고 전압이 허용 범위를 벗어난 경우 전압 위배 여부를 감지하고 실시간 전압 제어를 수행하였다. 이 때 계통 연계 컨버터와 BESS의 협조 제어 전략으로 계통의 전압을 제어하였다. 이전의 [12]에서는 분산전원의 출력 여유도를 고려하여 드롭 계수를 결정하는 가변 드롭 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 여기에 전압 민감도를 추가적으로 고려하여 전압 민감도에 비례하여 BESS의 출력 변동을 발생시킴으로서 적은 출력으로 효과적으로 전압 제어를 수행하기 위한 전압 민감도 기반 가변 드롭 기법을 제안하였다. 그림 2는 시간에 따라 본 논문에서 제안한 스케줄링 기법과 실시간 전압 제어 기법이 운영되는 것을 보여주고 있다.

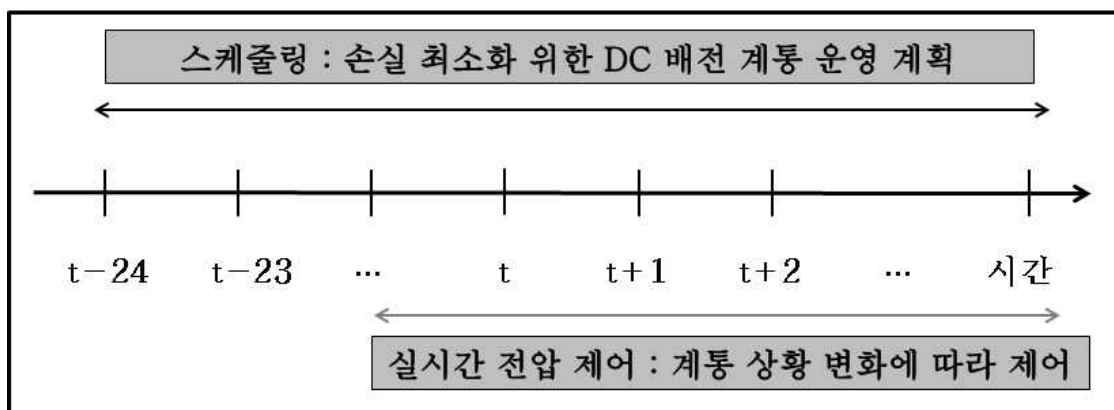


그림 2. DC 배전 시스템의 스케줄링 및 실시간 제어 시간 영역

마지막으로 본 논문에서 제안한 스케줄링 기법 및 실시간 전압 제어 기법을 검증하기 위해 모의 계통을 구성하여 사례 연구를 진행하였다. 스케줄링을 통해 스케줄링을 하기 전보다 손실이 감소되는 효과를 검증할 수 있었고 전압 및 BESS의 출력 또한 계통 적정 범위 내를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 또 제안된 전압 민감도 기반 가변 드롭 기법이 기존의 고정 드롭 기법이나 가변 드롭 기법보다 더 적은 출력으로 전압 제어를 수행하는 능력이 더 뛰어나다는 점을 확인하여 본 논문의 제안이 타당함을 검증하였다.

1.2 논문의 구성 및 개요

본 논문은 손실 최소화를 위한 계통 연계 컨버터의 출력 전압과 BESS의 충·방전 스케줄링을 제안하였다. 또한 DC 배전 시스템의 안정적인 운영을 위해 부하의 변화나 외란으로 인한 전압 변동에 따라 실시간으로 전압을 제어하는 방안 또한 제안하였다.

제 1장에서는 본 논문의 연구 배경 및 연구 내용, 그리고 논문 구성과 개요에 대해 살펴보았다.

제 2장에서는 SLP를 이용하여 손실 최소화를 목적으로 BESS의 충·방전 스케줄링에 대해 다루었다.

제 3장에서는 전압민감도 기반 드롭 제어를 통해 실시간으로 전압을 제어하는 방안을 제안하였다.

제 4장에서는 위의 제안한 방법을 검증하기 위해 다양한 조건에서 사례연구를 하였고, 결과에 대해 논의하였다.

제 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 발전 방향에 대해 기술하였다.

제 2 장 계통손실최소화를 위한

BESS의 충·방전 스케줄링

2.1 계통손실최소화를 위한 BESS의 충·방전 스케줄링의 타당성

배전 계통의 부하와 신재생 에너지원의 발전량을 하루 전에 예측하여 이를 바탕으로 BESS의 충·방전과 계통 연계 컨버터의 전압을 스케줄링 함으로써, 손실을 최소화하고 계통의 전압을 제어하기 위해서 필요한 조건들은 다음과 같다.

- 하루 전 부하 예측과 신재생 에너지원의 발전 예측은 상당히 정확한 범위 내에서 이루어진다.
- 계통에는 계통 연계점(PCC, Point of Common Coupling)에 계통 연계 컨버터가 1기 설치되어 있고, 설치된 BESS의 수와 BESS의 위치에 상관없이 모든 경우에 대해 스케줄링 기법을 적용할 수 있다.
- 계통 선로 정보, 각 BESS의 정격 출력, 용량은 미리 알고 있다고 가정한다.
- BESS 내부에서 일어나는 손실은 0이라고 가정한다.

실제 계통의 부하는 시간에 따라 불규칙적으로 변동하는 특성을 가지고 있다. 하지만 부하의 변동에 크게 영향을 미치는 요소들 중의 하나는 기온 및 습도와 같은 날씨 요소이기 때문에, 특정 지역의 부하 변동은 매년 계절별로 비슷한 패턴을 보인다. 또한 부하가 대부분 산업용 또는 가정용 부하일 경우, 거의 비슷한 부하 패턴을 갖게 되어 현재 대부분의 계통 운영자들은 평균적으로 약 2~3% 내의 오차 범위 내에서 부하를 정확히 예측할 수 있다 [13].

계통에는 AC 계통과 DC 배전 시스템의 계통 연계점에 계통 연계 컨버터가 1기 설치되어 있어 계통 연계 컨버터를 통해 DC 배전 계통의 전체적인 전압 제어가 가능하다 [14]. BESS의 위치와 수에 대해서는 따로 제약을 두지 않아 위치와 수에 상관없이 스케줄링하는 방법을 제안하였다.

또한 계통 운영자가 계통 선로 정보, 각 BESS의 정격 출력, 용량은 미리 알고 있다고 가정하여 스케줄링을 할 때 이 정보들을 이용할 수 있다고 가정한다.

마지막으로 BESS가 연계되어서 출력을 낼 때 효율은 최대 97.8%로 매우 높으므로 BESS가 계통과 연계되었을 때 손실은 0이라고 가정한다 [15].

2.2 문제의 정식화

본 논문에서는 BESS의 충·방전과 계통 연계 컨버터의 출력 전압을 스케줄링하여 손실을 최소화하는 것을 목표로 하였다. 먼저 스케줄링을 위한 대상 기기로는 계통연계컨버터와 BESS를 선정하였다. 일반 부하와 같은 경우에는 수요 관리와 같은 특수한 상황을 제외하면 일반적으로 제어가 불가능하다. 또한 풍력, 태양광과 같은 신재생에너지원의 경우에도 일반 부하와 마찬가지로 제어가 불가능하며, 임의의 출력을 발전하기 때문에 음의 전력을 소비하는 부하로 간주할 수 있다 [16]. 계통 연계 컨버터와 같은 경우에는 출력 전압을 제어하여 계통의 전체적인 전압을 제어할 수 있고 이를 통해 손실 감소에 기여할 수 있으므로 스케줄링 대상 기기로 적합하다. 계통 연계 컨버터와 더불어 분산전원도 출력 제어를 통해 계통의 전압 제어 및 손실 감소에 기여할 수 있어 스케줄링 대상 기기로 적합하다. 여러 분산전원 중 BESS는 에너지 제약조건에 의해 배터리의 용량에 따라 제어 가능한 시간과 SOC가 제약을 받을 수 있다는 단점이 있다. 하지만 충·방전이 모두 가능하여 일반 분산전원에 비해 제어 범위가 넓어 스케줄링할 때 유리하다. 따라서 스케줄링 대상

기기로 계통 연계 컨버터와 제어 범위가 넓은 BESS를 선정하였다.

손실 최소화를 목적으로 하는 본 스케줄링은 계통 연계 컨버터의 출력 전압과 BESS의 출력을 정해진 주기에 따라 미리 스케줄링하여 수행된다. 이 때 가장 고려해야 할 점은 BESS의 출력과 SOC는 그 한계가 정해져 있기 때문에 BESS의 출력 범위와 SOC 범위 내에서 스케줄링을 해야 한다는 점이다. 또한 스케줄링 이후 실시간 운영 시, 부하 예측이나 신재생에너지원 발전량 예측 오차에 따른 전압 문제로 인해 BESS가 전압제어에 참여해야 할 경우가 발생할 수 있으므로 그림 3과 같이 실시간 전압 제어 운영에 대비해서 BESS의 출력과 SOC의 여유를 미리 확보하여 스케줄링 해야 한다. 이것을 제약조건으로 하여 스케줄링을 한다면 BESS의 출력 및 SOC를 적정 범위 내로 유지할 수 있고 실시간 전압제어에 대비한 예비력을 확보할 수 있다. 또한 전 구간에 대한 스케줄링을 완료한 후, 그림 4와 같이 BESS의 SOC는 초기상태의 SOC와 같은 레벨을 유지해야 한다. 이를 통해 다음 스케줄링 구간에서 BESS의 SOC 여유도 문제로 인해 제어 능력이 제한되는 경우를 방지할 수 있다. 이렇게 BESS의 출력 및 SOC를 실시간 전압 제어에 대비한 예비력도 고려한 범위 내로 유지하고 초기 SOC와 전 구간에 대한 스케줄링 후 SOC가 같은 레벨을 유지하는 것을 제약 조건으로 하여 스케줄링 함으로써 계통을 안정하게 유지하면서 BESS의 SOC를 적정범위내로 유지할 수 있다.

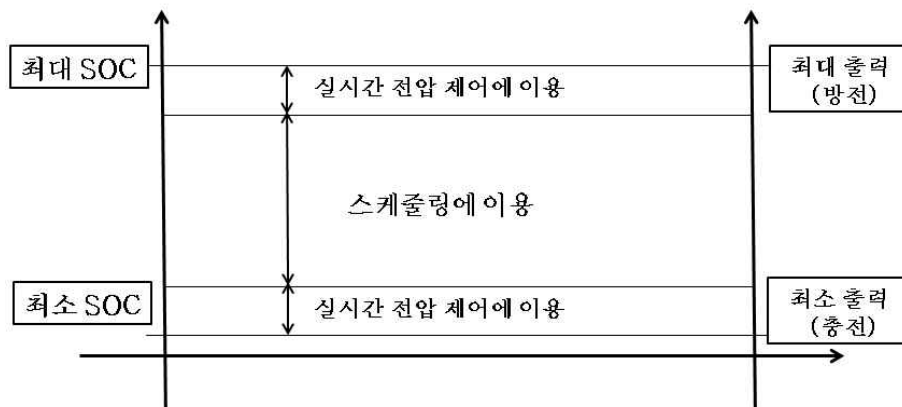


그림 3. BESS의 SOC와 출력 제어 전략

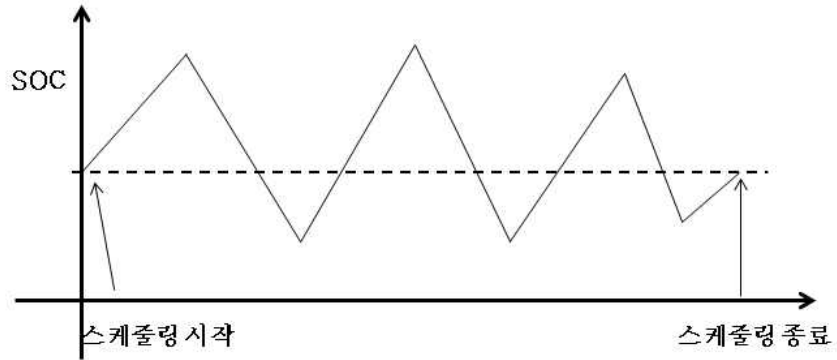


그림 4. 스케줄링 시작과 종료 시 SOC 레벨 유지

스케줄링을 위한 정식화를 위해 목적함수와 변수 및 제약 조건을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 스케줄링의 목적함수는 식 (1)과 같다. 손실을 최소화하는 목적함수는 스케줄링에 의해 운전점 변화 발생 시 계통의 손실에너지는 계통의 초기 손실과 운전점 변화에 따른 손실의 변화의 합에 각 시구간의 길이를 곱한 것으로 표현할 수 있고 이것은 초기 손실과 각 시구간의 길이가 상수이므로 목적함수는 손실 변화를 최소화하는 문제로 등가화가 가능하다.

$$\min P_{loss} \cdot T = \min (P_{loss,0} + \Delta P_{loss}) \cdot T = \min \Delta P_{loss} \cdot T = \min \Delta P_{loss}$$

$P_{loss} \cdot T$: 스케줄링에 의해 운전점 변화 발생시 계통의 손실 에너지

$P_{loss,0}$: 계통의 초기 손실(상수) (1)

ΔP_{loss} : 운전점 변화에 따른 손실 변화

T : 각 시구간의 길이

본 최적 스케줄링의 제어 대상 변수는 각각의 시구간에 대한 BESS의 충·방전 출력, 계통연계컨버터의 출력 전압 정보를 포함한다. 제어 변수 벡터 x 의 정의는 식 (2)와 같다.

