



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

배전계통 내 계통손실과 부하전력
저감을 위한 **Community Energy
Storage**와 **OLTC**의 협조 제어방안
연구

**Control of Community Energy Storage and OLTC
for Loss and Load Reduction in the Distribution
System**

2016 년 2 월

서울대학교 대학원

전기·정보공학부

강 기 훈

배전계통 내 계통손실과 부하전력
저감을 위한 Community Energy
Storage와 OLTC의 협조 제어방안
연구

지도교수 문 승 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2016 년 2 월

서울대학교 대학원
전기·정보공학부
강 기 훈

강기훈의 공학석사 학위논문을 인준함
2016 년 2 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

신재생에너지원은 규모가 작고 출력 전압이 낮기 때문에 배전계통에 직접 연계되고 있다. 이에 따라 신재생에너지원의 원활한 연계를 위해 energy storage system (ESS)이 배전계통에 분산되어 설치되고 있으며 최근에는 소비자에 가까이 위치한 community energy storage (CES)형태로 설치되고 있다. CES는 소비자가 보유한 신재생에너지원 연계에 효율적이며 피크전력 감소, 부하 이전, 계통전압 제어 등에 활용 가능하다. 한편, 배전계통 운영자는 부하전력을 감소시키기 위해 conservation voltage reduction (CVR)을 이용한다. CVR을 계통에 효율적으로 적용하기 위해서는 계통전압이 평탄화 되어야 한다. CES는 계통에 분산되어 있고 전압을 제어할 수 있으므로 CVR을 위한 계통전압 평탄화에 부가적으로 이용 가능하다. 이에 본 논문에서는 CES의 출력을 이용하여 CVR을 통한 소비전력 저감을 목적으로 하는 CES 출력과 OLTC 동작의 협조 제어방안을 제안한다. 즉, 하루 전 예측된 부하를 바탕으로 Matpower를 이용하여 CES의 유효전력 및 무효전력의 출력과 OLTC의 동작을 스케줄링 함으로써 계통손실 및 부하전력을 감소시키는 것이다. 또한 제안된 협조 제어방안을 검증하기 위해 모의 계통을 구성하고 사례연구를 통해 그 효과를 검증하였다.

주요어: Community energy storage, Conservation voltage reduction, 계통손실, 부하전력, CES 출력 스케줄링, Matpower

학 번: 2014-21628

목 차

초록	i
목차	ii
표 목차	iv
그림 목차	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 연구 내용	1
1.2 논문의 구성 및 개요	3
제 2 장 CES 출력 스케줄링을 통한 소비전력 최소화	5
2.1 CES 출력 스케줄링의 타당성	5
2.2 CES 출력 제어 효과의 이론적 분석	6
2.2.1 CES 출력을 이용한 계통전압 제어 및 유효전력 손실 감소	7
2.2.2 Conservation Voltage Reduction	12
제 3 장 Matpower를 이용한 CES 출력 스케줄링	15
3.1 문제의 정식화	15
3.1.1 목적 함수	16
3.1.2 제약 조건	17
3.2 CES 출력 스케줄링을 위한 Matpower	19

제 4 장 사례 연구	21
4.1 모의 계통 구성.....	21
4.2 사례 연구 결과.....	26
제 5 장 결론	32
참고 문헌	34
Abstract.....	37

표 목차

표 1 Residential, community, distributed ESS의 비교	2
표 2 모의 계통 구성요소.....	22
표 3 시간에 따른 계통 전체의 부하.....	23
표 4 시간에 따른 태양광 발전의 출력	25
표 5 CES와 OLTC의 스케줄링 결과.....	27

그림 목차

그림 1 CES가 연계된 방사형 배전계통	7
그림 2 전압에 따른 부하의 변화.....	12
그림 3 사례 연구를 위한 모의 계통	21
그림 4 시간에 따른 전체 부하의 변동 추이.....	24
그림 5 CES가 연계된 모선의 시간에 따른 부하의 변동 추이.....	24
그림 6 태양광 발전의 시간에 따른 출력의 변동 추이.....	25
그림 7 사례 연구를 위한 비교 대상 계통	26
그림 8 부하가 가장 많은 시간에서의 모선 별 전압.....	28
그림 9 부하가 가장 적은 시간에서의 모선 별 전압.....	28
그림 10 OLTC의 TAP 위치	29
그림 11 ESS 및 CES의 유효전력 출력.....	30
그림 12 CES 별 유효전력 출력	31
그림 13 ESS 및 CES의 무효전력 출력.....	31

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 연구 내용

신재생에너지원은 규모가 작고 출력 전압이 낮기 때문에 배전계통에 직접 연계되고 있다[1]. 이에 따라 신재생에너지원의 원활한 계통 연계를 위해 energy storage system (ESS)이 배전계통에 분산되어 설치되고 있다. 배전계통에 분산되어 있는 ESS는 신재생에너지원의 간헐적인 출력을 완화시켜 줄 뿐만 아니라 계통전압 제어, 주파수 조정을 위한 예비전력 공급 및 수요반응 등에 활용 가능하다 [2-3]. 이와 더불어 계통 사고 발생 시 예비전력을 공급하여 계통의 신뢰도를 향상시키며 피크전력 감소를 통하여 계통 운영의 경제성 향상 및 장비 노후화를 방지하는데 도움을 준다 [4].

최근에는 가정용 태양광 패널 등과 같은 소규모 신재생에너지원이 소비자에게 가까워짐에 따라 ESS 역시 소비자 가까이 위치한 community energy storage (CES)의 형태로 설치되고 있다 [5]. CES는 배전용 변압기의 2차 측에 설치되어 소규모 부하를 담당하는 소용량의 분산된 ESS이다. 표 1은 CES와 기존의 다른 ESS와의 차이를 보여준다. CES는 기존의 ESS 대비 소비자에 가까이 위치하므로 사고에 대한 신뢰성이 높으며 소비자가 보유한 신재생에너지원과의 연계에 효율적이다. 또한 계통에 더 넓게 분산되어 있으므로 계통전압 제어에 유리하며 용량이 작기 때문에 고장 발생 시 계통에 미치는 영향이 작고 유지비용이 적게 드는 장점이 있다 [5-7]. [8]에서는 태양광 발전이 연계된 배전계통에서 피크전력 감소를 위한 CES의 운영방안에 대해 연구하였으며 이와

유사하게 [9]에서는 계통의 부하 평준화와 함께 피크전력 감소를 목적으로 하는 CES 출력의 최적화 기법을 제시하고 있다. [10]에서는 미리 예측한 부하와 가격정보를 이용하여 CES의 운영 이익을 최대화 하는 기법으로 CES를 통한 경제적 이득을 얻을 수 있음을 보이고 있다. 또한 간헐적인 태양광 발전의 출력으로 인한 계통전압의 변동을 CES를 이용하여 최소화하는 연구가 진행되었다 [11].

한편 계통에 분산되어 있는 CES는 conservation voltage reduction (CVR)에 활용 가능하다. CVR은 전압 제어의 한 형태로 계통 내의 전체 에너지 사용량을 줄이기 위한 운영 기법이다. CVR은 부하가 소모하는 유효전력 및 무효전력이 전압이 낮을수록 줄어드는 특징을 이용하는 것으로 CVR을 통하여 계통의 전압을 낮게 유지함으로써 유효전력의 수요를 줄일 수 있다. 기존의 CVR은 feeder의 step voltage regulator (SVR), shunt capacitor (ShC)와 변압기의 on load tap changer (OLTC)를 사용하여 지역 별로 다른 계통의 전압을 평탄하게 만들어 CVR의 효과를 높이고 있다. CES는 계통에 분산되어 있으며 출력을 이용한 전압 제어가 가능하므로 CES를 계통전압 평탄화에 이용한다면 부가적으로 CVR의 효과를 높일 수 있다.

표 1 Residential, community, distributed ESS의 비교 [6]

	Residential	Community	Distributed
Scale	~20 kWh	Tens to hundreds kWh	MWh scale
Location	Single home	Distribution transformer	Substation
Owner	Customer	Operator	Operator
Application	Load shifting, PV energy time shift	Frequency regulation, Stability, Peak shaving, Load shifting, PV energy time shift	Frequency regulation, Stability, Peak shaving

이에 본 논문에서는 OLTC로 전압이 제어되고 있는 배전계통에 CES가 연계되는 경우를 고려한다. 그리고 CES의 유효전력 및 무효전력의 출력으로 계통 연계지점의 전압을 제어할 수 있는 능력을 이용하여 CVR을 통한 소비전력, 즉 계통손실과 부하전력을 감소시키기는 협조 제어방안을 제안한다. 이 때 배전계통의 모든 모선의 전압을 규정 범위 내에서 유지하고 전 스케줄링 구간에 대해 CES의 SOC (State of Charge) 및 출력을 적정 범위로 유지함은 물론, 계통에 ESS가 단일로 연계된 경우 보다 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것을 목적으로 하는 CES의 유효전력 및 무효전력 출력과 OLTC 동작의 협조 제어방안을 수립하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 Matpower의 Interior point solver를 사용하였다.

