

배전계통 전압 안정화를 위한 OLTC-ESS 협조제어 방안

유경상*, 김찬수*, 남양현*, 윤승진*, 최미곤*, 김대진*, 김병기*

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

e-mail: ksryu@kier.re.kr

Coordinated Control Strategy of OLTC and ESS for Voltage Stabilization in Distribution System

Kyung-Sang Ryu*, Chan-Soo Kim*, Yang-Hyun Nam*, Seung-Jin Yoon*,

Mi-Gon Choi* Dae-Jin Kim* and Byungki Kim*

*Korea Institute of Energy Research, Electric Power System Research
Laboratory

요약

본 논문에서는 특고압 배전계통의 전압 안정화를 위한 OLTC(On-Load Tap Changer)와 ESS(Energy Storage System)의 협조 운용 전략을 제안한다. 최근 급격한 부하 증가로 인해 배전선로에서 심각한 전압 강하가 발생할 우려가 있으며, OLTC 단독으로는 전압 조정 능력에 한계가 있어 추가적인 대책이 필요하다. 제안한 전략은 OLTC를 우선적으로 사용하여 전압을 유지하되, OLTC 텨이 최저 한계에 도달하거나 변압기 모선 전압이 상한에 도달할 경우 계통 말단에 설치된 ESS가 보조적으로 개입하여 전압을 복구한다. 5버스로 구성된 배전선로 모델을 통해 시뮬레이션한 결과, 부하 피크 시 OLTC 단독 운전으로는 허용 전압 유지에 어려움이 있었으나, OLTC-ESS 협조 운전 시 모든 모선 전압이 허용 범위 내로 유지됨을 확인하였다.

1. 서론

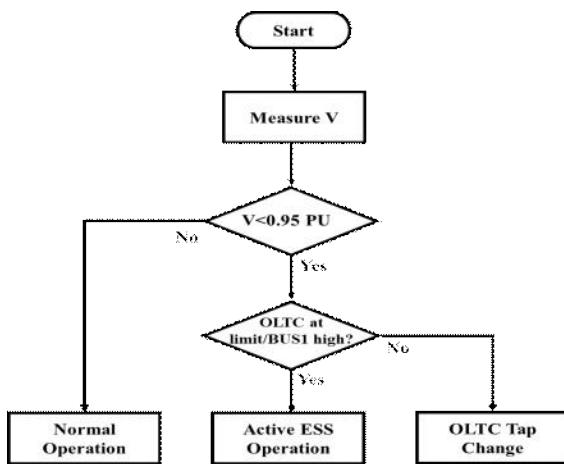
전력 부하의 지속적인 증가로 인해 배전계통의 전압 강하와 전압 불안정성 문제가 심화 되고 있다. 부하가 증가하면 선로 임피던스로 인한 전압 강하는 말단 노드로 갈수록 심해지며, 특고압 배전선로의 모선 전압을 허용 범위(20,800~23,800V) 내로 유지하기 어려워진다. 일반적으로 변압기의 부하시 텨 절환기(OLTC)를 통해 부하 변동에 대응하고 있으나, OLTC 단독 운용에는 몇 가지 한계가 있다[1]. 첫째, OLTC는 기계적 동작 제약 및 응답 지연이 있어 급격한 부하 변동에 실시간 대응이 어렵다. 둘째, OLTC의 조정 범위를 초과하는 큰 전압 강하가 발생하면 텨 최댓값에 도달하여 더 이상 전압을 올릴 수 없고, 텨 변화에 따른 모선 전압이 과도하게 상승하여 상한치를 벗어날 우려가 있다. 셋째, 부하 증가로 인한 저전압 상태가 지속될 경우 OLTC가 갖은 텨 절환을 하게 되어 설비 수명 단축과 전압 제어 한계 문제가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 배전계통의 전압 안정도를 확보하기 위해 에너지저장장치(ESS)와 같은 추가적인 전압 보상 수단과 OLTC의 협조 제어 방안이 요구된다[2-3].

따라서 본 논문에서는 배전계통의 전압 안정화를 위한 OLTC와 ESS의 협조 운용 전략을 제안한다. 제안한 전략은 OLTC를 우선적으로 사용하여 전압을 유지하되, OLTC 텨이 최저 한계에

도달하거나 변압기 모선 전압이 상한에 도달할 경우 계통 말단에 설치된 ESS가 보조적으로 개입하여 전압을 복구한다. 5버스로 구성된 간이 배전선로 모델을 통해 시뮬레이션한 결과, 부하 피크 시 OLTC 단독 운전으로는 허용 전압 유지에 어려움이 있었으나, OLTC-ESS 협조 운전 시 모든 모선 전압이 허용 범위 내로 유지됨을 확인하였다.