$$x = \left[\Delta P_{BESS,1,1} \cdots \Delta P_{BESS,N_T,1} \cdots \Delta P_{BESS,N_T,N_B} \Delta V_{GCC,1} \cdots \Delta V_{GCC,N_T} \right]^T$$

$\Delta P_{BESS,i,j}$: i번째 시구간에서 j번째 BESS의 출력 변화 (2)
 $\Delta V_{GCC,i}$: i번째 계통 연계 컨버터의 전압 출력 변화

또한 제약 조건에는 부등식 제약 조건과 등식 제약 조건이 있다. 부등식 제약 조건에는 전압 제약 조건, BESS의 출력, SOC 제약 조건이 있다. 먼저 i번째 시구간에서 k번째 전압 제약 조건은 식 (3)과 같다. 각각의 전압은 계통의 허용 전압 최소값과 최대값 사이를 유지해야 한다.

$$V_{\min} \leq V_{k,i} \leq V_{\max}$$

$V_{k,i}$: i번째 시구간에서 k번째 모선의 전압 (3)
 V_{\min} : 계통의 허용 전압 최소값
 V_{\max} : 계통의 허용 전압 최대값

i번째 시구간에서 k번째 BESS 출력 및 SOC 제약 조건은 식 (4), 식 (5)와 같다. 각 시구간에서 각각의 BESS의 출력 및 SOC를 실시간 전압 제어 운영을 위한 margin을 고려한 범위 사이를 유지해야 한다.

$$P_{BESS,j,\min} + P_{BESS,j,\text{margin}} \leq P_{BESS,i,j} \leq P_{BESS,j,\max} - P_{BESS,j,\text{margin}}$$

$\Delta P_{BESS,i,j}$: i번째 시구간에서 j번째 BESS의 출력 변화 (4)
 $P_{BESS,j,\min}$: j번째 BESS의 최소값

$P_{BESS,j,max}$: j번째 BESS의 최대값

$P_{BESS,j,margin}$: 실시간 전압 제어를 위한 j번째 BESS의 출력margin

$$SOC_{BESS,j,min} + SOC_{BESS,j,margin} \leq SOC_{BESS,i,j,end} \leq SOC_{BESS,j,max} - SOC_{BESS,j,margin}$$

$SOC_{BESS,i,j,end}$: i번째 시구간 종료시 j번째 BESS의 SOC

$SOC_{BESS,j,min}$: j번째 BESS의 최소값 (5)

$SOC_{BESS,j,max}$: j번째 BESS의 최대값

$SOC_{BESS,j,margin}$: 실시간 전압 제어를 위한 j번째 BESS의 SOC margin

식 (6)과 같이 다음 주기의 스케줄링을 위해 한 시구간에 대한 스케줄링을 종료한 후 BESS의 SOC는 초기 상태의 SOC와 같은 레벨을 유지하여 다음 스케줄링 구간에서 BESS의 SOC 여유도 문제로 인해 제어 능력이 제한되는 경우를 방지할 수 있다.

$$T_{interval} \sum_{i=1}^{N_T} (P_{BESS,i,j} + \Delta P_{BESS,i,j}) = 0$$

$P_{BESS,i,j}$: i번째 시구간에서 j번째 BESS의 출력 (6)

$\Delta P_{BESS,i,j}$: I번째 시구간에서 j번째 BESS의 출력 변화량

$T_{interval}$: 시구간의 주기

위와 같은 목적함수와 제약조건의 해를 구하기 위해 비선형 계통을 선형화하여 최적해를 찾는 기법인 SLP를 사용하였다. 실계통에 적용을 위한 스케줄링 기법을 연구하는 것을 목표로 하기 때문에 3분에서 5분 정도의 짧은 시간 안에 스케줄링

기법이 빠르게 이루어져야 하므로 연산 속도에서 장점을 갖는 SLP를 스케줄링 기법으로 선정하였다. 일반적으로 사용되는 스케줄링 기법에는 SLP외에도 DP(Dynamic Programming), GA(Genetic Algorithm) 등이 있다. DP의 경우에는 발생할 수 있는 모든 유효한 경우를 탐색하여 최적해를 찾는 기법으로 최적해의 정확도가 매우 높으나 변수가 많아 연산 시간이 매우 오래 걸린다. 연산시간이 길기 때문에 실제 운영에 적용하기도 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서와 같이 짧은 연산시간 내에 여러 시간대의 다양한 기기들의 제어 변수들의 최적해를 찾는 문제에는 적합하지 않다. GA(Genetic Algorithm)은 자연세계의 진화과정에 기초하여 최적해를 찾는 기법으로 DP와 같이 전역해를 찾는 기법이다. DP와 비슷한 정확도를 보여주며 연산시간이 상대적으로 짧다는 장점이 있지만 Local optimization이 발생할 수 있고 DP와 마찬가지로 실제 운영에 적용하기에는 연산 시간이 길다 [17]. SLP는 DP와 GA와 비슷한 정확도를 보여주면서도 연산시간이 상대적으로 매우 짧아 본 연구에 가장 적합한 스케줄링 기법이다.

2.3 SLP를 이용한 스케줄링

SLP를 이용하여 DC 배전시스템의 손실 최소화를 위한 스케줄링을 위한 목적함수의 기본 형태는 식 (7)과 같다. 선형화된 목적함수 $f^T x$ 를 최소화시키기 위한 제어 변수를 포함하는 벡터 x 를 찾는 것이 목적이다.

$$\min f^T x = \begin{cases} A \cdot x \leq B \\ A_{eq} \cdot x = B \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (7)$$

목적함수를 SLP기법에 적용시키기 위해 BESS와 계통 연계 컨버터의 운전점 변화에 따른 손실 변화량을 선형화식으로 표현해야 한다. 위의 식 (1)과 같은 목적함수 $\min \Delta P_{loss}$ 를 BESS의 출력 변화 $\Delta P_{BESS,i,j}$ 와 계통 연계 컨버터 출력 전압 변화량 $\Delta V_{GCC,i}$ 에 대한 식으로 선형화 하는 과정이 필요하다. 손실 변화량을 선형화한 식은 식 (8)과 같다. 목적함수를 선형화시키기 위해서 손실민감도와 전압 민감도를 이용하였다.

$$\Delta P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_{BESS}} \sum_{k=1}^{N_{Bus}} \frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}} \frac{\partial V_{k,i}}{\partial P_{BESS,i,j}} \Delta P_{BESS,i,j} + \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_{Bus}} \frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}} \frac{\partial V_{k,i}}{\partial V_{GCC,i}} \Delta V_{GCC,i}$$

$\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_{BESS}} \sum_{k=1}^{N_{Bus}} \frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}} \frac{\partial V_{k,i}}{\partial P_{BESS,i,j}} \Delta P_{BESS,i,j}$: BESS의 출력 변화에 의한 손실 변화량
 $\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_{Bus}} \frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}} \frac{\partial V_{k,i}}{\partial V_{GCC,i}} \Delta V_{GCC,i}$: GCC의 출력 전압 변화에 의한 손실 변화량
 $\frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}}$: i번째 시구간에서 k번째 모션전압의 변화에 대한 계통의 손실 민감도

$\frac{\partial V_{k,j}}{\partial P_{BESS,i,j}}$: i번째 시구간에서 j번째 BESS의 출력변화에 대한 k번째 모션의 전압 민감도

$\frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}}$: I번째 시구간에서 k모션 전압변화에 대한 손실 민감도

$\frac{\partial V_{k,i}}{\partial V_{GCC,i}}$: k번째 모션 전압의 변화에 대한 계통의 손실 민감도

위의 식 (8)에서 전압에 대한 손실 민감도의 경우는 계통 해석 시 조류계산을 뉴턴 랩슨(Newton-Rapshon)방법으로 수행하는 경우 slack bus를 포함한 full-size Jacobian식의 열의 합으로 구할 수 있다. 먼저 손실은 식 (9)와 같이 표현이 되고

식 (10)과 같은 full-size Jacobian식의 열의 합으로 식 (11)과 같은 i번째 시구간에
서 k번째 전압에 대한 손실 민감도를 얻을 수 있다.

$$P_{loss,i} = \sum_{k=1}^{N_{Bss}} P_{k,i} \quad (9)$$

$P_{loss,i}$: i번째 시구간의 손실

$P_{k,i}$: i번째 시구간의 k번째 모선의 출력 전력

$$J_{full,i} = \begin{matrix} \text{걸} & \frac{\partial P_{1,i}}{\partial V_{1,i}} & \frac{\partial P_{1,i}}{\partial V_{2,i}} & \dots & \frac{\partial P_{1,i}}{\partial V_{N_{Bss},i}} & \text{걸} \\ \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial P_{2,i}}{\partial V_{1,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{2,i}}{\partial V_{N_{Bss},i}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{N_{Bss},i}}{\partial V_{1,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{N_{Bss},i}}{\partial V_{N_{Bss},i}} \end{array} \right] & & & & \left[\begin{array}{c} \text{계} \\ \text{계} \end{array} \right] \end{matrix} \quad (10)$$

$J_{full,i}$: i번째 시구간에서 full-size Jacobian

$\frac{\partial P_{n,i}}{\partial V_{k,i}}$: i번째 시구간에서 k모선 전압변화에 대한 n모선의 출력 민감도

$$\frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}} = \sum_{k=1}^{N_{Bss}} \frac{\partial P_{k,i}}{\partial V_{k,i}} \quad (11)$$

$\frac{\partial P_{loss,i}}{\partial V_{k,i}}$: i번째 시구간에서 k번째 전압에 대한 손실민감도

BESS 출력에 대한 전압 민감도의 경우, BESS의 출력을 아래와 같은 식 (12)로
표현하고 Jacobian Matrix의 역행렬을 이용해 식 (13)과 같이 표현할 수 있다. 계
통 전압 컨버터가 연계된 slack 모선은 그 외 모선의 출력에 영향을 받지 않으므
로 0이라고 한다. 또 slack 모선의 출력의 변화에 대해서도 영향을 받지 않으므로
slack 모선의 출력 변화에 대한 전압 민감도도 무시할 수 있다. 최종적으로 BESS

의 출력에 대한 전압 민감도는 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{2,i} \\ \vdots \\ \Delta P_{N_{Bs},i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{2,i}}{\partial V_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{2,i}}{\partial V_{N_{Bs},i}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{N_{Bs},i}}{\partial V_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{N_{Bs},i}}{\partial V_{N_{Bs},i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{2,i} \\ \vdots \\ \Delta V_{N_{Bs},i} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\Delta P_{k,i}$: i번째 시구간에서 k번째 모선의 출력 변화량

$\Delta V_{k,i}$: i번째 시구간에서 k번째 모선의 전압 변화량

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{2,i} \\ \vdots \\ \Delta V_{N_{Bs},i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{2,i}}{\partial P_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial V_{2,i}}{\partial P_{N_{Bs},i}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_{N_{Bs},i}}{\partial P_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial V_{N_{Bs},i}}{\partial P_{N_{Bs},i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{2,i} \\ \vdots \\ \Delta P_{N_{Bs},i} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathcal{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{2,i}}{\partial P_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial V_{2,i}}{\partial P_{N_{Bs},i}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_{N_{Bs},i}}{\partial P_{2,i}} & \dots & \dots & \frac{\partial V_{N_{Bs},i}}{\partial P_{N_{Bs},i}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

\mathcal{J}^{-1} : i번째 시구간에서 Jacobian의 역행렬

계통연계컨버터의 전압 변화에 대한 모선 전압 민감도의 근사식은 식 (15)와 같다. 이를 유도하는 과정은 부록에서 자세히 다루었다. 식 (15)의 R matrix는 식 (16)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta P_j} \simeq \frac{V_i^2}{(V_i^2 + R_{ii}P_i)V_j} \left(R_{ij} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{R_{ik}R_{kj}P_k}{V_k^2 + R_{kk}P_k} \right) \quad (15)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix}$$

$\{R_i\}$: 계통연계점(GCC)와 I번째 모선의 최단거리 상에 위치한 선로 저항의 집합 (16)

$\{R_j\}$: 계통연계점(GCC)와 j번째 모선의 최단거리 상에 위치한 선로 저항의 집합

R_{ij} : $\{R_i\}, \{R_j\}$ 두 집합의 교집합의 원소들의 합

위의 식 (9)-(16)을 통해 최종적으로 목적함수를 선형화할 수 있다. 다음으로 제약 조건인 부등식 제약 조건과 등식 제약 조건도 SLP 기법에 적용하기 위해 선형화해야 한다. 먼저 부등식 제약 조건에는 전압 제약 조건, BESS의 출력 제약 조건, BESS의 SOC 제약 조건이 있다. 전압 제약 조건은 식 (3)과 같이 적정 범위를 유지해야 한다. i번째 시구간의 k번째 모선의 전압은 식 (17)과 같이 초기값과 변화량으로 나타낼 수 있으므로 식 (18)과 같이 전압의 변화량이 적정 범위를 유지하도록 표현할 수 있다. 또한 전압의 변화량은 식 (19)와 같이 BESS 출력에 대한 전압 민감도에 BESS출력 변화량을 곱한 것과 계통연계컨버터에 대한 전압 민감도에 계통연계 컨버터의 변화량을 곱한 것으로 선형화될 수 있다.