마지막으로 본 논문에서 제안한 협조 제어방안이 기존의 단일 ESS와 OLTC의 협조 제어방안에 비해 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것을 검증하기 위해 사례 연구를 진행하였다. OLTC로 전압이 제어되는 배전계통에 CES를 연계한 뒤 Matpower를 이용하여 CES의 최적 출력 스케줄을 도출하였다. 이 때의 계통손실과 부하전력을 측정함으로써 본 논문의 제안이 타당함을 증명하였다.

1.2 논문의 구성 및 개요

본 논문은 OLTC가 전압을 제어하고 있는 배전계통에 CES가 연계되는 상황을 고려한다. 예측된 부하를 바탕으로 계통손실과 부하전력을 감소시키기 위한 CES의 출력 및 OLTC 동작의 스케줄링을 제안하였다.

제 1장에서는 본 논문의 연구 배경 및 연구 내용, 그리고 논문의

구성과 개요에 대해 살펴보았다.

제 2장에서는 CES의 유효전력 및 무효전력의 출력을 스케줄링 함으로써 계통전압을 제어하는데 필요한 조건들의 타당성을 검토하고 제어방안의 효과에 대한 이론적인 분석을 수행하였다.

제 3장에서는 Matpower를 이용하여 CES의 출력과 OLTC의 동작을 스케줄링 하는 방안에 대해 설명하였다.

제 4장에서는 본 논문에서 제안한 CES 제어방안의 타당성을 검증하기 위해 계통을 구성하고 사례연구를 진행하였으며 그 결과에 대해 논의하였다.

제 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 발전 방향에 대해 기술하였다.

제 2 장 CES 출력 스케줄링을 통한 소비전력 최소화

2.1 CES 출력 스케줄링의 타당성

배전계통의 부하를 하루 전에 예측하고 이를 바탕으로 CES의 출력을 스케줄링 함으로써 계통의 손실과 부하전력을 감소시키고 계통의 전압을 제어하기 위해서 필요한 조건들은 다음과 같다.

- 하루 전 부하 예측은 상당히 정확하게 이루어진다.
- 계통 운영자는 상위 제어 시스템을 이용하여 CES의 출력 및 OLTC의 동작을 제어할 수 있다.
- 계통 부하의 ZIP 계수를 알고 있다.

실제 계통의 부하는 시간에 따라 불규칙적으로 변동하는 특성을 가지고 있다. 하지만 부하의 변동에 크게 영향을 미치는 요소는 기온 및 습도와 같은 날씨 요소이기 때문에 특정 지역의 부하 변동은 계절별로 비슷한 패턴을 가지고 있다 [12]. 또한 부하의 대부분이 산업용 또는 가정용 부하일 경우 거의 비슷한 부하 패턴을 갖는다. 따라서 현대 대부분의 계통 운영자들은 평균적으로 약 2~3% 내의 오차 범위 내에서 부하를 정확하게 예측할 수 있다 [13].

국내·외 여러 계통 운영자는 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)와 같은 장비를 이용하여 OLTC의 동작을 제어하고 있다.

이를 통해 OLTC는 계통전압에 따라 자동으로 운전되거나 계통 운영자에 의해 수동으로 운전된다. 이러한 중앙 제어 시스템에 통신 설비를 접목하여 계통에 분산되어 있는 CES를 계층적으로 제어할 수 있다 [14].

계통의 부하는 계통전압에 의한 특성에 따라 정전력 부하, 정전류 부하 및 정임피던스 부하로 구성되며 ZIP 계수를 이용하여 각 부하의 비율을 나타낼 수 있다. 계통의 부하를 모델링 하기 위한 ZIP 계수는 계통의 왜란에 대한 반응을 측정하거나 실험을 통하여 구할 수 있다 [15-16].

이처럼 계통 운영자는 위에서 나열한 조건들을 큰 무리 없이 충족시킬 수 있다. 따라서 계통손실 및 부하전력을 감소시키고 계통의 전압을 규정 범위 내에서 유지하기 위한 CES의 충·방전 스케줄링을 수행할 수 있다.

2.2 CES 출력 제어 효과의 이론적 분석

다음으로 기본적인 배전계통에 CES를 연계하여 계통전압 식을 유도하고 이를 통하여 CES의 유효전력과 무효전력의 출력을 제어함으로써 계통의 전압을 제어함은 물론 계통에서 발생하는 유효전력의 손실까지 감소시킬 수 있음을 이론적으로 증명한다. 또한 계통전압을 제어함으로써 얻을 수 있는 효과들 중 CVR에 대해 설명한다.

2.2.1 CES 출력을 이용한 계통전압 제어 및 유효전력 손실 감소

그림 1은 이론적인 분석을 위하여 본 논문에서 구성한 간단한 배전계통이다. OLTC와 CES를 이용하여 계통전압을 제어할 수 있으며 이때 CES는 유효전력과 무효전력의 출력을 제어하여 계통전압을 조정한다. OLTC는 변압기의 1차측에 설치되어 2차측에 연결된 계통의 전압을 전체적으로 조정한다.

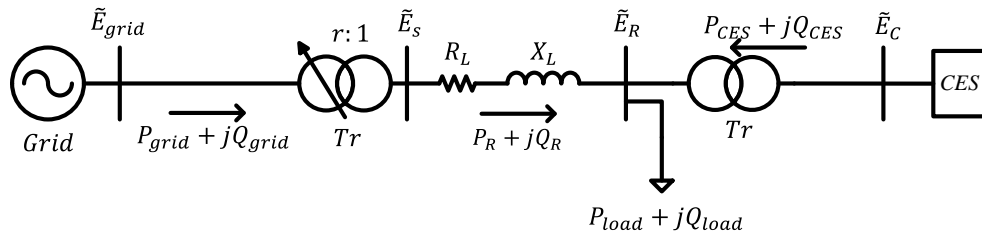


그림 1 CES가 연계된 방사형 배전계통

계통의 전압은 정격전압 근처에서 변동한다고 가정하여 계통운영자가 요구하는 유효전력 및 무효전력을 CES가 공급 및 흡수할 수 있도록 한다. 수학적 분석을 간단히 하기 위해서 부하는 정전력 부하로만 이루어져 있다고 가정한다. 또한 변압기의 동손은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다.

그림 1에서 사용되는 변수들은 다음과 같으며 그림 1에서 화살표의 방향은 변수들의 양의 방향을 의미한다.

\tilde{E}_{grid} : 변압기 1차측 모선 전압

\tilde{E}_S : 배전계통의 송전단 전압

\tilde{E}_R : 배전계통의 수전단 전압

\tilde{E}_C : CES가 연계된 모선의 전압

P_{grid}, Q_{grid} : 송전계통에서 배전계통으로 공급하는 유·무효전력

P_{load}, Q_{load} : 부하가 요구하는 유·무효전력

P_R, Q_R : 배전계통의 수전단이 배전 선로를 통해 공급받는 유·무효전력

P_{CES}, Q_{CES} : CES가 배전계통에 공급하거나 흡수하는 유·무효전력

R_L, X_L : 배전 선로의 등가 저항 및 등가 임피던스

X_{Tr} : 변압기의 등가 임피던스

r : 변압기의 권선비

그림 1의 배전계통에서 송전단 및 수전단의 전압과 유효전력의 손실을 CES의 유효전력 및 무효전력의 함수로 표현하기 위해서 다음과 같은 계산 과정이 필요하다.