2. OLTC-ESS 협조제어 방안

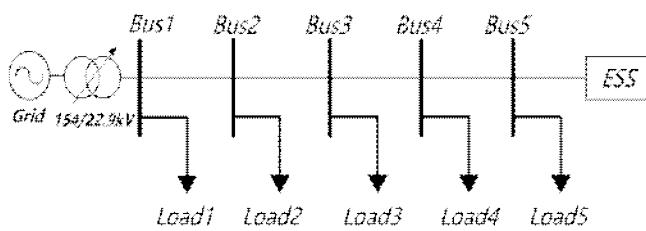
OLTC의 동작 조건과 ESS 투입 조건을 단계적으로 나타낸 OLTC와 ESS의 협조 제어 방안은 그림 2와 같다. OLTC는 DVM(Digital Voltage Meter)를 이용하는 방식을 취했고, 계통 특정 지점(Bus3)의 전압을 입력으로 받아, 해당 지점의 Bus 전압이 사전에 설정해 놓은 설정값을 넘어서는 경우 OLTC 텨을 조정한다. 이때 OLTC 동작으로 모선 전압이 상한에 도달했거나 OLTC 텨이 최댓값(한계)에 도달하면, OLTC의 추가 동작을 멈추고 ESS가 동작한다. 계통 말단에 연결된 ESS는 방전을 통해 전압을 상승시켜 저전압을 해소하며, 이로써 OLTC 단독으로는 해결할 수 없는 전압 문제를 보조한다. 정상 상태에서는 아무런 제어 동작을 하지 않으며, 필요한 경우에만 OLTC와 ESS가 순차적으로 동작하도록 조건부 제어 구조를 갖는다.



3. Case Study

3.1 배전계통 모델 구성 및 파라미터

배전계통에서 제안한 OLTC-ESS 협조 제어의 효과를 검증하기 위해 5개 버스로 구성된 배전계통 모델은 그림 2와 같다.

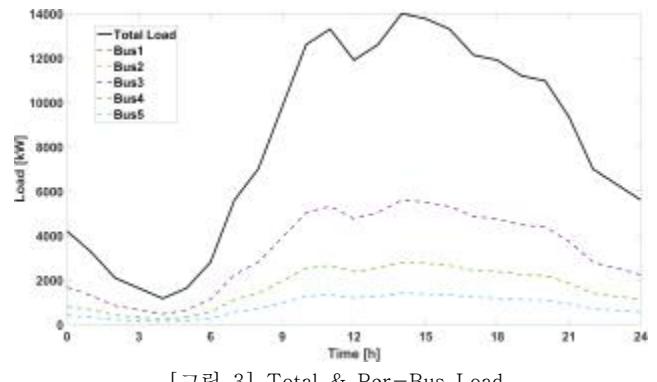


[그림 2] Simulation model

표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 시뮬레이션 모델에서 선로는 총 20km이며, Bus1-Bus5 사이를 균등하게 4구간(각 5 km)으로 나누었다. 그림 3은 부하 곡선으로 총 14MW가 연계되어 있으며, 부하 용량은 Bus1:Bus2:Bus3:Bus4:Bus5 = 1:2:2:4:2:1의 비율로 분포되도록 설정하였다.