$$V_{k,i} = V_{k,i,0} + \Delta V_{k,i}$$

$$V_{k,i,0} : i\text{번째 시구간에서 } k\text{번째 모선의 전압초기값} \quad (17)$$

$\Delta V_{k,i} : i\text{번째 시구간에서 } k\text{번째 모선의 전압 변화량}$

$$V_{\min} - V_{k,i,0} \leq \Delta V_{k,i} \leq V_{\max} - V_{k,i,0} \quad (18)$$

$$V_{\min} - V_{k,i,0} \leq \sum_{j=1}^{N_{BESS}} \frac{\partial V_{k,i}}{\partial P_{BESS,i,j}} \Delta P_{BESS,i,j} + \frac{\partial V_{k,i}}{\partial V_{GCC,i}} \Delta V_{GCC,i} \leq V_{\max} - V_{k,i,0} \quad (19)$$

BESS의 출력 제약 조건은 식 (4)와 같고 BESS의 출력은 식 (20)과 같이 각 BESS의 초기출력과 변수의 변화에 따른 출력 변화로 이루어지므로 최종 제약 조건은 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{BESS,i,j} = P_{BESS,i,j,0} + \Delta P_{BESS,i,j}$$

$$P_{BESS,i,j,0} : i\text{번째 시구간에서 } j\text{번째 BESS의 초기 출력} \quad (20)$$

$\Delta P_{BESS,i,j} : i\text{번째 시구간에서 } j\text{번째 BESS의 출력 변화량}$

$$P_{BESS,j,\min} + P_{BESS,j,\text{margin}} - P_{BESS,i,j,0} \leq \Delta P_{BESS,i,j} \leq P_{BESS,j,\max} - P_{BESS,j,\text{margin}} - P_{BESS,i,j,0} \quad (2.21)$$

BESS의 SOC 제약조건은 식 (5)와 같다. 식 (22)와 같이 i 번째 시구간 종료 시 BESS의 SOC는 i 번째 시구간 초기의 SOC와 그 시구간 동안의 SOC 변화로 이루어진다. 식 (5)와 식 (22)로 인해 식 (23)과 같은 최종 제약 조건식을 얻을 수 있다.

$$SOC_{i,j,end} = SOC_{i,j,start} + \Delta P_{BESS,i,j} T / C_{BESS,j}$$

$SOC_{i,j,start}$: i번째 시구간에서 j번째 BESS의 초기 SOC
 $SOC_{i,j,end}$: i번째 시구간 종료시 j번째 BESS의 SOC
 $C_{BESS,j}$: j번째 BESS의 용량

$$\frac{C_{BESS,j}}{T} (SOC_{j,min} + SOC_{j,margin} - SOC_{i,j,start}) \leq \Delta P_{BESS,i,j} \leq \frac{C_{BESS,j}}{T} (SOC_{j,max} - SOC_{j,margin} - SOC_{i,j,start})$$

식 (6)과 같이 전구간의 충·방전 에너지 합은 0이 되어야 한다. BESS의 출력은 식 (24)와 같이 각 BESS의 초기 출력과 변수의 변화에 따른 출력 변화로 이루어지므로 에너지 제약조건은 다음과 같이 표현이 가능하다. 이를 통해 식 (25)과 같이 최종 제약 조건을 얻을 수 있다.

$$P_{BESS,i,j} + \Delta P_{BESS,i,j} = 0$$

$$\sum_{i=1}^{N_T} \Delta P_{BESS,i,j} T = -P_{BESS,i,j}$$

완성된 SLP formulation을 이용하여 계통 연계 컨버터의 전압 및 배터리의 충·방전 스케줄링하는 과정을 순서도록 표현하면 그림 5와 같다. 먼저 각 시구간에 따른 계통의 부하량과 신재생에너지원의 발전량에 대한 정보를 이용하여 조류계산을 통해 현재 계통 전압과 전력에 대한 정보를 얻고 민감도를 계산한다. 이를 바탕으로 식 (8)~(15)를 이용하여 LP로 정식화를 한 뒤 LP를 통해 최적의 계통 연계 컨버터 전압 변화량 및

BESS 출력 변화량을 구한다. 각 변화량이 ε 보다 작을 경우 운전점이 거의 변하지 않으므로 제어를 끝마친다. 각 변화량이 ε 보다 클 경우는 이전의 무효전력을 추가적으로 내야하므로 기존 무효전력 값에 더해준다. 이 경우 운전점이 변하기 때문에 계통의 전력, 전압, 민감도 등이 변하게 된다. 따라서 운전점이 크게 변하지 않을 때까지 반복해서 문제를 푼다.

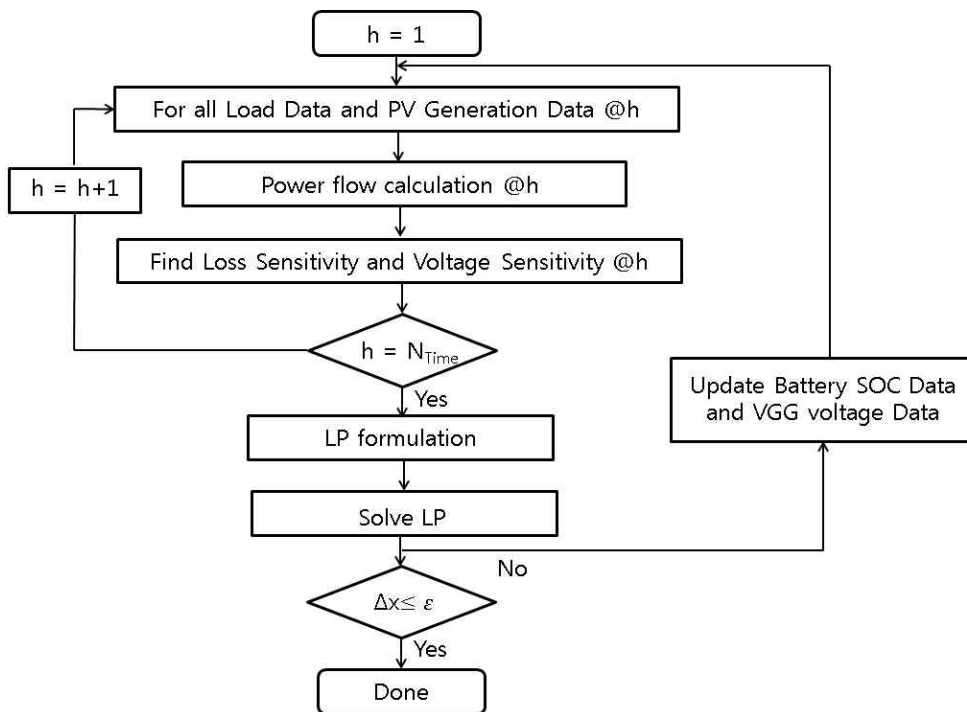


그림 5 SLP 기법을 통한 스케줄링 순서도

제 3 장 실시간 전압 제어를 위한 전압민감도 기반 가변 드롭 제어

전압 안정도는 정상상태 혹은 외란이 발생한 후에 모든 모선의 전압이 적정 전압을 유지할 수 있는 능력과 연관이 있다. 만약 외란이 발생하거나 부하가 증가하여 전압을 제어할 수 없어 지속적으로 전압이 감소한다면 계통은 전압 불안정 상태에 도달하게 될 것이다.

부하 예측이나 신재생에너지원 발전량 예측에서 오차가 발생할 수 있으므로 계획된 스케줄링과 다른 전압 차이가 생길 수 있다. 이에 따른 전압 차이를 보상해주어 안정적인 전압레벨을 유지하게 해주기 위해 계통 연계 컨버터와 BESS의 협조 제어 전략을 제안하였다. 또한 BESS의 제어 기법으로 전압민감도 기반 가변 드롭 제어 기법을 제안하였다. 전압 민감도 기반 드롭 제어 기법은 기존의 고정 드롭 제어 방식과 가변 드롭 제어 방식에 BESS의 해당 모선에 대한 전압 민감도를 기반으로 한 새로운 가변 드롭 제어 방식을 제안하여 적은 출력으로도 효과적으로 전압을 제어하는 방안이다.

스케줄링 계획대로 운영되다가 그림 6과 같이 한 시구간에 계통 상황 변화가 발생하였을 때 GCC, BESS의 실시간 전압 제어로 운영되고 그 다음 시구간에는 계통 상황을 반영하여 재 스케줄링된 계획으로 운영된다.

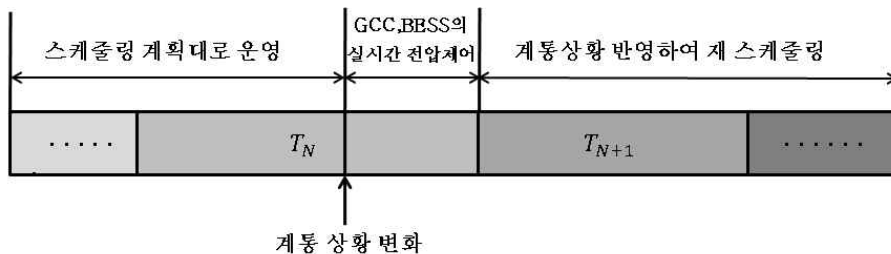


그림 6. 계통 상황 변화 시 실시간 제어

3.1 DC 배전 시스템에서 실시간 전압 제어 전략

AC 배전 계통에서의 기존 전압 제어의 경우 유효전력에 비해 무효전력에 의한 계통 전압의 민감도가 더 높기 때문에 Shunt Capacitor, Shunt Reactor와 같은 수동 소자나 SVC(Static Var Compensator), STATCOM 등의 무효전력 보상기기와 함께 계통 연계점의 탭 조정 변압기에 의해 전압 제어를 수행한다. 그러나 DC 계통의 경우 무효전력이 존재하지 않고 유효전력에 의해서 계통 전압이 결정되기 때문에 AC 배전 계통과는 다른 전압 제어 전략이 요구된다 [18].

DC 배전 계통에서 전압 제어를 수행할 수 있는 방법으로는 계통 연계 컨버터를 이용하는 방법과 분산전원의 출력을 이용한 방법이 있다. 먼저 계통 연계 컨버터는 AC 계통과 DC 계통을 연계시키기 위한 장치로서 계통에 필수적으로 설치되며 AC 배전 계통의 탭 변환 변압기와 유사하게 컨버터 2차 측의 출력 전압을 제어함으로써 계통 전압을 제어하는 것이 가능하다 [14]. 또한 계통 전압을 제어하는데 있어서 별도의 발전력을 필요로 하지 않고 스위칭 소자를 이용하기 때문에 전압 제어 범위가 연속적이고 응답 특성이 빠르다는 장점도 있으며 AC 계통의 OLTC(On-Line Tap Changer)와 같이 스위칭으로 인해 기기 수명에 미치는 영향이 작다. 또한 DC 배전 계통에서는 유효전력과 전압이 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 분산전원으로 유효전력을 직접적으로 발생시켜 전압 제어를 할 수 있다 [19]. BESS의 경우 충·방전이 가능하므로 전압제어를 통해 전압을 상승시키거나 감소시켜야 할 경우에 모두 사용될 수 있으므로 전압제어기기로서 적합하다고 할 수 있다. 그러나 발전력 공급 능력에 큰 제약이 없는 일반적인 분산전원과 달리 에너지 저장장치의 경우 저장장치의 에너지 용량에 따라 발전 능력이 제한되므로 이를 고려한 전압 제어 방안이 마련되어야 한다.

이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 계통 연계 컨버터와 에너지 저장장치를

이용한 협조 전압 제어 전략을 제안하였다. 계통 연계 컨버터와 분산전원은 전압 제어에 있어서 각각의 장, 단점을 갖고 있기 때문에 본 연구에서는 전압 민감도 특성을 바탕으로 각 기기의 전압 제어 전략을 수립하였다. 계통 연계 컨버터와 BESS의 전압 민감도는 부록에서 자세히 다루었다.

계통 연계 컨버터는 부록의 식(A.1)~(A.4)에 의해 모든 모선의 전압민감도가 약 1의 값을 갖는 것으로 근사화 된다. 계통연계컨버터를 이용해서 전압 제어를 수행하는 경우 계통의 전체적인 전압이 모두 증가 또는 감소하는 쪽으로 제어가 가능하다. 하지만 특정 두 모선의 전압 차이가 크게 날 경우 계통 연계 컨버터만으로는 전압 제어가 불가능 하다는 문제가 있다.

반면 분산전원은 부록의 식(A.5)~(A.11)에 의해 특정 모선에 설치된 분산전원의 출력이 변화할 경우 각 모선에 미치는 전압 민감도는 서로 다르게 나타나며, 이를 통해 분산전원의 출력 변화에 의한 각 모선의 전압 변화 또한 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 전압 민감도가 각각의 모선에 따라 다르게 나타나므로, 분산전원을 이용할 경우 국지적인 전압 제어가 가능하기 때문에 계통 전압을 정상 범위내로 유지할 수 있다. 하지만 전체적인 과전압, 저전압 문제를 해결하는데 어려움이 있다. 그리고 전압제어를 위해 분산전원의 유효전력 출력이 필요하기 때문에 전압 민감도가 낮은 모선의 전압을 보상하기 위해서는 분산전원의 출력이 크게 증가해야하고 이로 인한 발전 비용을 고려해야 하는 문제가 있다. 따라서 낮은 전압의 모선이 일반적으로 전압 민감도가 높은 특성을 이용하여 낮은 전압의 모선을 대상으로 제어하였다.