우선, 배전 선로를 통해 송전단에서 수전단으로 흐르는 전류 \tilde{I}_R 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{I}_R = \left(\frac{P_R + jQ_R}{\tilde{E}_R} \right)^* = \frac{P_R - jQ_R}{E_R} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 송전단 전압 \tilde{E}_S 를 나타내면 다음과 같다.

$$\tilde{E}_S = \tilde{E}_R + (R_L + jX_L)\tilde{I}_R = E_R + R_L \frac{P_R}{E_R} + X_L \frac{Q_R}{E_R} + j(X_L \frac{P_R}{E_R} - R_L \frac{Q_R}{E_R}) \quad (2)$$

\tilde{E}_S 를 실수부와 허수부로 나누면 식 (3-4)와 같다.

$$E_S \cos \delta = E_R + R_L \frac{P_R}{E_R} + X_L \frac{Q_R}{E_R} \quad (3)$$

$$E_S \sin \delta = X_L \frac{P_R}{E_R} - R_L \frac{Q_R}{E_R} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 제곱하여 더하면 다음과 같고,

$$E_S^2 = E_R^2 + 2(R_L P_R + X_L Q_R) + \frac{(R_L^2 + X_L^2)(P_R^2 + Q_R^2)}{E_R^2} \quad (5)$$

이를 E_R 에 대해 정리하면 식 (6)과 같다.

$$E_R^4 + \{2(R_L P_R + X_L Q_R) - E_S^2\}E_R^2 + (R_L^2 + X_L^2)(P_R^2 + Q_R^2) = 0 \quad (6)$$

식 (6)에 근의 공식을 적용하여 식 (7)과 같이 E_R 을 구할 수 있다.

$$E_R = \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (7)$$

$$A = 1, B = -E_S^2 + 2(R_L P_R + X_L Q_R), C = (R_L^2 + X_L^2)(P_R^2 + Q_R^2) \quad (8)$$

변압기를 통해 배전계통의 송전단으로 흐르는 전류 \tilde{I}_S 를 이용하여 변압기의 2차측 전압을 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{I}_S = \tilde{I}_R \quad (9)$$

$$\frac{\tilde{E}_{grid}}{r} = \tilde{E}_S + jX_{Tr}\tilde{I}_S = \tilde{E}_S + jX_{Tr}\left(\frac{P_R - jQ_R}{E_R}\right) \quad (10)$$

식 (10)을 실수부와 허수부로 분리하면 다음과 같고,

$$\frac{E_{grid} \cos \phi}{r} = E_S \cos \delta + X_{Tr} \frac{Q_R}{E_R} \quad (11)$$

$$\frac{E_{grid} \sin \phi}{r} = E_S \sin \delta + X_{Tr} \frac{P_R}{E_R} \quad (12)$$

식 (11-12)를 E_S 에 대해 정리하면 식 (13-14)와 같다.

$$E_S \cos \delta = \frac{E_{grid} \cos \phi}{r} - X_{Tr} \frac{Q_R}{E_R} \quad (13)$$

$$E_S \sin \delta = \frac{E_{grid} \sin \phi}{r} - X_{Tr} \frac{P_R}{E_R} \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)를 제곱하여 더하면 식 (15)와 같이 E_S 를 구할 수 있다.

$$E_S = \sqrt{\left(\frac{E_{grid}}{r}\right)^2 - \frac{2E_{grid}X_{Tr}}{rE_R}(Q_R \cos \phi + P_R \sin \phi) + \frac{X_{Tr}^2}{E_R^2}(P_R^2 + Q_R^2)} \quad (15)$$

배전 선로에서 발생하는 유효전력의 손실은 식 (16)과 같이 P_R 과 Q_R 의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{loss} = |\tilde{I}_R|^2 R_L = \left| \frac{P_R - jQ_R}{E_R} \right|^2 R_L \quad (16)$$

여기서 P_R 과 Q_R 은 식 (17)과 같이 계통의 부하와 CES의 출력으로 나타낼 수 있다.

$$P_R + jQ_R = (P_{load} + P_{CES}) + j(Q_{load} + Q_{CES}) \quad (17)$$

식 (17)과 같이 P_R 과 Q_R 은 P_{CES} 와 Q_{CES} 에 의해 결정되므로 송전단과 배전단의 전압 및 유효전력의 손실은 식 (18-20)과 같이 P_{CES} 와 Q_{CES} 및 OLTC의 tap에 의해 결정된다.

$$E_R = f_1(P_R, Q_R) = f_2(P_{CES}, Q_{CES}, tap) \quad (18)$$

$$E_S = g_1(P_R, Q_R) = g_2(P_{CES}, Q_{CES}, tap) \quad (19)$$

$$P_{loss} = h_1(P_R, Q_R) = h_2(P_{CES}, Q_{CES}, tap) \quad (20)$$

따라서 CES의 유효전력 및 무효전력의 출력과 OLTC의 동작으로 배전계통의 송전단과 수전단의 전압 및 계통에서 발생하는 유효전력의 손실을 제어할 수 있다.

2.2.2 Conservation Voltage Reduction

2.2.1의 식 (18-19)에서 알 수 있듯이 CES의 유효전력과 무효전력의 출력을 제어하여 배전계통의 전압을 조정할 수 있다. 이를 이용하여 CES를 CVR에 이용할 수 있다.

부하가 소모하는 유효전력 및 무효전력은 계통의 전압에 의해 달라진다. 이러한 특성에 따라 부하는 정전력 부하 (constant power load), 정전류 부하 (constant current load), 정임피던스 부하 (constant impedance load)로 구분된다. 정전력 부하는 계통전압과 관계없이 일정한 전력을 소모하며 정전류 부하와 정임피던스 부하는 그림 2와 같이 계통전압이 낮아짐에 따라 소모하는 전력이 줄어든다. 계통의 부하는 식 (21-22)와 같이 정전력 부하, 정전류 부하, 정임피던스 부하의 비율을 ZIP 계수로 나타낼 수 있다.

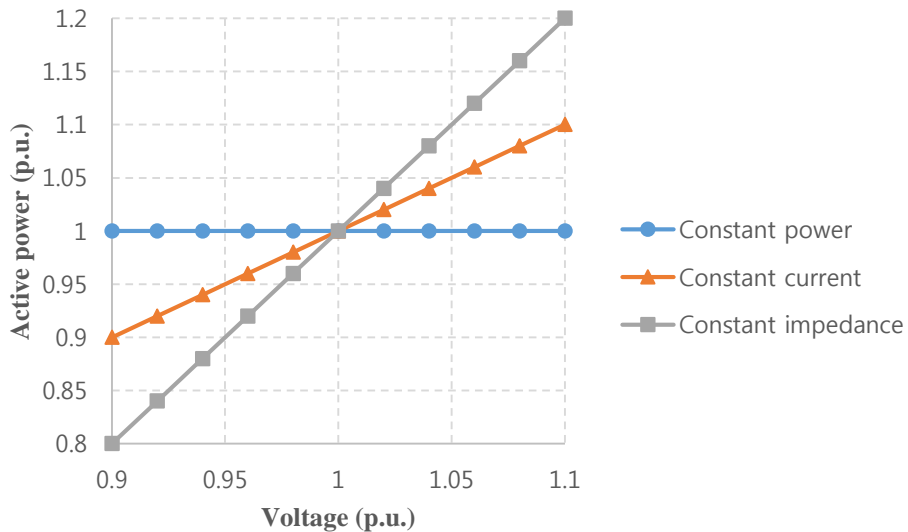


그림 2 전압에 따른 부하의 변화

$$P = P_0 \left(Z_p \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 + I_p \frac{V_i}{V_0} + P_p \right) \quad (21)$$

$$Q = Q_0 \left(Z_q \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 + I_q \frac{V_i}{V_0} + P_q \right) \quad (22)$$

V_i : 모선 i에서의 전압

V_0 : 계통의 정격전압

P : 부하가 소모하는 유효전력

Q : 부하가 소모하는 무효전력

P_0 : 정격전압에서 부하가 소모하는 유효전력

Q_0 : 정격전압에서 부하가 소모하는 무효전력

Z_p, I_p, P_p : 부하의 유효전력 ZIP 계수

Z_q, I_q, P_q : 부하의 무효전력 ZIP 계수

CVR은 이러한 부하의 특성을 이용하여 계통전압을 허용하는 범위 내에서 낮은 수준으로 유지함으로써 부하의 소모 전력을 줄이는 기법이다. CVR은 1973년 American Electric Power System (AEP)에 의해 최초로 실제 계통에 적용되었다 [18]. 이를 시작으로 많은 계통에 CVR이 적용되었으며 적용된 CVR의 효과를 분석한 결과 계통의 전압을 1% 줄였을 때 부하전력의 0.3-1%가 줄어드는 것으로 나타났다. [19]에 따르면 미국 전역에 CVR을 적용하면 연간 소모 전력의 3.04%를 줄일 수 있다. 또한 CVR은 피크전력을 줄일 수 있으며 [20]의 결과에서는 전압을 1% 줄였을 때 피크전력의 1.1%가 줄어드는 것을 보여준다.

기존의 CVR은 on-load tap changer (OLTC), step voltage regulator (SVR), shunt capacitor (ShC)를 사용하여 전압을 제어하였다. OLTC는 변전용 변압기의 권선비를 조정하여 변압기의 2차측 전압을 조정한다.

