

독립형 마을 단위 마이크로그리드의 운용 알고리즘에 관한 연구

김경화, 이세연, 이진호, 박찬욱, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:kyunghwa316@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Algorithm of Off-grid Community Micro-grid

Kyung-Hwa Kim, Se-Yeon Lee, Jin-Ho Lee, Chan-Wook Park, and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS의 도입이 확대되면서, 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립을 확보를 위한 마을 단위 마이크로그리드의 실증 연구가 진행되고 있으며, 마을 단위 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 마이크로그리드의 형태와 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다. 그러나, 이러한 마이크로그리드에서 신재생에너지 전원의 설치가 증가함에 따라, 수용가의 전압변동에 따른 전력품질 문제가 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 독립형 마이크로그리드 형태의 마을 단위 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 sinking에 의한 CVCF 인버터의 탈락 방지할 수 있도록 배터리의 SOC가 85% 이상일 때 에너지 sinking이 발생하면 태양광전원의 출력을 최소한으로 제한하는 운용 알고리즘을 제시한다. 이를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을 단위 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 제안한 알고리즘의 운용 특성을 분석한 결과, 에너지 자립율이 100%인 경우 CVCF 인버터가 탈락하지 않고 안정적으로 운용됨을 알 수 있었다.

1. 서론

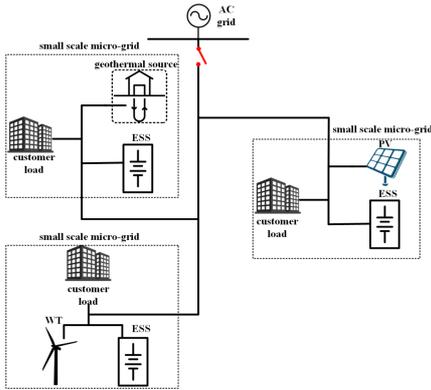
최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원 및 ESS(energy storage system)의 도입이 확대됨에 따라, 이산화탄소 배출의 저감을 위해 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. 또한, 전라남도에서는 지역 단위의 에너지 자립율을 확보하고, 분산에너지 생산 및 소비 체계 구축을 위한 마을 단위 마이크로그리드의 실증 연구가 진행되고 있다[5,6]. 이러한 마을 단위 마이크로그리드는 에너지 자립율에 따라 계통연계형 마이크로그리드의 형태와 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용할 수 있다. 그러나, 이러한 마이크로그리드에서 신재생에너지 전원의 설치가 증가함에 따라, 수용가의 전압변동에 따른 전력품질 문제가 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 마을단위 마이크로그리드의 에너지 자립율이 100%인 경우, 에너지 sinking에 의한 CVCF 인버터의 탈락을 방지할 수 있도록 배터리의 운용 한계전압과 운용 한계 SOC를 고려하여 태양광전원의 출력을 제한하는 운용 알고리즘을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 지열발

전부, CVCF 인버터부, 등으로 이루어진 마을 단위 마이크로그리드의 모델링을 수행한다. 이 모델링을 바탕으로 제시한 알고리즘에 따라 운용 특성을 분석한 결과, 마을 단위 마이크로그리드의 에너지 자립율이 100%인 경우, SOC가 85% 이상일 때 energy sinking이 발생하여도, CVCF 인버터가 탈락하지 않고 안정적으로 운용됨을 알 수 있다.

2. 마을 단위 마이크로그리드의 운용특성

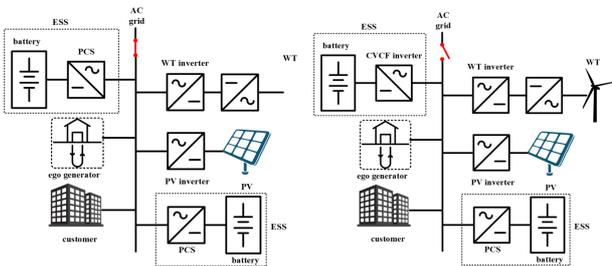
지역 단위의 신재생에너지의 생산 및 소비 체계를 구축하고, 에너지 자립율을 확보하기 위한 마을 단위 마이크로그리드의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 마을 단위 마이크로그리드는 각각 수용가 부하와 신재생에너지 전원, ESS 등으로 다양하게 구성되며, 신재생에너지 전원의 에너지 자립율에 따라 계통연계형 또는 독립형 마이크로그리드로 운용될 수 있다. 또한, 각 소규모 마이크로그리드의 신재생에너지 전원은 태양광전원 및 지열 발전 등으로 이루어지며, 수용가 부하에 전원을 공급하거나 잉여전력을 ESS에 충전하여, 마이크로그리드의 에너지 자립율을 확보한다. 한편, ESS

는 신재생에너지 전원의 발전용량에 따라, 충전 및 방전 동작을 수행하여 과전압 및 저전압 현상을 해결하고, 마을 단위 마이크로그리드가 독립형으로 운영하는 경우, CVCF(constant voltage constant frequency) 기능에 의하여 전압 및 주파수를 제어하는 역할을 한다.