3.2 계통 연계 컨버터의 실시간 제어 기법

계통 연계 컨버터의 경우 모든 모선에 대한 전압 민감도가 비슷하게 나타나기 때문에 전압이 높은 모선의 경우 계통 연계 컨버터를 통해 대상 모선의 전압을 정상 범위 내로 유지하고 전체적인 전압을 증가, 감소시킬 수 있도록 하는 제어하는 전략을 고려하였다. 이로 인해 전체적인 과전압, 저전압 시에는 계통 연계 컨버터를 이용하여 손쉽게 전체적인 전압 레벨을 조정하는 것이 가능하고, 분산전원 또한 최소한의 출력을 통해 전압을 제어하는 것이 가능하다. 또한 계통 연계 컨버터의 위치는 일반적인 계통 연계점으로 정하였고 이 경우 계통 내의 모든 모선의 전압에 영향을 줄 수 있다는 장점 또한 있다.

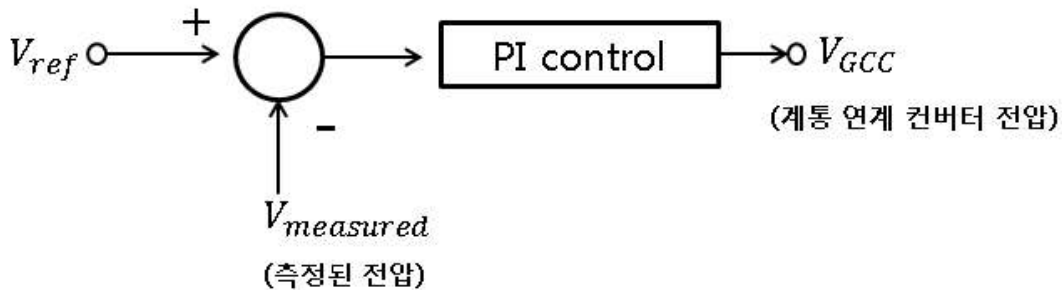


그림 7. 계통 연계 컨버터의 실시간 전압 제어 블록 다이어그램

3.3 BESS의 실시간 제어 기법

3.3.1 기존의 드롭 제어 기법

기존의 드롭 제어 기법에는 고정 드롭 기법과 가변 드롭 기법이 있다.

(a) 고정 드롭 기법

기존의 드롭 제어 기법은 전압 변동에 대해 미리 정해진 전압 변동에 대한 출력 변동의 비율인 드롭 계수에 따라 에너지 저장장치의 출력을 변동하는 기법이다 [20]. 충·방전 출력이 모두 가능한 에너지 저장 장치의 특징을 고려한 드롭 특성 곡선은 그림 8, 그림 9와 같다. 여기서 출력, 전압의 지령값인 P_0, V_0 는 앞의 2장에서 다룬 최적화 스케줄링 결과를 적용하였다.

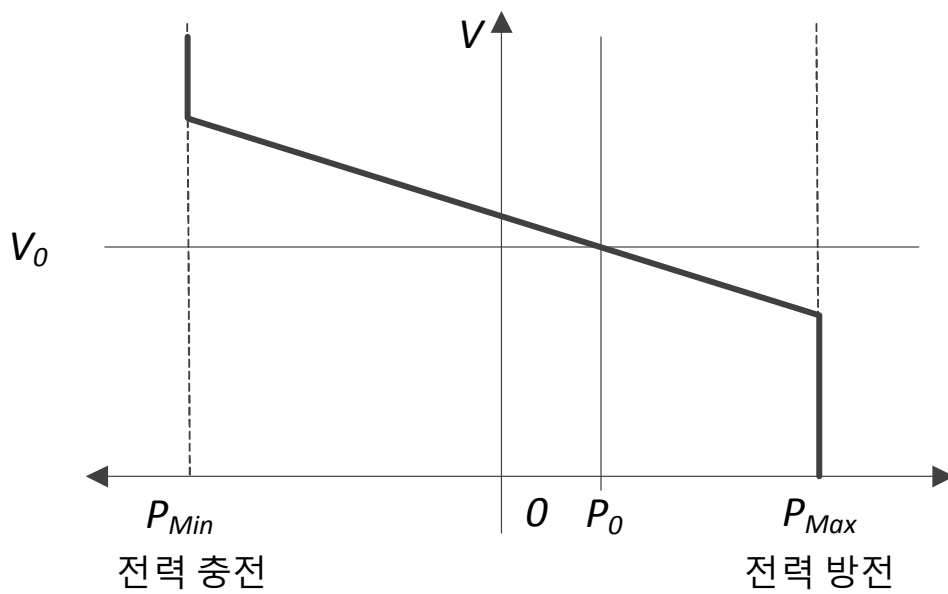


그림 8. 고정 드롭 제어 기법

그림 9. 고정 드롭 제어 기법의 블록 다이어그램

(b) 가변 드롭 제어 기법

[21]에서는 계통 허용 전압, 분산전원의 출력 제약, 지령 값을 고려하여 유동적으로 운전 영역별 드롭 특성을 결정하는 가변 드롭 제어 방식을 제안하였다. 그림 9와 같이 각 분산전원의 출력 여유도에 따라 드롭 계수를 조절하는 가변 드롭 제어 기법을 보여주고 있다. 에너지 저장장치의 스케줄링된 출력값(P_0), 제어 대상 모선의 스케줄링된 전압 지령값(V_0)을 결정하여 에너지 저장장치의 최대출력(P_{max})과 계통 허용 최소 전압(V_{min})을 연결하여 하단부 드롭 특성을 결정한다. 또한 에너지 저장장치의 최소출력(P_{min})과 계통 허용 최대 전압(V_{max})과 (P_0, V_0)를 연결하여 상단부 드롭 특성을 결정한다.

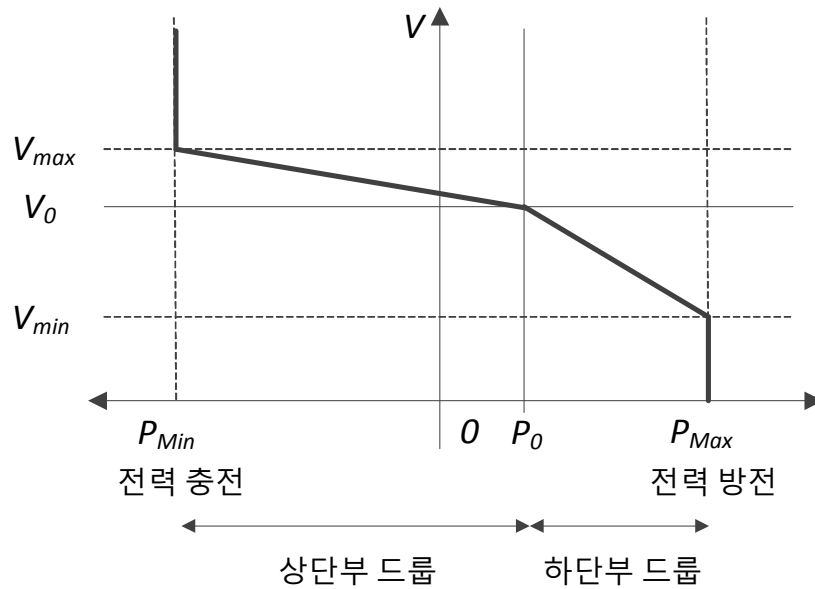


그림 10. 가변 드롭 제어 기법

가변 드롭 제어 기법의 장점은 여러 대의 에너지 저장장치가 전압 제어에 참여할 경우, 각 기기의 출력 여유도를 고려하여 출력을 변화시키도록 드롭 특성이 결정된다. 이에 따라 만약 계통의 전압이 감소하여 에너지 저장장치가 추가적인 출력을

발생시켜야 할 때, 출력 지령 값이 커서 상대적으로 출력 여유도가 작은 에너지 저장장치의 경우 드롭 계수가 크게 설정되어 출력 변화가 상대적으로 작게 설정되고, 출력 지령 값이 작은 에너지 저장장치의 경우 드롭 계수가 작게 설정되어 상대적으로 큰 출력 변화가 발생하게 된다. 따라서 여러 대의 에너지 저장장치가 전압 제어에 동시에 투입될 경우, 에너지 저장장치의 출력 여유도와 계통 전압 허용 값을 고려한 유동적인 드롭 특성을 결정할 수 있다는 장점이 있다.



그림 11. 가변 드롭 제어 기법

3.3 전압 민감도 기반 가변 드롭 기법

전압 민감도 가변 드롭 기법은 가변 드롭 기법의 한계를 보완하여 제안된 기법이다. 가변 드롭 기법은 에너지 저장장치들의 최대, 최소 출력과 전압과 출력의 지령 값이 동일하다면 드롭 계수가 같게 결정되어 출력 변동 또한 동일하게 발생할 것이다. 이 때 생길 수 있는 문제점은 2대의 에너지 저장장치는 위치와 전압 제어 대상

모선의 위치에 따라 전압 민감도가 다르게 나타나는데 드롭 계수와 출력이 같기 때문에 전압 민감도에 상관없이 전압 제어 대상 모선의 전압을 증가시키는데 동일한 출력을 낼 것이다. 하지만 제안된 전압 민감도 가변 드롭 기법을 이용한다면 높은 에너지 저장장치가 더 큰 출력을 발생시키고 전압 민감도가 낮은 에너지 저장장치가 더 작은 출력을 발생시킬 수 있어 두 에너지 저장장치의 출력 변동의 합을 감소시키면서 동일한 효과를 내는 전압 제어를 수행할 수 있다.

제안된 기법을 위해 에너지 저장장치의 출력 변동과 이로 인한 전압 변동에 대한 식을 식 (26)과 같이 정식화 하였다. 또한 식 (27)과 같이 전압 민감도에 비례하여 출력을 내도록 나타내진다.

$$V_{ref} - V_{measured} = \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,1}} \Delta P_{BESS,1} + \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,2}} \Delta P_{BESS,2} + \dots + \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,N}} \Delta P_{BESS,N}$$

V_{ref} : 스케줄링 된 전압

$V_{measured}$: 모니터링 된 전압 (26)

$$\frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,1}} : \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,2}} : \dots : \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{BESS,N}} = \Delta P_{BESS,1} : \Delta P_{BESS,2} : \dots : \Delta P_{BESS,N}$$

$$= k_1 : k_2 : \dots : k_N \quad (27)$$

$$V_{target} = V_{ref} - V_{measure}$$

전압민감도에 비례해서 출력을 내게 하기 위해서 식 (28)과 같이 기본적인 드롭 계수를 결정한 뒤 식 (27)의 비례 계수를 이용하여 식 (29)와 같이 민감도에 비례하여 각각의 BESS의 드롭 계수를 결정하게 된다. 이에 따라 새로운 드롭 특성에 따라 전압 제어 성능을 향상시키면서 각 에너지 저장장치의 전압민감도가 반영된 새로운 출력 지령 값을 적용시킬 수 있을 뿐만 아니라, 새로운 출력 지령 값에 대해

서 출력 여유도에 따른 드롭 특성이 결정되는 가변 드롭 특성의 특징 또한 결합할 수 있다는 장점이 있다.

$$R_{base} = \frac{V_{min} - V_{sch}}{(P_{B1,max} + \dots + P_{BN,max}) - (P_{sch,1} + \dots + P_{sch,n})} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{BESS,1}} &= \frac{K_1}{K_1 + \dots + K_N} \frac{1}{R_{base}} \\ &\vdots \\ \frac{1}{R_{BESS,N}} &= \frac{K_N}{K_1 + \dots + K_N} \frac{1}{R_{base}} \end{aligned} \quad (29)$$

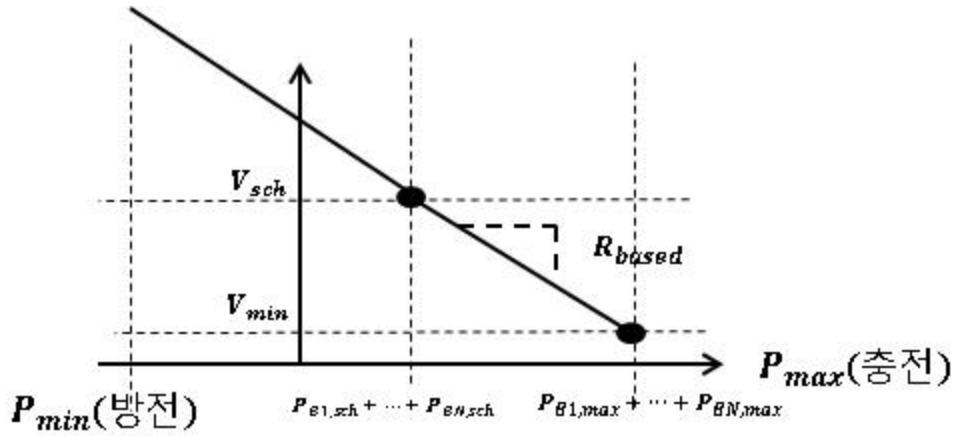


그림 12. 전압민감도 기반 드롭 제어 기법

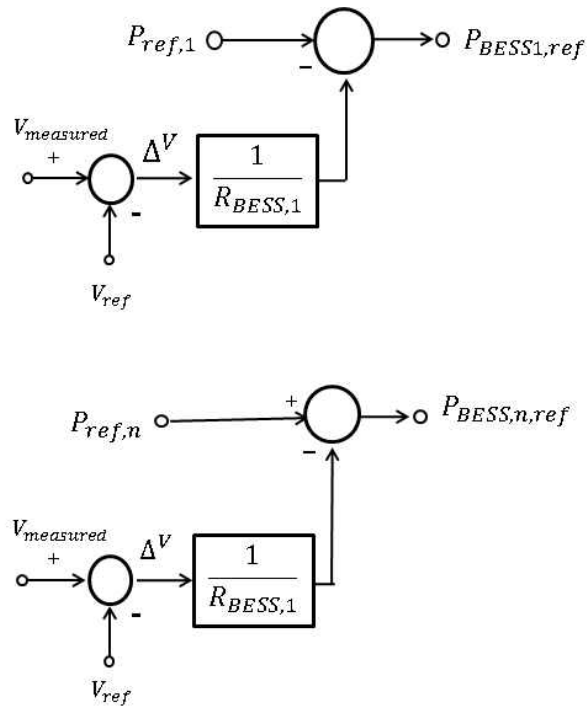


그림 13. 전압민감도 기반 드롭 제어 기법 블록 다이어그램

제 4장 사례 연구

4.1 모의 계통의 구성

본 논문에서 제안된 DC 배전시스템에서 배터리의 충·방전 스케줄링을 검증하기 위하여 그림 14와 같은 IEEE 13모선 계통을 수정한 배전 계통을 구성하였다. 모의 계통은 13개의 모선으로 이루어져 있으며 1번 모선의 전압의 계통 연계 컨버터로 연결되어 있다. DC 배전 시스템의 cable은 conductor가 DC 배전 선로가 필요로 하는 요건을 충족시키면 3상 AC system에서 사용하는 케이블을 사용할 수 있다. 케이블 중 가공선은 공기 절연으로 절연을 설계하지 않고 자연 상태를 이용하기에 AC 가공선은 DC로 사용할 수 있다. 하지만 AC 지중케이블은 XLPE로 절연하므로 DC 케이블로 사용할 수 없다. 따라서 사용한 모의 계통 중 지중 케이블은 가공 케이블로 수정하여 실험을 수행하였다 [4].