배전계통은 변전용 변압기의 2차측에 연결되어 있으므로 OLTC의 tap 위치에 따라 배전계통의 전압을 제어할 수 있다. SVR은 배전계통에 위치한 단권 변압기로 SVR 하위 계통의 전압을 제어한다. ShC는 배전선로에 병렬로 연결된 커패시터로 무효전력 보상을 통해 전압을 제어한다. SVR과 ShC는 계통에 분산되어 위치하여 지역별로 다른 전압을 비슷한 레벨로 만들고 OLTC를 통하여 계통전압을 낮게 유지함으로써 계통에 CVR을 적용한다. CES는 SVR과 ShC와 같이 계통에 분산되어 있으며 2.2.1에서 보았듯이 계통의 전압을 제어할 수 있다. 따라서 CES는 신재생에너지원과의 연계뿐만 아니라 부가적으로 CVR의 적용에 이용할 수 있다.

제 3 장 Matpower를 이용한 CES 출력 스케줄링

3.1 문제의 정식화

본 논문에서는 CES의 출력과 함께 OLTC의 동작을 스케줄링 하기 위해서 Matpower를 사용하였다. Matpower는 조류계산 및 최적 조류계산의 해를 도출하는 Matlab code이며 목적함수 및 제약조건을 간편하게 정의할 수 있다.

Matpower를 이용하여 CES의 출력 및 OLTC 동작의 최적 스케줄링을 도출하기 위해서 목적 함수 및 제약 조건들을 결정해야 한다.

이를 위해 사용되는 용어 및 변수들을 정의하면 다음과 같다.

P_{Loss}^h : 시간 h에서 계통에서 발생한 유효전력 손실

tap^h : 시간 h에서 OLTC의 tap 위치

tap_{max}, tap_{min} : OLTC tap 위치의 최대값 및 최소값

V_k^h : 시간 h에서 모선 k의 전압 크기

V_{max}, V_{min} : 계통 허용 전압의 최대값 및 최소값

$P_{CES,i}^h$: 시간 h에서 CES i의 유효전력 출력

$Q_{CES,i}^h$: 시간 h에서 CES i의 무효전력 출력

SOC_i^h : 시간 h에서 CES i의 충전상태

$P_{CES,max}, P_{CES,min}$: CES의 유효전력 출력의 최대값 및 최소값

SOC_{max}, SOC_{min} : CES 충전상태의 최대값 및 최소값

Z_p, I_p, P_p : 부하의 유효전력 ZIP 계수

Z_q, I_q, P_q : 부하의 무효전력 ZIP 계수

P_k^h : 시간 h 에서 모선 k 에 주입된 유효전력

Q_k^h : 시간 h 에서 모선 k 에 주입된 무효전력

$P_{G,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 유효전력 발전량

$Q_{G,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 무효전력 발전량

$P_{L,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 유효전력 부하

$Q_{L,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 무효전력 부하

$P_{LO,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 정격전압에서의 유효전력 부하

$Q_{LO,k}^h$: 시간 h 에서 모선 k 의 정격전압에서의 무효전력 부하

N : 하루 동안 스케줄링이 결정되는 시간 간격의 수

B_N : 배전계통을 이루는 모선의 수

C_N : 배전계통에 연계된 CES의 수

3.1.1 목적 함수

본 논문의 목적은 CES가 연계된 배전계통에서 시간에 따라 부하가 변동하고 있을 때, 계통전압을 적정 범위 내에서 유지하면서 CVR을 이용하여 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것이다. 이를 위하여 OLTC, SVR, ShC를 이용하여 전압을 제어하는 기존의 CVR 운영과는 달리 본 논문에서는 OLTC와 함께 CES의 유효전력과 무효전력의 출력을 이용할 것을 제안한다. 따라서 목적함수는 N 번의 스케줄이 생성되는 동안 계통의 부하전력 및 계통손실의 합을 최소화 하는 것으로 식 (23)과 같다.

$$J = \text{Min} \left(\sum_{h=1}^N \sum_{k=1}^{B_N} P_{L,k}^h + P_{Loss}^h \right) \quad (23)$$

3.1.2 제약 조건

위 목적 함수를 만족시키는 최적해를 찾기 위해 만족시켜야 할 제약 조건은 다음과 같다.

먼저 계통전압 유지 규정 및 OLTC의 동작 제약은 배전계통의 운영 기준에 근거하여 식 (24), (25)와 같이 주어진다.

$$V_{min} \leq V_k^h \leq V_{max} \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k = 1, 2, \dots, B_N \quad (24)$$

$$tap_{min} \leq tap^h \leq tap_{max} \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

CES의 출력과 SOC의 최대값 및 최소값은 CES 제조사가 권장하는 값에 근거하여 식 (26), (27)과 같이 주어진다. CES의 무효전력의 출력은 식 (28)과 같이 CES 출력의 최대값 $S_{CES,max}$ 와 유효전력의 출력 P_{CES} 에 의해 최대값과 최소값이 결정된다. 식 (29)는 CES의 유효전력 출력과 SOC 사이의 관계를 나타낸다. 시구간 h 와 $h+1$ 의 SOC차이는 시구간 h 에서의 CES 출력에 의해 변동한 SOC이므로 이를 CES의 출력으로 환산하기 위해 비례계수 c 를 사용하였다. 또한 다음 주기의 스케줄링을 위해 식 (30)과 같이 스케줄링 종료 시의 SOC를 스케줄링 시작 시의 SOC와 같은 값으로 유지하였다.

$$P_{CES,min} \leq P_{CES,i}^h \leq P_{CES,max} \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } i = 1, 2, \dots, C_N \quad (26)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_i^h \leq SOC_{max} \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } i = 1, 2, \dots, C_N \quad (27)$$

$$-\sqrt{S_{CES,max}^2 - P_{CES,i}^h{}^2} \leq Q_{CES,i}^h \leq \sqrt{S_{CES,max}^2 - P_{CES,i}^h{}^2} \quad (28)$$

for $h = 1, 2, \dots, N$ and $i = 1, 2, \dots, C_N$

$$SOC_i^{h+1} - SOC_i^h + P_{CES,i}^h \times c = 0 \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } i = 1, 2, \dots, C_N \quad (29)$$

$$SOC_i^1 - SOC_i^{N+1} = 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, C_N \quad (30)$$

식 (31-34)은 각 모선의 조류계산 제약 조건으로, 식 (31-32)는 CES가 연계되지 않은 모선에 대한 조류계산 제약 조건이며 식 (33-34)는 CES가 연계된 모선에 대한 조류계산 제약 조건이다.

$$P_k^h - P_{G,k}^h + P_{L,k}^h = 0 \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k \notin \text{CES} \quad (31)$$

$$Q_k - Q_{G,k} + Q_{L,k} = 0 \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k \notin \text{CES} \quad (32)$$

$$P_k^h - P_{G,k}^h + P_{L,k}^h - P_{CES,i}^h = 0 \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k \in \text{CES} \quad (33)$$

$$Q_k^h - Q_{G,k}^h + Q_{L,k}^h - Q_{CES,i}^h = 0 \text{ for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k \in \text{CES} \quad (34)$$

마지막으로 식 (35-36)은 CVR을 적용하기 위한 계통 부하 모델의 제약 조건이다.

$$P_{L,k}^h - P_{L0,k}^h \left(Z_p \left(\frac{V_k^h}{V_0} \right)^2 + I_p \frac{V_k^h}{V_0} + P_p \right) = 0 \quad (35)$$

$$\text{for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k = 1, 2, \dots, B_N$$

$$Q_{L,k}^h - Q_{L0,k}^h \left(Z_q \left(\frac{V_k^h}{V_0} \right)^2 + I_q \frac{V_k^h}{V_0} + P_q \right) = 0 \quad (36)$$

$$\text{for } h = 1, 2, \dots, N \text{ and } k = 1, 2, \dots, B_N$$

3.2 CES 출력 스케줄링을 위한 Matpower

식 (23)의 목적 함수와 제약 조건을 만족하는 CES의 출력 및 OLTC의 최적 협조 스케줄을 도출하기 위해서 본 논문에서는 Matpower에서 제공하는 Interior point solver를 사용하였다. Interior point solver는 일반적인 비선형 최적화 문제의 해를 구하는데 사용되며 식 (38-39)와 같은 제약 조건을 가지는 식 (37)의 해를 도출해낸다.

$$\min_x f(x) \quad (37)$$

$$g(x) = 0 \quad (38)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (39)$$

Interior point solver를 통해 최적해를 도출하기 위해서는 목적함수 $f(x)$ 와 제약 조건 $g(x), h(x)$ 의 gradient인 $\nabla f(x), \nabla g(x), \nabla h(x)$ 와 함께 라그랑지언 함수 $\mathcal{L}(x, \lambda, \mu)$ 의 hessian인 $\nabla^2 \mathcal{L}$ 이 필요하다.