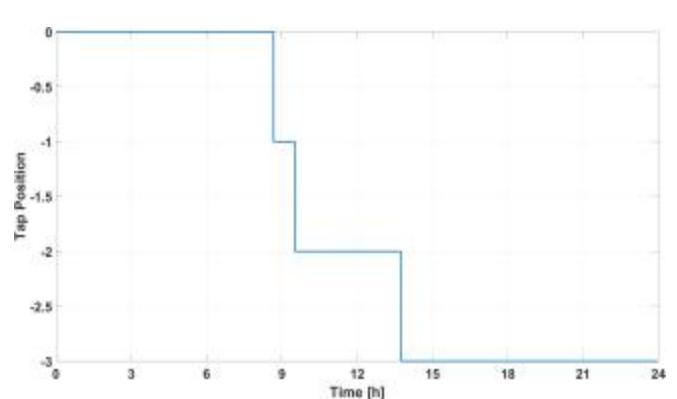
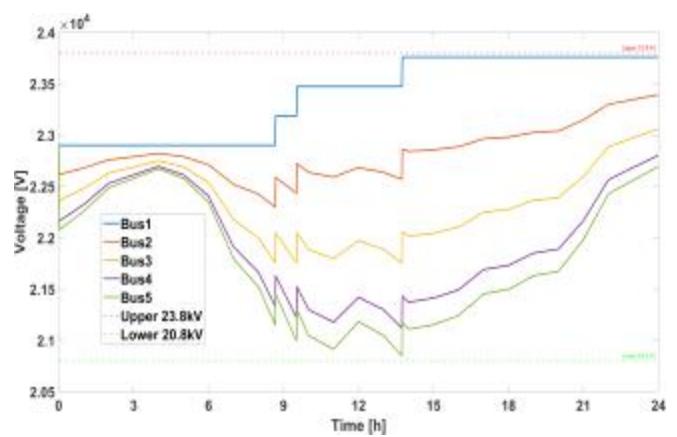
[표 1] 시뮬레이션 파라미터

Component	Information	Parameter
Main Transformer	Rated voltage	154/22.9kV
	Total tap	16(± 8)
	Dead band	$\pm 1.25\%$
	voltage change per tap	0.0125 PU
	Waiting time	60s
Load	Peak load	Bus1,5 = 1.4MW Bus2,4 = 2.8MW Bus3 = 5.6MW
ESS	Power/Capacity	2MW/6MWh
Line	Inimpedance	$3.47+j7.46[\%/\text{km}]$
	Length	20km

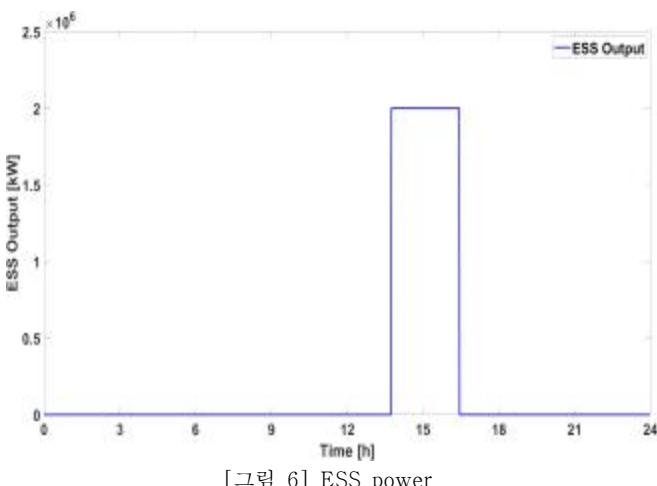


3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

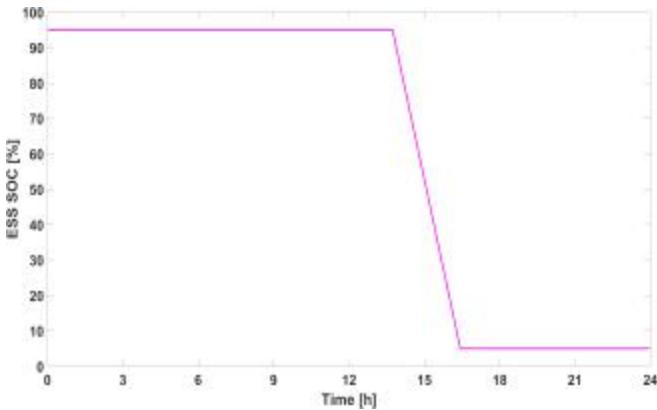
이상과 같은 모델과 알고리즘으로 24시간 부하 변화에 따른 배전계통의 전압 동특성을 시뮬레이션 하였다. 그림 4는 하루 동안 각 버스 전압의 추이를 보여주고, 그림 5는 OLTC 텁 위치 변화를 나타낸다. 부하가 증가함에 따라 오전부터 Bus2~Bus5 전압이 서서히 감소하여, 약 8시간 경과 시 Bus3 전압이 0.95 pu 이하로 떨어지면 OLTC는 알고리즘에 따라 텁을 조정하여 계통 전압을 상승시킬 수 있다. 또한 부하가 증가함에 따라 OLTC는 지속적으로 동작하여 13시 경에 Bus1 전압(청색 곡선)은 약 23.8 kV 근처까지 상승하여 상한에 근접하였고, OLTC 제어가 한계에 이르렀음을 알 수 있다.