계통의 전압은 400V로 가정하였다. 안정적인 계통의 전압은 $0.95p.u. \sim 1.05p.u.$ ($380V \sim 420V$)이내를 유지하는 것을 목표로 한다. SOC는 배터리의 수명을 위해 40%~95%를 유지하도록 하고 SOC의 여유도를 확보하여 45%~90%를 유지하도록 스케줄링 한다. 부하와 신재생에너지원의 예측 오차율을 참고 하였으므로 실시간 전압 제어에 사용되는 SOC를 확보할 수 있다. 계통의 부하는 [21]을 참고하여 2012년 동계 피크일 때 우리나라의 하루 부하 곡선을 참고하여 계통의 크기에 맞게 크기를 줄였다. 신재생 에너지원으로 사용한 태양광의 발전량은 [10]을 참고하여 예측하였다. 신재생 에너지원은 예측만 가능하고 제어가 불가능하므로 음의 부하로 가정하고 사례연구를 수행하였다.

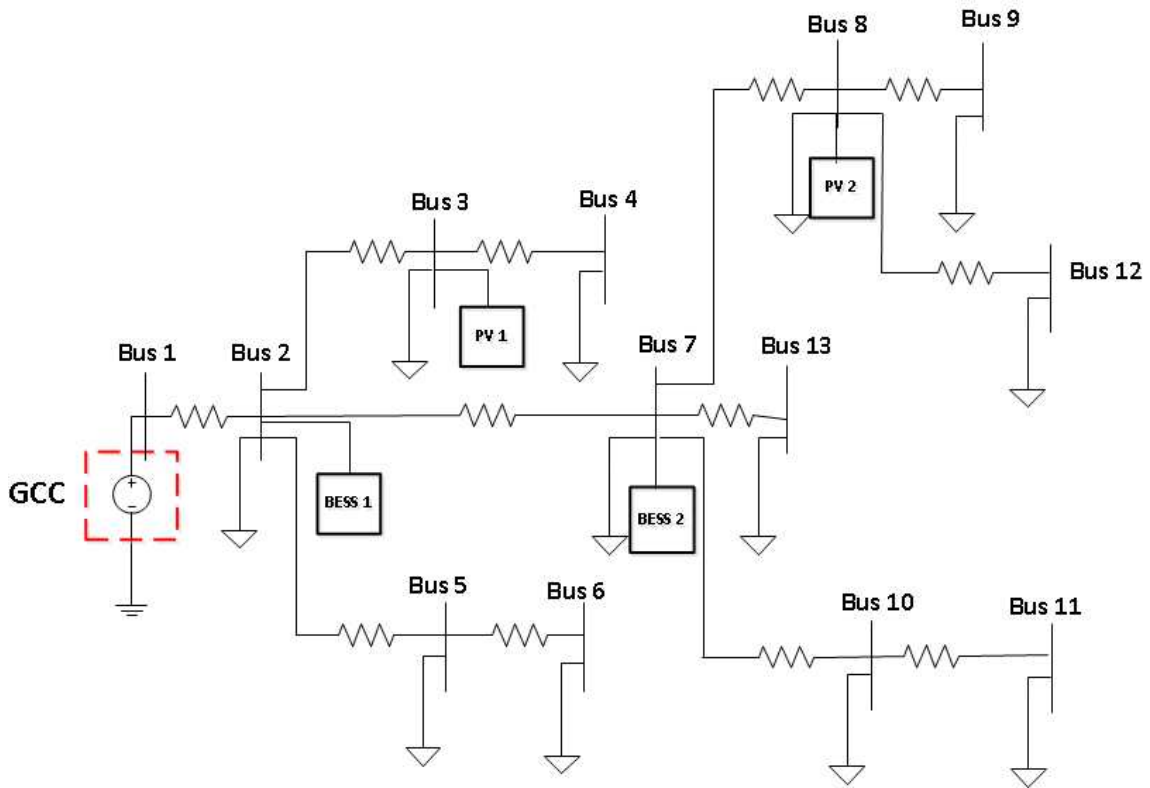


그림 14. 모의 계통도

표 1. 모의 계통 정보

G-VSC의 최대 용량	1MW
DC grid voltage	400V
Loads의 범위	0.8-1MW
Battery의 용량	용량 200kWh, 300kWh
PV의 출력 범위	0-500kW 두 기
BESS의 SOC의 범위	45%~90%
BESS의 출력 범위	-150kWh~150kWh
SOC margin	5%
BESS margin	50kWh

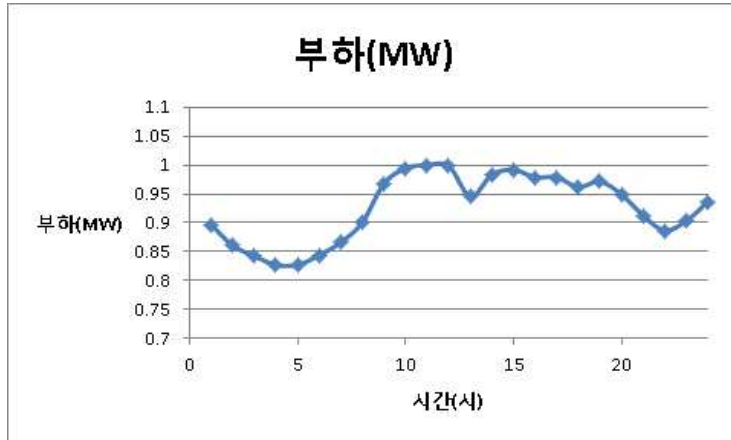


그림 15. 시간에 따른 부하의 추이

표 2. 시간에 따른 부하 예측량

시간 (hour)	부하예측량(MW)	시간 (hour)	부하예측량(MW)
1시	0.897	13시	0.946
2시	0.860	14시	0.983
3시	0.843	15시	0.992
4시	0.827	16시	0.979
5시	0.827	17시	0.979
6시	0.844	18시	0.962
7시	0.866	19시	0.972
8시	0.901	20시	0.949
9시	0.968	21시	0.913
10시	0.994	22시	0.886
11시	1.000	23시	0.903
12시	0.999	24시	0.937

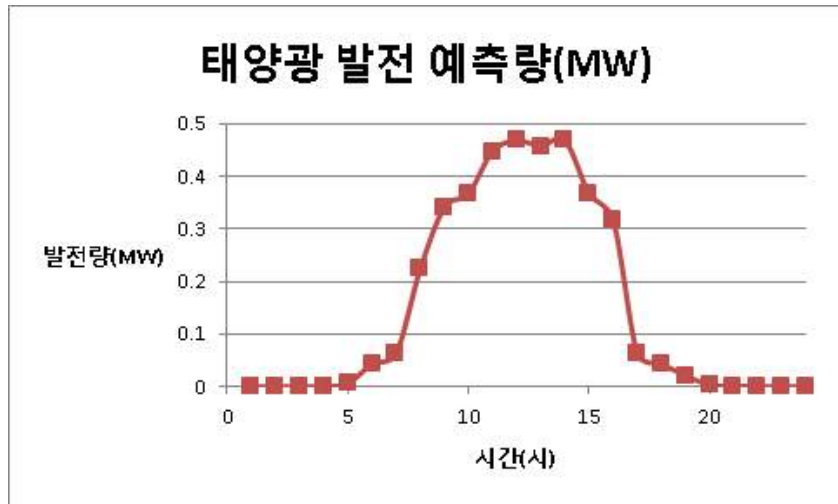


그림 16. 시간에 따른 PV 변동 추이

표 3. 시간에 따른 PV 예측량

시간 (hour)	PV 예측량(MW)	시간 (hour)	PV 예측량(MW)
1시	0	13시	0.916
2시	0	14시	0.936
3시	0	15시	0.734
4시	0	16시	0.632
5시	0.012	17시	0.126
6시	0.086	18시	0.086
7시	0.126	19시	0.042
8시	0.448	20시	0.006
9시	0.682	21시	0.002
10시	0.734	22시	0
11시	0.896	23시	0
12시	0.936	24시	0

4.2 스케줄링의 사례연구

표 4와 그림17은 감소된 손실을 보여주고 있다. 스케줄링 하기 전에는 손실이 3267.9kWh였고 스케줄링을 한 뒤에는 손실이 2231.05kWh로 14.668%에서 9.114%로 줄어든 것을 볼 수 있다. 총 감소된 손실은 1036.88kWh로 31.729%가 줄어들었다. 이는 SLP 스케줄링으로 인해 손실 최적화가 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 스케줄링으로 인해 손실을 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

표 4 감소된 손실

총 부하량 (kWh)	초기 손실 (kWh)	스케줄링 후 손실(kWh)	감소된 손실(kWh)
71196.8	3267.92	2231.05	1036.88
	초기 손실 비율(%)	스케줄링후 손실 비율(%)	감소된 손실 비율(%)
	14.668	9.114	31.729

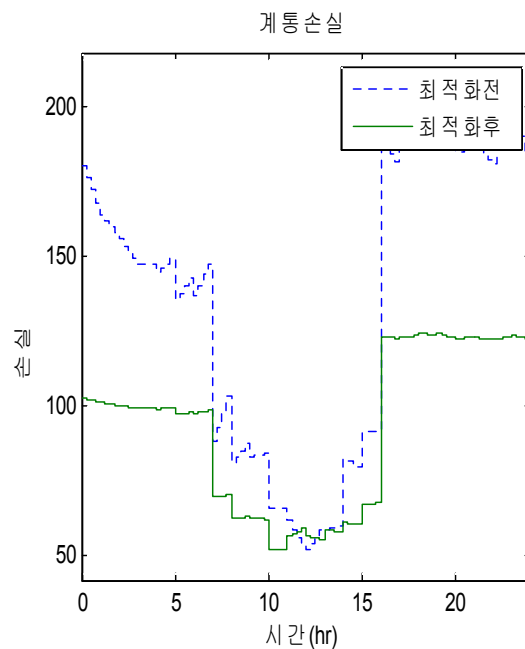


그림 18은 계통연계 컨버터의 출력전압을 보여주고 있다. 계통 연계 컨버터는 필요시에는 좀 더 상승하여 전압을 제어해주는 것을 알 수 있다. 그림 19는 SLP 스케줄링으로 최적화를 한 뒤 모선의 전압이다. 스케줄링을 하고 난 뒤에는 전압 상승으로 인한 전류 감소 및 손실 감소를 위해 상위 모선이면서 계통 연계컨버터와 가장 가까운 2번 모선의 전압은 계통 범위 내의 최대전압인 1.05p.u로 유지가 되었다. 모든 모선의 전압이 1p.u. 이상으로 계통의 안정한 범위 내(0.95p.u~1.05p.u)를 유지하고 있다.