$$\mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) \quad (40)$$

λ, μ : 라그랑지언 승수

본 논문에서 Interior point solver를 사용하기 위해 필요한 값인 $\nabla f(x), \nabla g(x), \nabla h(x)$ 및 $\nabla^2 \mathcal{L}$ 를 구하기 위해 필요한 변수는 식 (41)과 같다. 변수 x 는 모든 시구간에 대한 CES의 유효전력과 무효전력의 출력 및 SOC, OLTC tap의 위치, 모선 전압의 크기 및 위상, 모선의 발전량 및 부하를 나타내며 CES의 출력과 tap의 위치가 제어변수, 나머지 변수들은

제어변수에 의해 결정되는 종속변수가 된다. Interior point solver를 사용하여 도출한 최적해를 시간 순서대로 나열하면 본 논문이 제안하는 CES의 출력 및 OLTC의 tap위치의 최적 스케줄을 얻을 수 있다.

$$x = [P_{CES,i}^h, Q_{CES,i}^h, SOC_i^h, tap^h, V_k^h, \theta_k^h, P_{G,k}^h, Q_{G,k}^h, P_{L,k}^h, Q_{L,k}^h]^T \quad (41)$$

제 4 장 사례 연구

4.1 모의 계통 구성

본 논문에서 제안한 CES와 OLTC간의 협조 스케줄링에 의해 계통손실과 부하전력이 감소되는 것을 검증하기 위해 IEEE 13 test 모선 계통을 참고하여 그림 3과 같은 배전계통을 구성하였다. 모의 계통은 13개의 모선으로 이루어져 있으며 송전계통과 배전계통을 구분하는 변압기에 설치된 OLTC는 총 32 tap으로 이루어져 있다. OLTC는 2번 모선의 전압을 조정하여 배전계통의 전체 모선 전압을 조정한다.

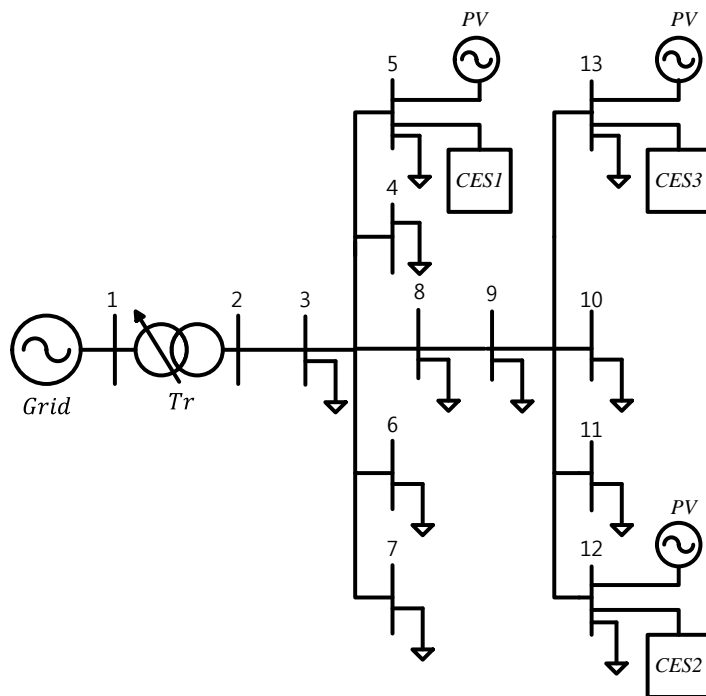


그림 3 사례 연구를 위한 모의 계통

모의 계통의 5번, 12번, 13번 모선에는 태양광 발전과 CES가 연계되어 있다. CES는 모선의 배전용 변압기의 2차측에 4개씩 설치되어 있다. 각 CES의 용량과 최대 출력은 [16]을 참고하여 결정하였으며 용량은 50 kWh이고 최대 출력은 25 kW이다. CES의 초기 SOC는 0.6이며 수명을 위해 SOC는 0.3-0.9를 유지하도록 하였다. 태양광 발전의 최대 출력은 0.1 MW이다.

또한 본 논문에서는 매 시간 단위로 부하 예측이 이루어진다고 가정하였다. 부하는 정전력 부하, 정전류 부하, 정임피던스 부하로 구성되어 있으며 [21]을 참고하여 산업용 부하와 주거용 부하의 ZIP 계수를 결정하였다.

표 2는 모의 계통에 사용된 선로, 전압 제어기기, 부하 및 CES의 파라미터들을 보여준다.

표 2 모의 계통 구성요소

Distribution lines	Modified IEEE 13-bus test system
Transformer	115/4.16 kV, 5 MVA, x=8%, r=1%
OLTC	At HV side, -10% to 10% regulation with 32 steps
Loads	$Z_{IP_{residential}} : Z_p = 1.5, I_p = -2.31, P_p = 1.81$ $Z_q = 7.41, I_q = -11.97, P_q = 5.55$ $Z_{IP_{industrial}} : Z_p = 1.21, I_p = -1.61, P_p = 1.41$ $Z_q = 4.35, I_q = -7.08, P_q = 3.72$
CESs	Rated power : 25 kW Capacity : 50 kWh Efficiency : 100% Maximum SOC : 0.9 Minimum SOC : 0.3 Initial SOC : 0.6

모의 계통의 부하는 모선 별로 산업용 부하와 주거용 부하로 구성되어 있으며 시간에 따른 전체 부하의 유효전력은 표 3과 같다. 전체 부하의 변동 추이는 그림 4와 같으며 21시에 최대값, 5시에 최소값을 가진다. 그림 5는 CES가 연계된 모선의 부하 변동 추이를 보여준다. 5번 모선은 주거용 부하로 구성되어 있으며 12번, 13번 모선의 부하는 산업용 부하로 구성되어 있다.

표 3 시간에 따른 계통 전체의 부하

Time [hour]	Load [MW]	Time [hour]	Load [MW]
1	1.0084	13	1.0976
2	0.9142	14	1.1374
3	0.8604	15	1.1539
4	0.8209	16	1.1335
5	0.8142	17	1.1551
6	0.8361	18	1.1909
7	0.9712	19	1.223
8	1.0973	20	1.2435
9	1.1809	21	1.2747
10	1.1751	22	1.2595
11	1.1613	23	1.215
12	1.1373	24	1.131

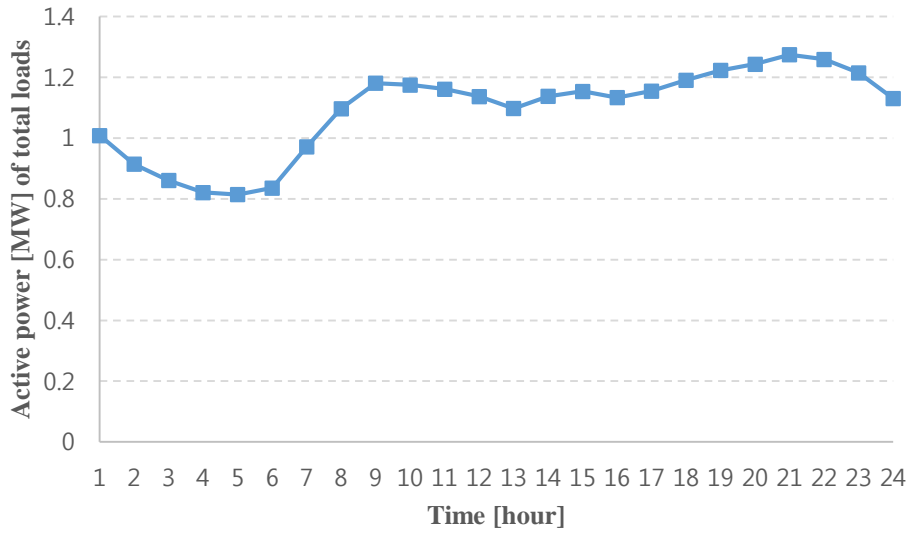


그림 4 시간에 따른 전체 부하의 변동 추이

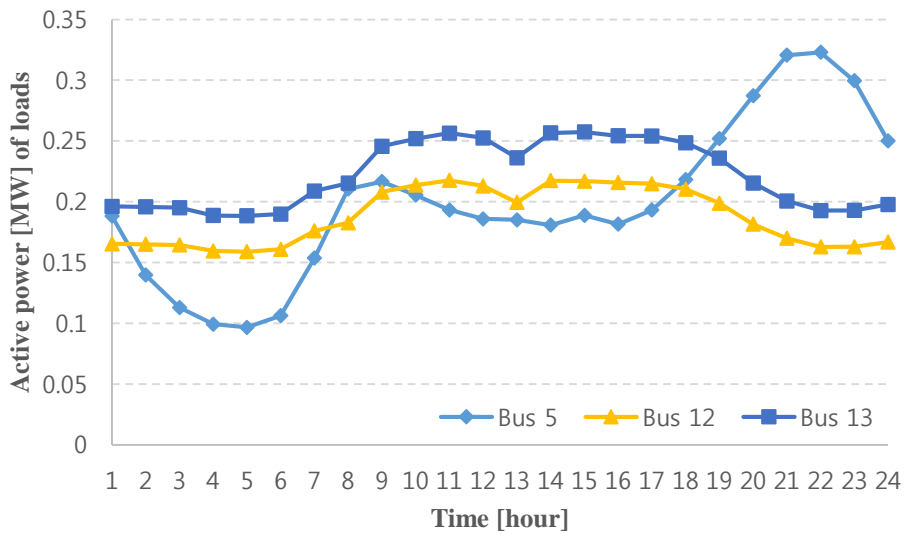


그림 5 CES가 연계된 모선의 시간에 따른 부하의 변동 추이

그림 6은 모의 계통에 연계된 태양광 발전의 시간에 따른 출력의 추이를 보여준다. 이 값은 스케줄링을 위해 예측된 값으로 태양광 발전의 시간 별 출력 값은 표 4와 같다.