[그림 1] 마을 단위 마이크로그리드의 구성

에너지 자립율에 따른 마을 단위 마이크로그리드의 정상상태 운용특성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2의 (a)와 (b)는 에너지 자립율이 50%, 100%인 경우의 운용특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 에너지 자립율이 50%인 경우, 마을 단위 마이크로그리드는 계통연계형 마이크로그리드의 형태로 운용되며, 각 지점에 설치된 ESS를 이용하여 수용가의 과전압 및 저전압 현상을 제어할 수 있다. 한편, 그림 2의 (b)와 같이, 에너지 자립율이 100%인 경우, 마을 단위 마이크로그리드는 계통에서 분리되어 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용된다. 즉, 특정 ESS의 CVCF 기능을 추가하여, 마이크로그리드의 계통전압을 유지하고, 다른 ESS를 수요관리용으로 운용하여 각 수용가의 전압을 안정적으로 유지시킨다.

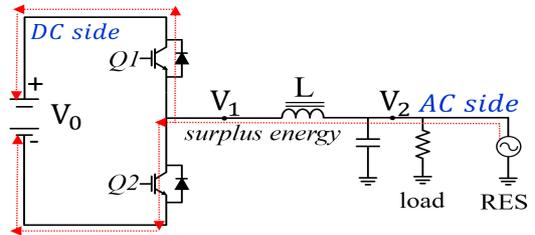


(a) 계통연계형 마이크로그리드 (b) 독립형 마이크로그리드
[그림 2] 마을 단위 마이크로그리드의 운용특성

3. 독립형 마을 단위 마이크로그리드의 운용 알고리즘

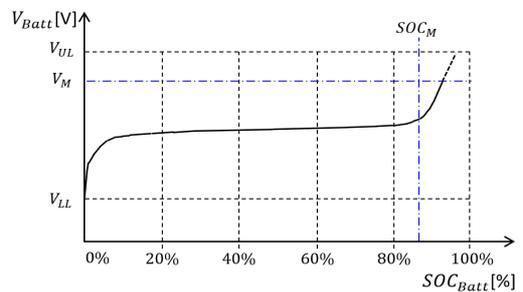
3.1 독립형 마이크로그리드의 운용방안

마을 단위 마이크로그리드의 에너지 자립율이 100%인 경우, 특정 ESS의 CVCF 기능에 의하여 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용될 수 있다. 이때, 계통의 전체 부하량보다 신재생에너지전원의 출력이 큰 경우, CVCF 인버터 내부에서는 그림 3과 같이 에너지 sinking 현상이 발생하게 된다. 이 그림에서와 같이, 인버터가 PWM controller의 제어신호에 의하여 정전압 및 정주파수로 운전되는 동안, 신재생에너지전원의 출력이 수용가 부하에 먼저 공급되고 남게 된 에너지는 인버터 내부의 반도체스위치와 환류다이오드를 통하여 DC측으로 유입된다.



[그림 3] 단상 인버터의 energy sinking 개념도

한편, 그림 4는 리튬이온전지의 SOC와 전압과의 상관관계를 나타낸 것이며, 일반적으로 SOC가 약 85% 내외에서 CV(constant voltage)충전을 하게 되어, 단자전압이 급격히 상승하게 된다. 즉, Micro-grid에서 에너지 sinking이 발생하는 경우, SOC가 85% 보다 적으면 CC(constant current) 충전 특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 크게 변동되지 않지만, SOC가 85% 보다 크게 되면 CV 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 급격하게 상승하여, 인버터가 탈락될 가능성이 있다. 이를 방지하기 위하여, SOC의 운용한계치(SOC_M)를 85%로 상정하고, 식 (1)과 같이 CVCF용 배터리의 운용 한계전압(V_M)을 인버터의 최대 전압에 여유율(η)을 곱하여 산정한다.