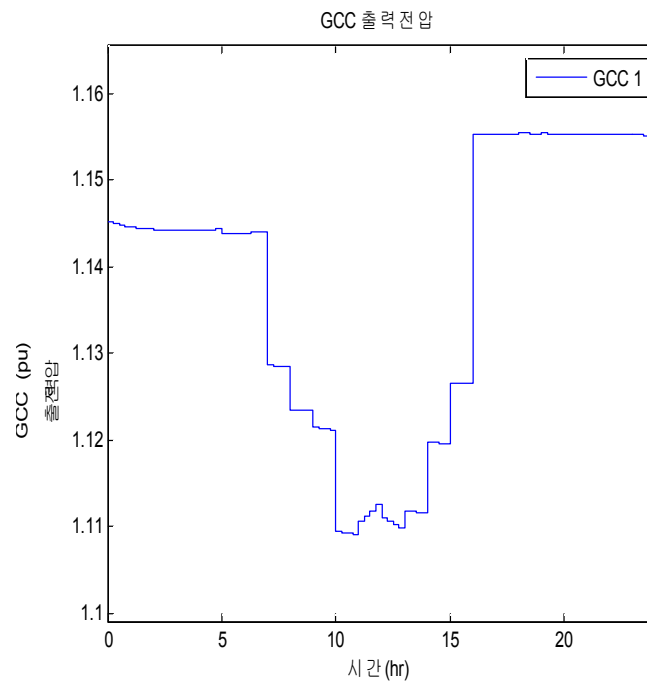


그림 18. 계통 연계 컨버터의 출력 전압 변화

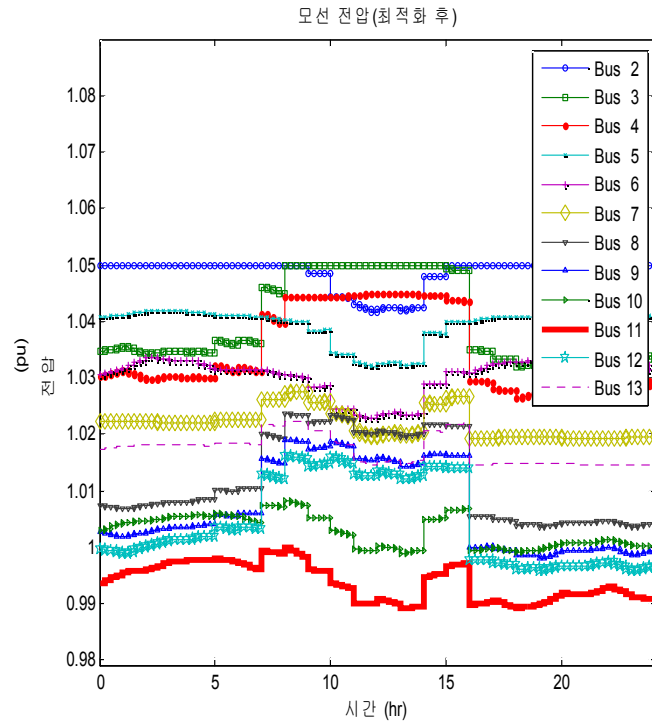


그림 19. 최적화 후의 모션 전압

그림 20의 BESS출력은 margin을 고려한 범위인 -1에서 1사이에서 출력을 내고 있다. 그림 21의 SOC또한 SOC margin까지 고려한 범위인 0.45에서 0.9사이에서 충·방전이 되고 있다. 또한 SOC는 전구간에 대한 충·방전 후 처음 시구간의 SOC와 같은 값으로 종료가 된 것을 보여주어, 다음 스케줄링 주기 때 스케줄링을 위한 BESS의 SOC margin을 확보할 수 있다.

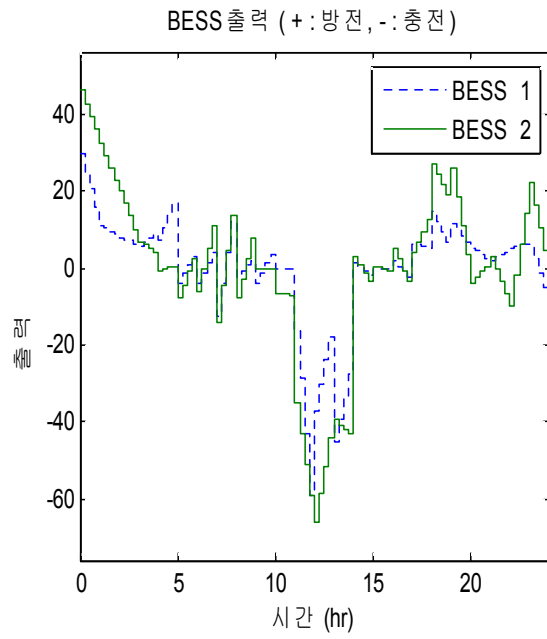


그림 20. BESS의 출력

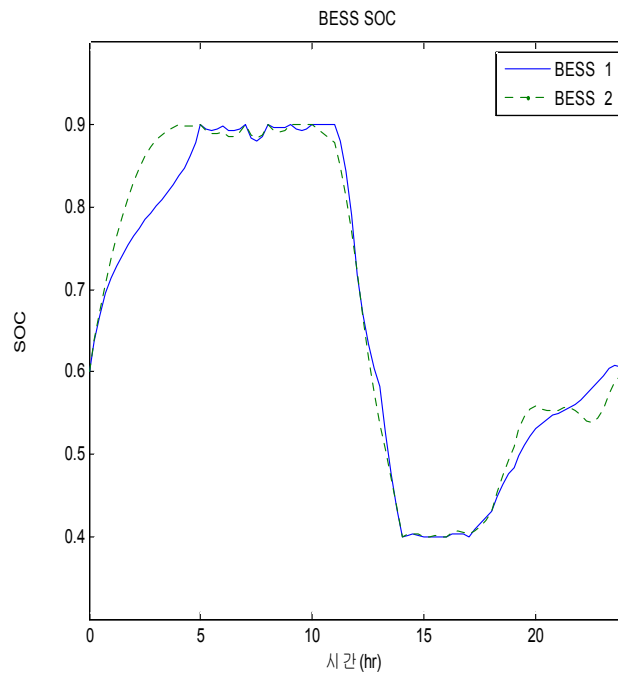


그림 21. BESS의 SOC

4.3 실시간 전압 제어 사례 연구

신재생에너지원의 발전량과 부하 패턴, 에너지 저장장치의 출력 스케줄링 값과 전압 스케줄링 값은 낮 2시 45분~3시 경의 최적화 스케줄링 결과를 이용하였고, 이 때 적용된 데이터들은 표 5와 같다. 2시 45분 50초에 계통 상황이 변화하고 10초간 실시간 전압 제어 운영이 이루어진다. 3시~3시 15분 구간에는 계통 상황의 변화를 반영하여 표 6과 같은 재스케줄링된 값으로 계통이 운영된다.

표 5. 스케줄링 결과

모선 번호	부하(kW)	PV 출력(kW)	에너지 저장장치 출력 (kW)	전압 (pu)
1 (PCC)	-	-	-	1.1115
2	95.9	-	-43.1(충전)	1.0425
3	86.1	236	-	1.0500
4	80	-	-	1.0447
5	80.8	-	-	1.0326
6	78.1	-	-	1.0236
7	74.1	-	-27.6 (충전)	1.0203
8	68.6	232	-	1.0201
9	78.8	-	-	1.0147
10	88.9	-	-	0.9995
11	86.2	-	-	0.9895
12	87.4	-	-	1.0125
13	86.4	-	-	1.0154
총 합	991.3	468	-56.4(충전)	-

표 6. 재스케줄링 결과

모선 번호	부하(kW)	PV 출력(kW)	에너지 저장장치 출력 (kW)	전압 (pu)
1 (PCC)	-	-	-	1.1601
2	96.0	-	15.8(방전)	1.0500
3	87.0	0	-	1.0313
4	81.0	-	-	1.0259
5	81.5	-	-	1.0401
6	78.5	-	-	1.0311
7	73.5	-	28.6 (방전)	1.0182
8	68.5	0	-	1.0020
9	79.0	-	-	0.9965
10	88.0	-	-	0.9974
11	87.0	-	-	0.9873
12	87.5	-	-	0.9942
13	84.0	-	-	1.0133
총 합	991.5	0	44.4(방전)	-

계통 사례 연구는 태양광 발전 장치가 일사량 변동에 따라 출력 변동이 있는 경우를 가정하여 사례 연구를 하였다. 출력 변화가 일어나면 각각의 경우에 따라 계통 연계컨버터와 BESS의 제어를 함께 수행한다. 계통 연계 컨버터 제어와 BESS의 제어는 고정 드롭 제어, 가변 드롭 제어와 전압 민감도 기반 가변 드롭 제어를 함께 수행한 경우로 나눠서 실험하였다. 그림 21과 같이 계통 상황이 변화하기 전에는 스케줄링대로 운영이 되고 계통 상황이 변화한 뒤에는 계통 연계 컨버터 및 BESS의 실시간 전압 제어를 통해 전압 제어를 하였다. 또한 다음 시구간부터는 계통 상황 변화를 반영하여 재 스케줄링한 결과로 계통을 운영하였다.

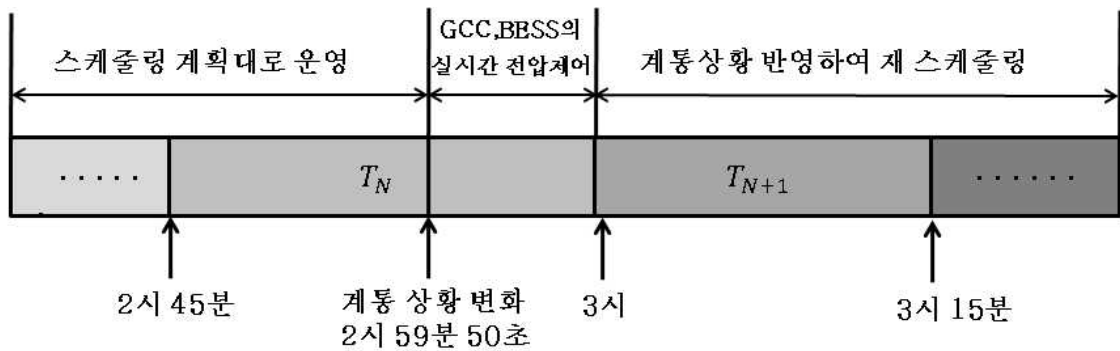


그림 22. 실시간 전압 제어 운영 제어 전략

그림 23은 계통의 전압 변화를 보여 주고 있다. 그래프의 2시 59분 54초에서 PV 발전기가 고장이 나서 전압이 0.95 p.u.아래가 되는 것을 볼 수 있다. 그림 24는 최저 전압의 변화를 보여주고 있는데 계통의 안정 범위를 벗어나서 0.911p.u인 것을 확인할 수 있다. 이에 전압 민감도 기반 드롭 제어 기법으로 그림 24와 같이 BESS의 출력이 변화하게 된다. BESS1은 스케줄링 값인 -27.6kW에서 실시간 전압제어로 -12.65kW가 되고 계통 상황 변화를 반영한 재스케줄링 값으로 28.6kW의 출력을 내게 된다. 또한 BESS2은 -43.1kW에서 실시간 전압 제어로 -7.68kW가 되고 재스케줄링 결과로 인해 다음 구간인 10초 이후에는 15.8kW가 되는 것을 알 수 있다. 또한 BESS1의 전압 민감도가 0.134이고 BESS2의 전압 민감도가 0.204이고 이에 따라 드롭 계수가 결정됨에 따라 그림 25, 그림 26과 같이 전압 민감도에 비례하여 BESS의 출력이 결정되었다. BESS의 출력으로 인해 그림 24와 같이 최저 전압이 0.911p.u.에서 0.985p.u.로 상승하였다.