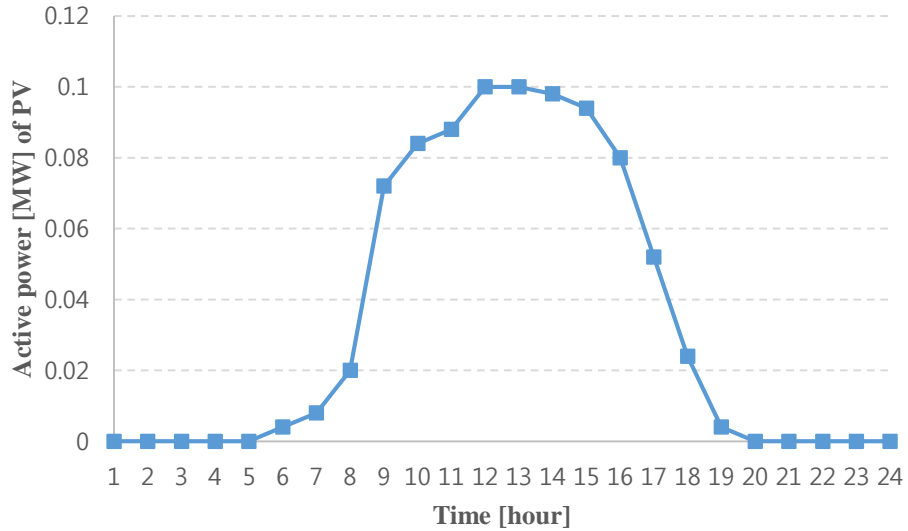


그림 6 태양광 발전의 시간에 따른 출력의 변동 추이

표 4 시간에 따른 태양광 발전의 출력

Time [hour]	PV [MW]	Time [hour]	PV [MW]	Time [hour]	PV [MW]
1	0	9	0.072	17	0.052
2	0	10	0.084	18	0.024
3	0	11	0.088	19	0.004
4	0	12	0.1	20	0
5	0	13	0.1	21	0
6	0.004	14	0.098	22	0
7	0.008	15	0.094	23	0
8	0.02	16	0.08	24	0

4.2 사례 연구 결과

본 논문의 사례 연구에서는 CES의 출력과 OLTC의 협조 제어방안이 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것을 검증하기 위해 다음의 두 가지 경우를 비교하였다. 배전계통에 단일로 연계되어 있는 ESS가 OLTC와 협조제어를 통해 계통전압을 제어하는 경우와 본 논문에서 제안하는 것과 같이 배전계통에 분산되어 있는 다수의 CES가 OLTC와 협조제어를 통해 계통전압을 제어하는 경우이다. 이때 단일 ESS의 용량과 최대 출력은 각 CES의 용량과 최대 출력의 합과 같으며 ESS가 연계된 지점은 사례 연구를 통해 계통손실과 부하전력을 가장 많이 감소시키는 지점인 13번 모선으로 결정하였으며 해당 계통은 그림 7과 같다.

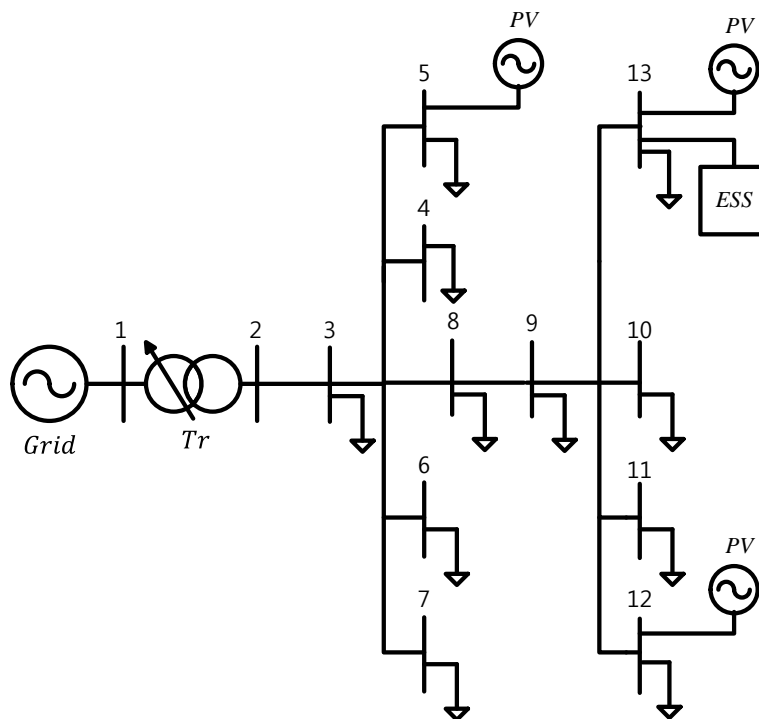


그림 7 사례 연구를 위한 비교 대상 계통

표 5 CES와 OLTC의 스케줄링 결과

Case	Case 1	Case 2	Case1 - Case2	$\frac{\text{Case1} - \text{Case 2}}{\text{Case 1}}$ [%]
Total load [MW]	26.225	26.193	0.03	0.114
Loss [MW]	0.438	0.417	0.02	4.566
Total load + Loss [MW]	26.663	26.61	0.053	0.199

표 5는 배전계통에 ESS가 단일로 연계된 경우와 다수의 CES가 연계된 경우의 최적 스케줄링 결과이며 각각 Case 1과 Case 2로 나타내었다. 표 5에서 보는 것과 같이 다수의 CES가 계통에 분산되어 연계되어 있는 경우의 소비전력이 ESS가 단일로 연계되어 있는 경우에 비해 감소하였다. 부하전력은 약 0.114% 감소하였으며 선로 손실은 약 4.566%, 부하전력과 선로 손실의 합은 약 0.199% 감소하였다.

그림 8과 9는 ESS가 단일로 연계된 경우와 다수의 CES가 연계된 경우에서 하루 동안 계통의 부하가 가장 많은 시간과 가장 적은 시간의 계통전압을 보여준다. 그림 8로부터 부하가 가장 많은 시간에서 ESS가 단일로 연계된 경우보다 다수의 CES가 연계된 경우의 계통전압이 더 낮음을 알 수 있다. 이는 5번 모선의 전압이 허용 범위내의 최소값이 되어 OLTC의 tap 위치를 더 이상 낮출 수 없는 경우이다. ESS는 13번 모선에 연계되어 있으므로 5번 모선의 전압을 효과적으로 보상해주지 못하여 더 이상 OLTC의 tap을 낮추지 못하고 있다. 반면 다수의 CES가 연계된 경우는 5번 모선에 위치한 CES가 해당 모선의 전압을 보상하여 OLTC의 tap을 더 낮추었기 때문에 계통전압이 ESS가 연계된 경우에 비해 낮게 유지되고 있다. 부하가 가장 적은 시간에서는 두 경우의 계통전압이 비슷하게 유지되고 있으며 ESS가 연계된 경우가 다소 낮게

전압이 유지되고 있다. 이는 해당 시간, 즉 5시에서 5번 모선의 부하보다 13번 모선의 부하가 더 많고 따라서 13번 모선의 전압이 5번 모선보다 낮은 경우이다. ESS의 경우 13번 모선에 위치하며 용량과 최대출력은 해당 모선에 위치한 CES의 용량, 최대출력보다 크기 때문에 CES에 비해 효과적으로 전압을 보상할 수 있었고 따라서 OLTC의 tap을 더 낮출 수 있기 때문에 계통전압이 미세하게 낮게 유지되고 있다.