OLTC 텁 한계에 도달한 이후 투입된 ESS의 동작으로 말단 전압이 어떻게 회복되었는지를 ESS의 출력 및 SOC(State of Charge) 변화를 통해 확인할 수 있다. 그림 6은 ESS의 출력을 나타낸 것으로 부하가 최대가 되는 13시 경부터 동작하여 계통 전압을 상승시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 7의 경우 ESS의 SOC 변화율을 나타낸 것으로, ESS가 방전할 때 SOC가 감소하는 양상을 보여준다. 시뮬레이션 결과 ESS는 OLTC가 한계에 도달한 직후인 13시경부터 약 2시간 30가량 방전을 수행하였으며, 그 사이 SOC가 95%에서 약 5%까지 급격히 감소하였음을 알 수 있다. 이는 2MW의 출력으로 ESS 용량의 90%를 방전한 것으로, ESS 방전으로 공급된 에너지는 계통 전압을 상승시키는 데 사용되었고, 이를 통해 모든 Bus 전압이 빠르게 회복되어 안정 범위로 들어왔다.



[그림 6] ESS power



[그림 7] SOC of ESS 알고리즘

결과적으로 계통 전압을 조정하기 위해 OLTC가 선 동작하여, 계통 전압이 상한치를 벗어날 우려가 있거나, 부하의 총 용량이 12 MW를 넘어설 시점부터는 더 이상의 텁 변화가 일어나지 않아 추가 텁 조정으로 인한 계통 전압 상승이 일어나지 못하도록 하였다. ESS는 이 시점부터 동작하여 전압을 허용범위 이내로 유지시킴을 알 수 있다. 요약하면, OLTC-ESS 협조 제어 전략은 부

하 피크 시에도 각 모선 전압을 허용 범위 내로 유지하여 전압 품질을 향상시켰으며, 변압기 텁의 과도한 동작을 억제하여 설비 보호에도 효과적임을 시뮬레이션으로 검증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 배전계통의 전압 안정화를 위해 변압기 OLTC와 ESS를 결합한 협조 제어 방안을 제시하고, 5버스 배전망 모델을 통해 그 유효성을 검증하였다. 부하 증가로 인한 전압 문제에 대해서, OLTC가 1차적으로 대응하고 한계 상황에서 ESS가 2차적으로 개입함으로써 전압 품질을 유지하고 설비 수명도 보전할 수 있음을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 구현이 간단하면서도 OLTC와 ESS의 장점을 모두 활용하는 실용적인 접근으로, 향후 실배전망에 ESS 보급이 늘어날 경우 적용 가치가 높을 것으로 판단된다.

향후 연구로는 분산전원의 대규모 연계로 인해 나타나는 새로운 전압 문제에 본 제어 전략을 확장하는 방향을 제시하고자 한다. 예를 들어 태양광(PV) 등의 분산전원 연계 시 낮시간 역조류에 따른 과전압이 발생할 수 있는데, 이 경우 OLTC와 ESS의 협조 제어 로직을 전압 상승 억제 방향으로도 개선할 필요가 있다. 즉, OLTC-ESS 제어에 양방향 전압 조정 기능을 추가하여, 저전압 시에는 ESS 방전을 통한 전압 상승, 과전압 시에는 ESS 충전을 통한 전압 강하를 유도하는 양방향 협조 제어로 발전시킬 수 있을 것이다. 또한 다중 피더가 연결된 복잡한 배전계통에서 모든 피더의 전압을 안정화시키기 위한 OLTC와 ESS 간의 협조 전략, 그리고 예측 부하/발전량을 고려한 사전 예방적 제어 알고리즘 등을 연구하여 전압안정화 방안을 더욱 고도화할 예정이다.

감사의 글
본 연구는 산업통상자원부의 소재부품기술개발사업
(No.20031919)으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- [1] 조성수 외6, “배전선로의 분산 전원 상시 연계용량 기준 상향 타당성 연구”, KEPCO Journal on electric power and energy v.5 no.4, pp.311 – 321, 2019년
- [2] 이태의, 이유수, “제주도의 재생에너지 확대와 전력계통의 안정적 운영 방향” 에너지포커스, pp. 48–63, 2021년
- [3] 유경상, 부창진, 김호찬 “독립형 마이크로그리드 모델링 및 EV 수용성 향상 방안”, KIEE, vol.73, no.1, pp 170–176, 2024년