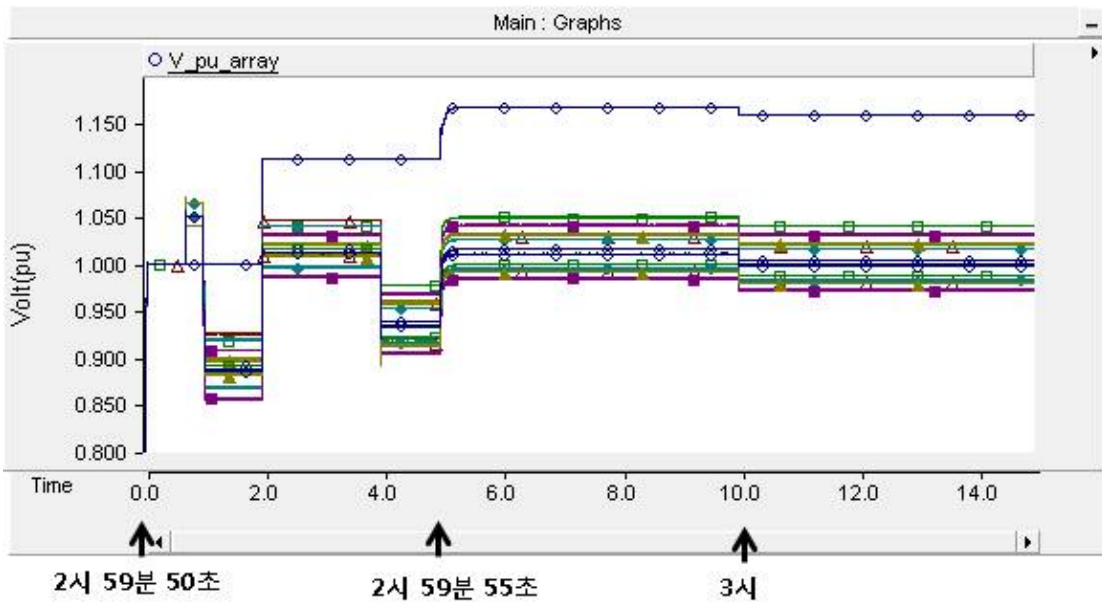


그림 23. 계통의 전압 변화

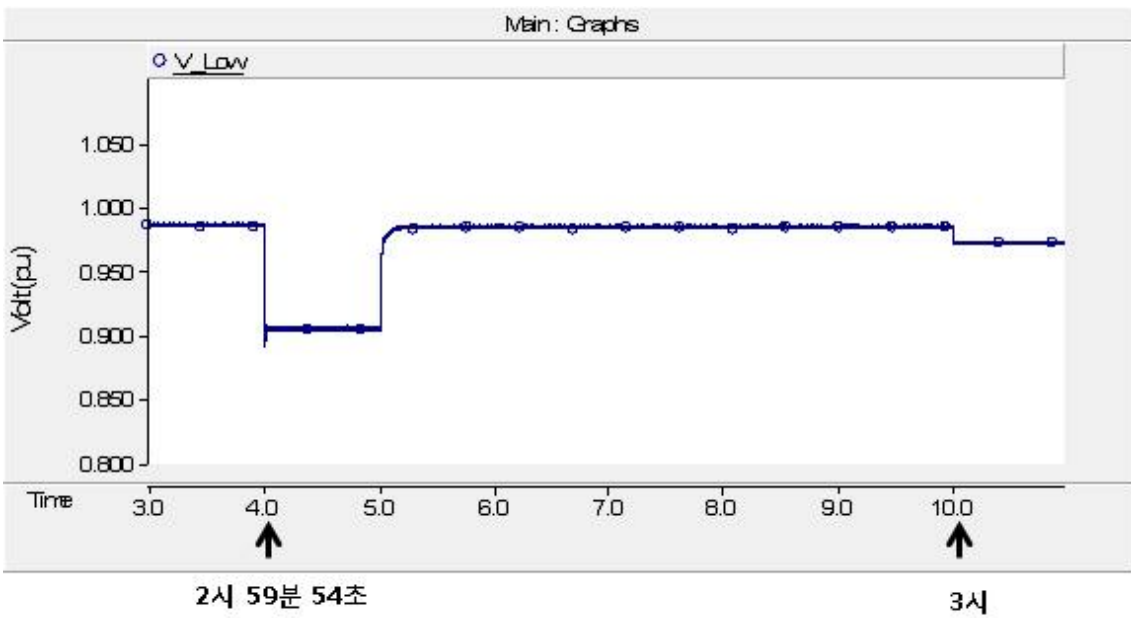


그림 24. 계통의 최저 전압

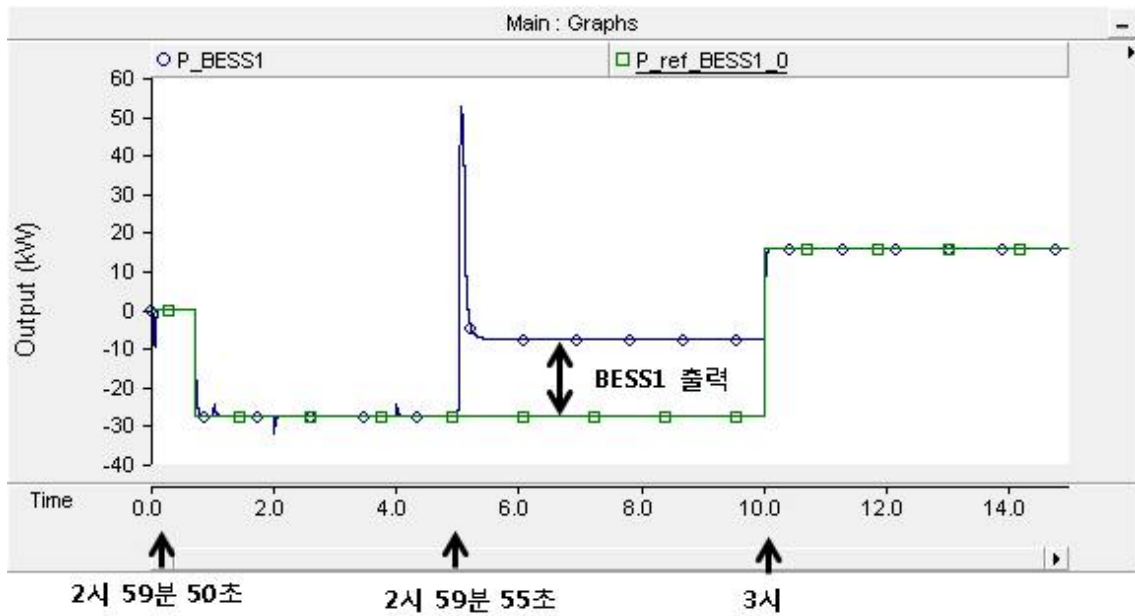


그림 25. BESS1의 출력 변화

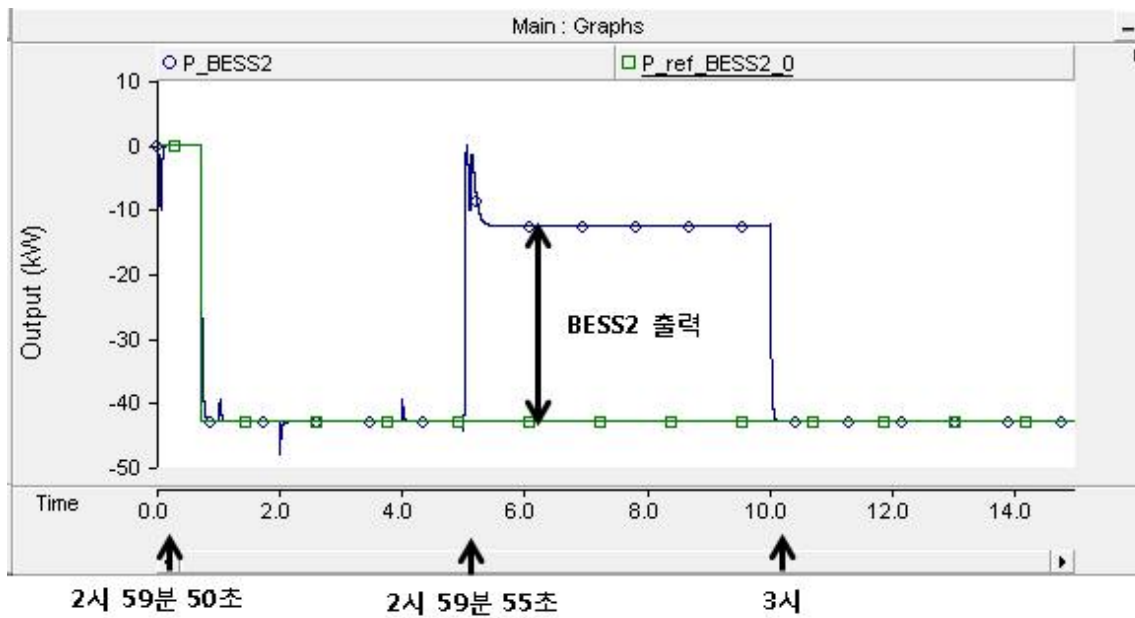


그림 26. BESS2의 출력 변화

표 6은 기존의 드롭 기법과 본 논문에서 제안한 전압 민감도 기반 드롭 제어 기법을 실험 결과를 통해 비교해 보았다. 그림 27은 전압 민감도 기반, 가변 드롭, 고정 드롭의 BESS 출력의 합을 보여주고 있다. 표 6과 그림 27을 통해 전압 민감도 기반 드롭 기법이 최소의 출력으로 최저 전압을 회복시키는 것을 확인할 수 있다.

표 6. 기존의 드롭 기법과 제안한 기법의 결과 비교

	고정드롭기법		가변드롭기법		전압민감도 기반 드롭	
	BESS1	BESS2	BESS1	BESS2	BESS1	BESS2
최저전압	0.9840p.u.		0.9846p.u.		0.9853p.u.	
출력변화	52.69kW	3.99kW	13.94kW	37.04kW	14.95kW	35.42kW
드롭계수	0.150	0.300	0.222	0.162	0.238	0.155
총출력	56.68kW		50.98kW		50.37kW	

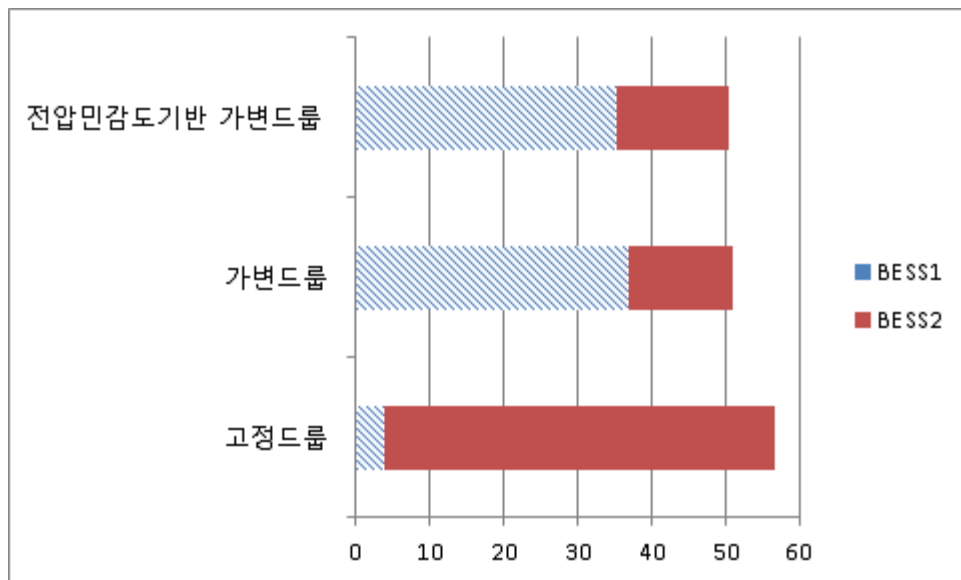


그림 27. 여러 가지 드롭 제어 기법의 BESS 출력 비교

제 5 장 결론

미래에는 태양광, 풍력 등 신재생에너지원이 주요 에너지원으로 부각될 것이고 대용량 에너지저장장치가 상용화될 것으로 전망되고 있다. 대부분의 신재생에너지원, 분산전원 및 에너지 저장시스템의 대부분은 DC 전원을 생산하여 공급하고 있고 전기자동차와 같은 DC 부하도 증가할 것으로 예상되므로 전력 시스템의 효율 증가를 위해 DC 배전 시스템에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

본 논문에서는 태양광 시스템과 배터리 에너지 저장 시스템이 연계되어 있는 배전 시스템을 모델로 하여 운영방법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 신재생에너지원이 연계되어 있는 DC 배전 시스템에서 손실 최소화와 전압 제어를 목적으로 부하 예측과 신재생 에너지원 발전 예측을 기반으로 배터리 에너지 저장장치의 충·방전 스케줄링을 하였다. 또한 부하 예측과 신재생 발전량 예측 오차로 인해 발생하는 전압 변동량 및 전력을 실시간으로 모니터링하고 전압이 적정 범위인 0.95p.u.에서 1.05p.u.를 벗어나면, 배터리 에너지 저장 시스템의 전압민감도 기반 드롭 제어를 이용하여 전압을 제어하였다. 본 논문에서는 가변 드롭 제어 기법에 전압 민감도를 추가하여 제어 대상 모선의 각 배터리 에너지 저장시스템의 전압 민감도를 구하여 큰 배터리가 더 많은 출력을 내는 전압 민감도 기반 가변 드롭 기법을 제안하였다.

마지막으로 본 논문에서 제안한 스케줄링 기법 및 실시간 전압 제어 기법을 검증하기 위해 모의 계통을 구성하여 사례 연구를 진행하였다. 스케줄링을 통해 스케줄링을 하기 전보다 손실이 많이 줄었음을 검증할 수 있었고 전압 또한 계통 적정 범위 내를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 또 제안된 전압 민감도 기반 가변 드롭 기법이 기존의 드롭 기법이나 가변 드롭 기법보다 전압을 보상할 때 전력을 더 적게 내도 되어 스케줄링 된 지령 값에 좀 더 빠르게 접근할 수 있다는 것도 확인하

여 본 논문의 제안이 타당함을 증명하였다.

앞으로 DC 배전 시스템이 이용될 것은 무궁 무진할 것으로 예상되며 본 연구 및 본 연구에서 더욱 발전한 연구가 DC 배전 시스템의 안정도 개선에 기여할 수 있을 거라 기대한다.

Abstract

The interconnection of DC distributed generations and DC load such as PHEV to distribution system is increasing. The researches on the DC distribution system has become necessary since DC distribution system has high efficiency than conventional AC distribution system. The objective of this paper is development of efficient and reliable operation scheme for DC distribution system that renewable energy system and energy storage system are included. In this paper, Optimized scheduling method and real-time voltage control in DC distribution system are proposed. Optimized scheduling method with grid connected converter and battery energy storage system is proposed by using SLP(Sequential Linear Programming) for efficient DC distribution system operation. Output and SOC of battery energy storage system and grid voltage can be maintained in allowed range by this scheduling method. Also total grid loss during scheduling period can be minimized. Real-time voltage control method with grid connected converter and battery energy storage system is developed to keep the grid voltage in allowed range when sudden load change is happened in grid. Real-time voltage control method uses droop method based voltage sensitivity that can control voltage at least output of grid connected converter and battery energy storage system. And the proposed scheduling method and real-time voltage control method was validated through a case study.