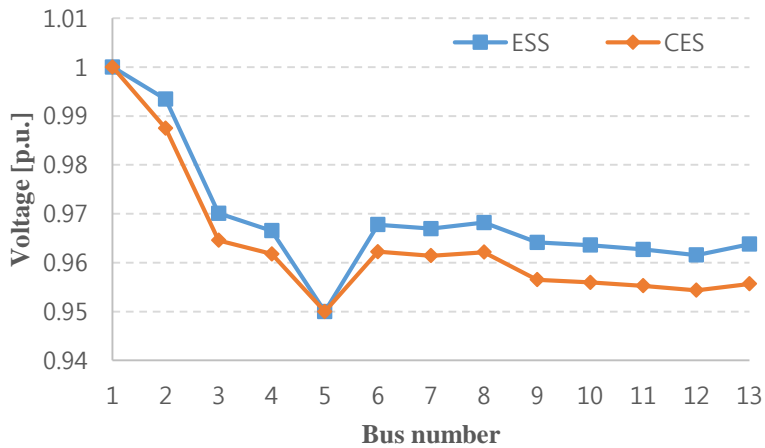


그림 8 부하가 가장 많은 시간에서의 모선 별 전압

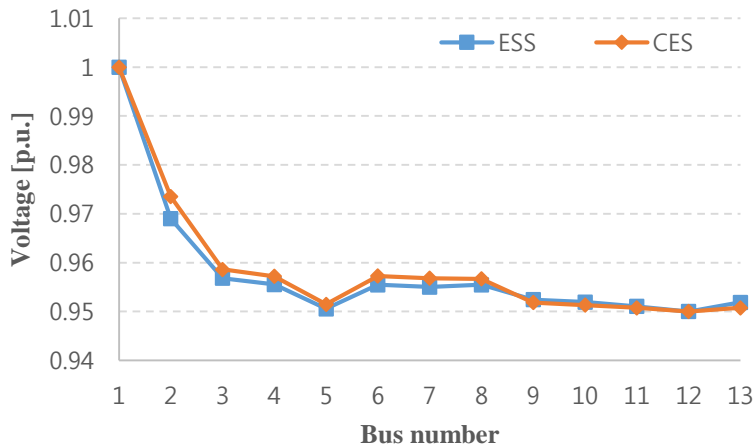


그림 9 부하가 가장 적은 시간에서의 모선 별 전압

그림 10은 두 경우의 OLTC tap의 위치를 보여준다. 대부분의 시간에서 CES가 연계된 경우의 tap 위치가 ESS가 연계된 경우보다 낮게 유지됨을 알 수 있다. 이는 계통에 분산되어 있는 CES가 각 모선의 전압을 효과적으로 보상하여 계통전압을 평탄화 할 수 있었고 그로 인해 OLTC의 tap의 위치를 더 낮출 수 있기 때문이다.

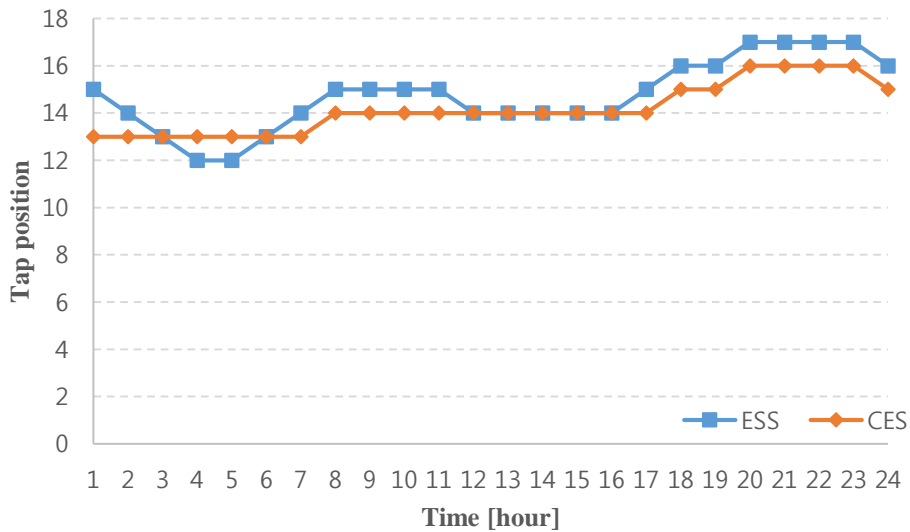


그림 10 OLTC의 tap 위치

그림 11은 ESS와 CES 전체의 유효전력 출력을 보여준다. 양의 값은 유효전력을 방전하는 것을 의미하며 음의 값은 유효전력을 충전하는 것을 의미한다. 두 경우 모두 계통손실을 줄이기 위해 계통 전체 부하가 적은 시간과 태양광 출력이 높은 시간에 충전하여 부하가 상대적으로 많은 시간대에 방전하는 것을 알 수 있다.

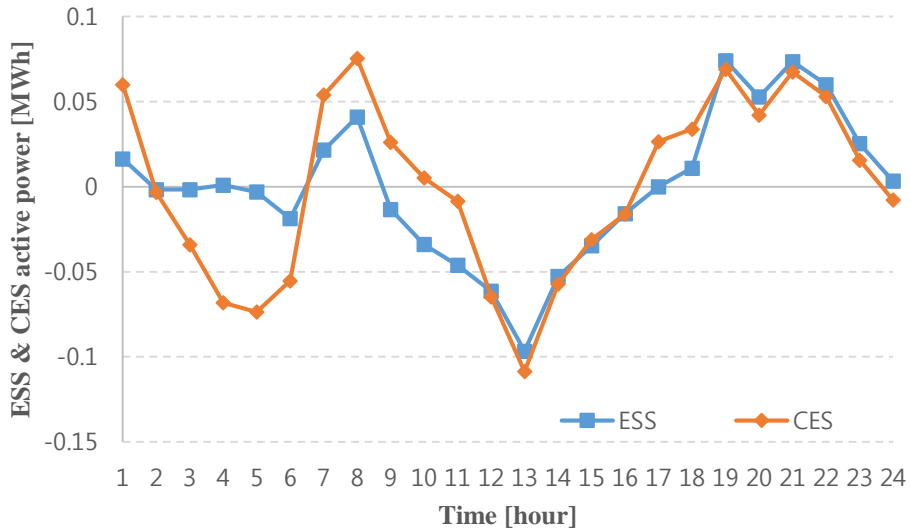


그림 11 ESS 및 CES의 유효전력 출력

그림 12는 각 CES의 유효전력 출력을 보여준다. CES의 유효전력 출력은 해당 CES가 위치한 모선의 부하 패턴과 유사한 형태를 보인다. 계통손실을 줄이기 위해 CES가 위치한 모선의 부하가 적을 때 충전하고 많을 때 방전하는 것을 알 수 있다.

그림 13은 ESS와 CES 전체의 무효전력 출력을 나타낸다. 두 경우 모두 계통전압의 평탄화를 위해 무효전력을 공급함으로써 계통전압을 제어하고 있음을 알 수 있다.

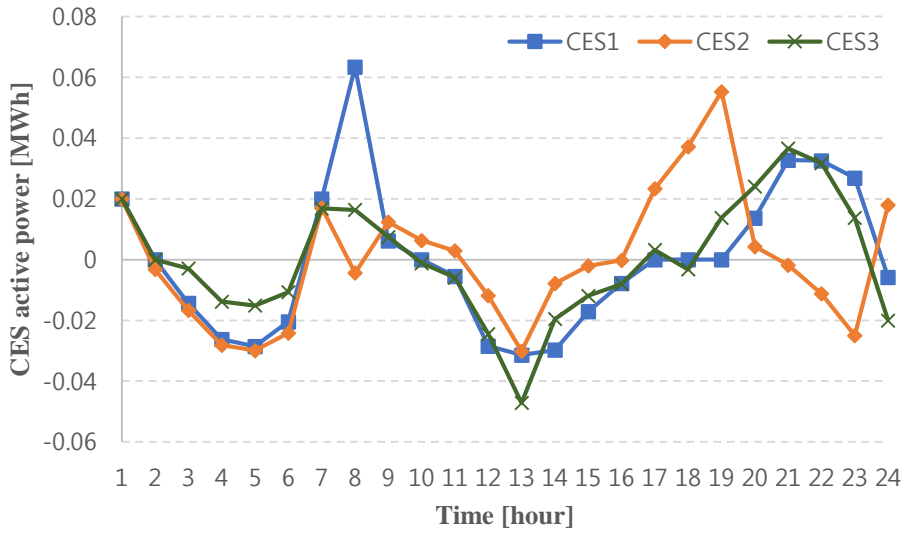


그림 12 CES 별 유효전력 출력

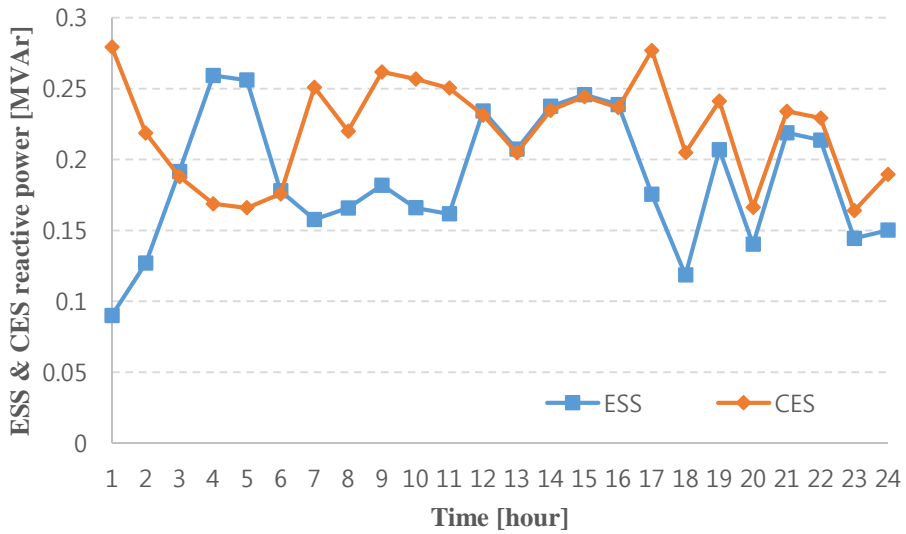


그림 13 ESS 및 CES의 무효전력 출력

제 5 장 결 론

신재생에너지원이 배전계통에 직접 연계되면서 원활한 계통 연계를 위해 ESS가 배전계통에 분산되어 설치되고 있다. 배전계통에 분산되어 있는 ESS는 신재생에너지원의 간헐적인 출력을 완화시켜 줄 뿐만 아니라 계통전압 제어, 주파수 조정, 수요반응 등에 활용 가능하다. 최근에는 신재생에너지원이 소비자에게 가까워짐에 따라 ESS역시 소비자 가까이에 위치한 CES 형태로 설치되고 있다. CES는 배전용 변압기의 2차측에 설치되어 소규모 부하를 담당하는 소규모 ESS로 피크전력 감소, 계통 운영 비용 감소 및 계통전압 제어 등에 활용 가능하다.

한편 계통에 분산되어 있는 CES는 부가적으로 CVR에 활용 가능하다. 기존의 CVR은 변압기의 OLTC, feeder의 SVR, ShC 등으로 계통의 전압을 제어하였다. 즉, 계통에 분산되어 있는 SVR과 ShC를 이용하여 계통전압을 평탄하게 만들어 CVR을 적용하고 있다. CES 역시 계통에 분산되어 있으며 전압을 제어할 수 있으므로 계통전압의 평탄화를 통한 CVR 효과 극대화에 이용 가능하다.

이에 본 논문에서는 CES의 유효전력 및 무효전력의 출력으로 계통 연계지점의 전압을 제어할 수 있는 능력을 이용하여 CVR을 통한 소비전력 저감을 위한 CES 출력과 OLTC 동작의 협조 제어방안을 제안하였다. 즉, 하루 전에 예측된 부하를 바탕으로 CES의 유효전력과 무효전력의 출력 및 OLTC의 tap 위치를 스케줄링 함으로써 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것이다. 이와 같은 스케줄링을 도출하기 위해 본 논문에서는 Matpower에서 제공하는 Interior point solver를 사용하였다.

또한 본 논문에서 제안한 제어방안이 가지는 장점을 이론적으로 분석하였고 이를 검증하기 위한 사례연구를 진행하였다. 사례연구를 통해 제안된 제어방안이 기존의 제어방안에 비해 계통손실과 부하전력을 감소시키는 것을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 협조 제어방안은 CES가 연계된 배전계통에서 신재생에너지원과의 연계뿐만 아니라 CVR을 통하여 계통 운영의 효율을 높여줄 것이라고 기대한다.

참고 문헌

- [1] L. Freris, D. Infield, *Renewable energy in power system*, John Wiley & Sons, 2008.
- [2] M. Stadler, M. Kloess, M. Groissbock, G. Cardoso, R. Sharma, M. C. Bozchalui, et al, "Electric storage in California's commercial buildings," *Applied Energy*, vol.104, pp. 711-722, April 2013.
- [3] A. Schroeder, "Modeling storage and demand management in power distribution grids." *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4700-4712, Dec. 2011.
- [4] J. Jung, Y. Cho, D. Cheng, A. Onen, R. Arghandeh, M. Dilek, et al, "Monte Carlo analysis of plug-in hybrid vehicles and distributed energy resource growth with residential energy storage in Michigan," *Applied Energy*, vol. 108, pp. 218-235, Aug. 2013.
- [5] A. Nourai, R. Sastry, T. Walker, "A vision & strategy for deployment of energy storage in electric utilities," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1-4, July 2010.
- [6] D. Parra, M. Gillott, S. A. Norman, G. S. Walker, "Optimum community energy storage system for PV energy time-shift," *Applied Energy*, vol. 137, pp.576-587, Jan. 2015.
- [7] W. Zhu, D. Garrett, J. Butkowski, Y. Wang, "Overview of distributed energy storage systems for residential communities," *Energytech, 2012 IEEE*, pp. 1-6, May 2012.
- [8] K. M. M. Huq, M. E. Baran, S. Lukic, O. E. Nare, "An energy management system for a community energy storage system," *Energy Conversion Congress and Exposition, 2012 IEEE*, pp. 2759-2763, Sept. 2012.
- [9] F. Meng, D. Haughton, B. Chowdhury, M. L. Crow, G. T. Heydt, "Distributed generation and storage optimal control with state estimation," *IEEE Transaction on*

Smart Grid, vol.4, no. 4, pp.2266-2273, Aug. 2013.

[10] R. Arghandeh, J. Woyak, A. Onen, J. Jung, R. P. Broadwater, "Economic optimal operation of community energy storage systems in competitive energy markets," *Applied Energy*, vol. 135, pp. 71-80, Dec.2014.

[11] H. Sugihara, K. Yokoyama, O. Saeki, K. Tsuji, T. Funaki, "Economic and efficient voltage management using customer-owned energy storage systems in a distribution networks with high penetration of photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 102-111, June 2012.

[12] J. H. Chow, F. F. Wu, J. A. Momh, *Applied mathematics for restructured electric power systems: optimization, control, and computational intelligence*, Springer, Nov. 2004.

[13] K. B. Song, Y. S. Baek, D. H. Hong, G. S. Jang, "Short-term load forecasting for the holidays using fuzzy linear regression method," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.20, no. 1, pp. 96-101, Feb. 2005.

[14] R. Arghandeh, A. Onen, R. P. Broadwater, "Distributed energy storage system control for optimal adoption of electric vehicles," *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pp. 1-8, July 2012.

[15] L. M. Hajagos, B. Danai, "Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 584-592, May 1998.

[16] Z. Wang, J. Wang, "Review on implementation and assessment of conservation voltage reduction," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1306-1315, May 2014.

[17] Functional specification for community energy storage (CES) unit, American Electric Power, 2009.

[18] R. Preiss, V. Warnock, "Impact of voltage reduction on energy and demand," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 97, no. 5, pp. 1665-1671, Sept. 1978.

- [19] J. F. K. Schneider, F. Tuffner, R. Singh, Evaluation of conservation voltage reduction on a national level,” available online at <
http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19596.pdf>.
- [20] V. Dabic, S. Cheong, J. Peralta, D. Acebedo, “BC Hydro’s experience on voltage VAR optimization in distribution system,” *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, pp. 1-7, April 2010.
- [21] A. Bokhari, A. Alkan, R. Dogan, M. Diaz-Aguilo et al, “Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp.1372-1381, Dec. 2013.

Abstract

Control of Community Energy Storage and OLTC for Loss and Load Reduction in the Distribution System

Kihoon Kang

Department of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Renewable energy sources are usually integrated at the distribution system because of the small generator size and low voltage level. As a consequence, distributed energy storage systems have been connected to the distribution system to help with renewable energy resources integration. Community energy storage (CES), a small distributed energy storage connected to the secondary of transformer, is the advanced energy storage system close to the customer. It provides many benefits such as peak shaving, load shifting and volt/var control. Meanwhile, distribution system operators conduct conservation voltage reduction (CVR) to reduce power consumption in the system. To implement CVR on the system, flat voltage profile is required. CES is distributed in the distribution system and it is capable of controlling system voltage. In this paper, therefore, a control method of CES is proposed in order to implement CVR. Based on the day-ahead load forecasting, power consumption including load demand and active power loss is reduced by optimal schedule of CES output power and OLTC operation. With case study using Matpower, this paper validate the effect of the proposed method.

Keywords: Community energy storage, Conservation voltage reduction, Loss reduction, Load reduction, CES output power scheduling, Matpower

Student Number: 2014-21628