참 고 문 헌

- [1] Daniel Nilsson and Ambra Sannino, "Efficiency analysis of low- and medium- voltage dc distribution systems"
- [2] Per Karlsson, "DC Distributed Power Systems Analysis, Design and Control for a Renewable Energy System"
- [3] Donald J. Hammerstrom, "AC Versus DC Distribution Systems-Did We Get it Right?"
- [4] G.Byeon, H.Lee, T.Yoon, G.Jang, W.Chae and J.Kim, "A Research on the Characteristics of Fault Current of DC distribution system and AC distribution system," 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, May30-June 3, 2011
- [5] Kai Sun, Li Zhang, Yan Xing, Josep.M Gurrero, "A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol, No.10, October 2011
- [6] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, Ryohei Uchida, "DC Micro-grid for Super High Quality Distribution-System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices", Power Electronics Specialists Conference, 2006.
- [7] Lie Xu, Dong Chen, "Control and Operation of a DC Microgrid With Variable Generation and Energy Storage", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No.4, October 2011

- [8] Dong Chen, Lie Xu, "DC Microgrid with Variable Generations and Energy Storage", IET Conference on Renewable Power Generation, 2011
- [9] H. Kakigano, A.Nishino, T.Ise, "Distribution Voltage Control for DC Microgrid with Fuzzy Control and Gain-Scheduling Control", 8th International Conference on Power Electronics, May30–June 3, 2011
- [10] Bo Lu, Mohammad Shahidehpour, "Short-Term Scheduling of Battery in a Grid-Connected PV/Battery System, IEEE Transactions on Power System, Vol. 20, No, 2 May 2005
- [11] G. M. Tina and Pappalardo, "Grid-Connected Photovoltaic System with Battery Storage System into Market Perspective", IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), 2009
- [12] Hyun-Koo Kang, Seon-Ju Ahn and Seung-Il Moon, "A New Method to Determine the Droop of Inverter-based DGs", Power & Energy Society General Meeting, 2009
- [13] Joe H. Chow, Felix F. Wu, James A. Momh, Applied mathematics for restructured electric power system : operation, control, and computational intelligence, Springer, Nov. 2004.
- [14] J.Lee, B.Han, H.Cha "Operational Analysis of DC Micro-grid using Detailed Model of Distributed Generation", IEEE T&D Asia 2009
- [15] Hao Qian, Jianhui Zhang, Jih-Sheng Lai, Wensong Yu, "A High-Efficiency Grid-Tie Battery Energy Storage System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol, 26, No, 3, March 2011
- [16] Seon-Ju Ahn, Seung-Il Moon, "Economic Scheduling of Distributed Generators in a Microgrid Considering Various Constraints", Power &

Energy Society General Meeting, 26-30 July 2009

[17] Jizhong Zhu “Optimization of Power System Operation”

[18] Kundur P., “Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc”, p. 581-690,
1994

[19] Hyun-Koo Kang, Seon-Ju Ahn and Seung-II Moon, “A New Method to
Determine the Droop of Inverter-based DGs”, 2009

[20] 전력 정보 통계 시스템 “<http://www.kpx.or.kr/epsis/>”

부 록

부록에서는 스케줄링에서 SLP를 위한 선형화 및 실시간 전압 제어를 위한 협조 제어 전략을 위해 전압 민감도에 대해 다루었다. 먼저 방사형 DC 배전 시스템에서 선로의 저항 정보를 담고 있는 R-Bus 행렬을 정의하여 전압 민감도를 분석하였다. 정의된 R-Bus는 식 (A.1)과 같다.

$$R = \begin{matrix} \begin{matrix} \left[\right. \\ \left[\right. \\ \left[\right. \\ \left[\right. \\ \left[\right. \end{matrix} & \begin{matrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{matrix} & \begin{matrix} \left. \right] \\ \left. \right] \\ \left. \right] \\ \left. \right] \\ \left. \right] \end{matrix} \end{matrix}$$

$\{R_i\}$: 계통연계점(GCC)와 I번째 모선의 최단거리 상에 위치한 선로 저항의 집합 (A.1)

$\{R_j\}$: 계통연계점(GCC)와 j번째 모선의 최단거리 상에 위치한 선로 저항의 집합

R_{ij} : $\{R_i\}, \{R_j\}$ 두 집합의 교집합의 원소들의 합

먼저 AC/DC 계통 연계 컨버터를 통해 상위 계통과 연계된 방사형 DC 배전 시스템의 경우 계통 연계 컨버터의 전압 제어를 통해 출력 전압을 제어할 수 있다. 이는 AC 배전 시스템에서의 ULTC의 탭 변환에 의한 전압제어와 유사한 제어 방법이며, 계통 연계 컨버터의 경우 전력전자 스위치를 이용해 연속적인 전압제어가 가능하므로 계통의 과도 응답이나 응답 속도 등의 측면에서 더 우수한 효과를 보일 수 있다. 이 때 계통 연계 컨버터의 출력 전압 변동에 따른 각 모선의 전압 변화에 대한 전압 민감도는 식 (A.2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta V_i}{\Delta V_1} &= 1 - \sum_{k=1}^n \frac{R_{ik}P_k}{V_k^2} \left(1 - \sum_{k'=1}^n \frac{R_{kk'}P_{k'}}{V_{k'}^2} \frac{\Delta V_{k'}}{\Delta V_1} \right) \\
&= 1 - \sum_{k=1}^n \frac{R_{ik}P_k}{V_k^2} + \sum_{k=1}^n \frac{R_{ik}P_k}{V_k^2} \sum_{k'=1}^n \frac{R_{kk'}P_{k'}}{V_{k'}^2} - \dots
\end{aligned} \tag{A.2}$$

만약 정상 운전 상태에서 계통 전압이 정격전압 근처의 값에서 유지된다고 가정할 경우 그 값은 V_k 에 비해 매우 작으므로 $V_k \gg R_{kk}P_k/V_k$ 인 관계가 성립하고, 정상 운전 상태에서 계통 전압은 양수이므로 $V_k^2 \gg R_{kk}P_k$ 인 관계를 갖는다. 또한 방사형 배전 시스템에서 R-Bus 행렬의 특성상 $R_{ii} \geq R_{ik}$ 인 관계가 성립하므로, 이를 정리하면 식 (A.3)과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned}
V_k &\gg \frac{R_{kk}P_k}{V_k} \\
0 < \frac{R_{kj}}{V_k^2 + R_{kk}P_k} &\leq \frac{R_{kk}P_k}{V_k^2 + R_{kk}P_k} \simeq \epsilon
\end{aligned} \tag{A.3}$$

식 (A.3)의 조건에 의해 식 (A.2)에서 뒤의 항들을 소거 하면 식 (A.4)와 같이 근사화 할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta V_1} \simeq 1 - \sum_{k=1}^n \frac{R_{ik}P_k}{V_k^2} \simeq 1 \tag{A.4}$$

위의 식(A.4)를 통해 계통 연계 컨버터의 전압 출력에 대한 전압 민감도에 대해 알 수 있다. 방사형 배전 시스템의 경우 그 구조적인 특성상 연계점에서 멀리 떨어진 모선일수록 연계점까지의 선로 저항이 크고 이로 인한 전압 강하가 크기 때문에

전압은 낮게 나타나므로 민감도는 더 크게 나타나게 된다. 그러나 수식 상에서 선로 저항과 전압이 미치는 영향은 아주 크기 않기 때문에 이러한 영향을 무시하면, 결국 계통 연계 컨버터의 출력 전압 변화에 의한 계통 모선 전압의 변화에 대한 민감도는 약 1의 값을 가진다고 근사화 될 수 있고, 이를 통해 계통 연계 컨버터의 전압제어를 통해 모든 모선의 전압을 고르게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 계통 연계 컨버터의 출력 전압을 상승시킬 경우 계통 전압이 전체적으로 상승하게 되고, 전압 민감도의 감소 및 전압 안정도의 향상을 기대할 수 있다.

다음으로는 특정 모선에 주입되는 유효전력의 변화에 따른 전압 민감도를 유도하였다. 먼저 전압 민감도를 표현하기 위해서는 식 (A.5)와 같이 모선 전압이 모든 모선의 유효전력에 대한 식으로 표현되어야 한다.

$$V_i = V_i(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (\text{A.5})$$

식 (A.6)은 각 모선의 유효전력에 의한 계통 연계점과의 전압 차이를 표현하고 있다. 먼저 식을 유도하기 위해 계통 연계점이 최상부에 위치한 1번 모선이고 계통 연계 컨버터를 통해 연계되어 연계점의 전압이 일정하게 제어되어 V_1 이 전압 값을 알 수 있는 상수라는 가정을 하였다. 좌변은 계통 연계점과 i 모선 사이의 전압 차이를 나타내고, 우변의 $R_{ik}P_k/V_k$ 는 k 번째 모선에서 주입되는 유효전력에 의해 나타나는 계통 연계점과 i 번째 모선 사이의 전압 차이를 나타내었다. 따라서 식 (A.6)은 모든 모선의 유효전력 변동에 따른 전압의 영향이 수식 상에 직접적으로 나타나고 전압 민감도를 분석하는데 적합한 식으로 사용될 수 있다.

$$V_i - V_1 = \sum_{k=1}^n R_{ik} \frac{P_k}{V_k} \quad (\text{A.6})$$

식 (A.6)을 바탕으로 j 번 째 모션에서 주입되는 유효전력의 변동에 따른 i 번 째 모션의 전압 변동에 대한 전압 민감도에 대한 근사식을 유도하였다. 이를 위해 소신호 분석 기법을 이용하여 계통 운전점의 미소변화에 따른 전압과 유효전력과의 관계를 정리하였다.

먼저 식 (A.7)에서 j 번 째 모션의 주입 전력에 미소 변동이 발생 할 때, i 번 째 모션의 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다. 이 때 i 는 전압 민감도를 관찰하려는 모션의 지표, j 는 주입 전력이 변동하는 모션의 지표, k 는 일반적인 모션들의 지표를 의미한다.

$$(V_i + \Delta V_i) - V_1 = \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n R_{ik} \frac{P_k}{V_k + \Delta V_k} \right) + R_{ij} \frac{P_j + \Delta P_j}{V_j + \Delta V_j} \quad (\text{A.7})$$

식 (A.7)에서 j 번 째 모션을 제외한 다른 모션의 주입 유효전력은 변동이 발생하지 않고 일정하므로 ΔP_k 항은 무시할 수 있다. 또한 계통 연계점 전압인 V_1 의 경우도, 연계점의 전압이 일정하게 제어되고 있다고 가정했기 때문에 ΔV_1 항을 무시할 수 있다.

계통 상태에 따른 전압 변동 성분만을 분석하기 위해 식 (A.7)에서 식 (A.6)을 빼면 식 (A.8)와 같이 정리될 수 있다. 이 때 정상 운전 상태의 경우 전압 민감도의 값은 상당히 작고, 소신호 분석 기법에서 유효전력의 변동분 또한 매우 작기 때문에 $V_k \gg \Delta V_k$ 인 관계가 성립한다. 그러므로 식 (A.8)의 분모의 ΔV_j , ΔV_k 를 포함한

항은 무시될 수가 있다. 결국 식 (A.8)을 미소 성분을 무시하고 ΔV_i 와 ΔP_j 의 관계에 대한 식으로 정리하면 식 (A.9)와 같이 정리된다.

$$\Delta V_i = R_{ij} \left(\frac{V_j \Delta P_j - P_j \Delta V_j}{V_j^2 + V_j \Delta V_j} \right) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n R_{ik} \left(\frac{P_k \Delta V_k}{V_k^2 + V_k \Delta V_k} \right) \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta P_j} = \frac{V_i^2}{V_i^2 + R_{ii} P_i} \left(\frac{R_{ij}}{V_j} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{R_{ik} P_k}{V_k^2} \frac{\Delta V_k}{\Delta P_j} \right) \quad (\text{A.9})$$

정리된 전압 민감도의 식은 전압 민감도의 정확한 식이지만 i 모선의 전압 민감도가 다른 모선의 전압 민감도에 의존적인 방정식으로 표현이 되어 결국 다른 모선의 전압 민감도를 모두 알기 전에는 특정 모선의 전압 민감도를 정확하게 알 수 없다는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 우변의 $\Delta V_k / \Delta P_j$ 항에 식 (A.9)를 다시 대입하고 이를 반복하면 전압 민감도 식은 식 (A.10)과 같은 형태로 전개된다.

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta P_j} = \frac{V_i^2}{(V_i^2 + R_{ii} P_i) V_j} \left(R_{ij} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{R_{ik} R_{kj} P_k}{V_k^2 + R_{kk} P_k} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{R_{ik} P_k}{V_k^2 + R_{kk} P_k} \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^n \frac{R_{kk'} R_{k'j} P_{k'}}{V_{k'}^2 + R_{k'k'} P_{k'}} + \dots \right) \quad (\text{A.10})$$

위의 식에서 분모의 $V_k^2 + R_{kk} P_k$ 는 $V_k(V_k + R_{kk} P_k / V_k)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 $R_{kk} P_k / V_k$ 는 k 번 째 모선에서 주입되는 유효전력에 의해 나타나는 계통 연계점과 i 번 째 모선 사이의 전압 차이를 나타낸다.

위의 관계에 의해 식 (A.10)의 전개식에서 식 (A.3)에 의해 뒤쪽의 항으로 갈수록 그 크기가 매우 작으므로 이러한 항들의 영향을 무시할 수 있고 결국 식 (A.11)과 같이 전압 민감도에 대한 근사식을 구할 수 있다. 식 (A.11)를 통해 BESS의 출력

에 대한 전압 민감도에 대해 살펴볼 수 있다.

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta P_j} \simeq \frac{V_i^2}{(V_i^2 + R_{ii}P_i)V_j} \left(R_{ij} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{R_{ik}R_{kj}P_k}{V_k^2 + R_{kk}P_k} \right) \quad (\text{A.11})$$

BESS출력에 대한 전압 민감도는 각 모선에 따라 다르므로 특정 모선을 제어할 수 있다.