[그림 4] SOC에 따른 배터리의 전압특성

$$V_M = V_{LL} + (V_{UL} - V_{LL}) \times \eta \quad (1)$$

여기서, V_M : 배터리의 운용 한계전압, V_{UL} : CVCF 인버터의 상한전압(DC), V_{LL} : CVCF 인버터의 하한전압(DC), η : 여유율

따라서, 상기에서 산정한 배터리의 운용 한계전압을 바탕으로, 에너지 sinking시에 발생하는 CVCF 인버터용 배터리의 급격한 전압상승을 방지하기 위하여, 적당한 양의 태양광전원의 출력을 순차적으로 차단시켜야 한다. 본 논문에서는 배터리 운용 한계전압을 고려하여 에너지 sinking 크기만큼의 태양광전원을 최소한으로 차단하며, 과도상태 시의 발생하는 에너지 sinking의 크기($E_s(t)$)를 구하면 식 (2)와 같다.

$$E_s(t) = (P_{PV}(t) - P_{PV-cut}(t)) - P_L(t) \quad (2)$$

여기서, $E_s(t)$: 에너지 sinking의 크기, $P_{PV}(t)$: MG에서의 태양광전원 총 출력, $P_L(t)$: MG에서의 수용가부하 총 소비량, $P_{PV-cut}(t)$: 태양광전원의 차단량

3.2 독립형 마이크로그리드의 운용 알고리즘

상기에서 제시한 독립형 마이크로그리드의 운용 알고리즘에 대한 상세한 절차는 다음과 같다.

[Step 1] CVCF 인버터의 운용 전압범위와 운용 한계 SOC (SOC_M)를 상정하고, 식 (1)에 의하여 CVCF 인버터의 운용 한계전압(V_M)을 산정한다.

[Step 2] 수용가부하의 크기와 태양광전원의 발전용량을 비교하여, 식 (2)에 따라 에너지 sinking의 크기($E_s(t)$)를 산정한다.

[Step 3] 에너지 sinking이 발생하면 [Step 4]로 이동하고, 아니면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 4] 배터리의 SOC($SOC_{batt}(t)$)와 전압($V_{batt}(t)$)이 SOC 운용 한계치(SOC_M)와 운용 한계전압(V_M)보다 큰 경우 [Step 5]로 이동하고, 아니면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 5] 식 (8)에 의해 산정된 에너지 sinking의 크기($E_s(t)$)만큼 최소한으로 태양광전원의 발전용량($P_{PV}(t)$)을 제한한다.

[Step 6] 전체 시간대에 대하여 [Step 1]부터 [Step 5]까지 반복한다.

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 마을 단위 마이크로그리드의 모델링

4.1 CVCF 인버터부 모델링

CVCF 인버터부는 제어기와 인버터로 구성된다. 구체적으로, 제어기에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성을 빠르게 수행하기 위하여, 식 (3)과 같이 PI제어 알고리즘을 이용한다. 여기서, 식 (3)의 첫 번째 항은 목표전압(V_{ref})과 현재 출력전압($V(t)$)의 차를 고려하여 비례제어신호를, 두 번째 항은 오차를 누적하여 적분제어신호를 산정한다. 세 번째 항은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 제어신호를 나타낸다. 한편, 식 (4)는 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, 식 (3)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(pulse width modulation) 신호로 변환된다.

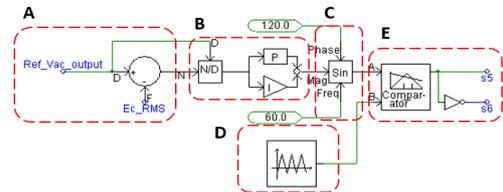
$$Wave_{ref}(t) = \left[K_p \left(1 - \frac{V(t)}{V_{ref}} \right) + K_i \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{V(\tau)}{V_{ref}} \right) d\tau \right] \quad (3)$$

$$\bullet \sin(2\pi ft + \phi)$$

$$Wave_{carrier}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\omega t}{(2n-1)^2} \quad (4)$$

여기서, $Wave_{ref}(t)$: 기준 파형, K_p : 비례 계수, K_i : 적분 계수, $V(t)$: 현재 전압, V_{ref} : 목표전압, f : 목표 주파수, ϕ : 목표 위상

상기의 식 (3)과 식 (4)를 바탕으로, CVCF 인버터의 한 상에 대한 제어부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, A부분은 목표전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차 값을 산정하는 것이고, B부분은 오차 값에 대하여 각각 PI제어를 수행하는 것이며, C부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 것을 나타낸다. 또한, D부분은 삼각파의 반송파를 출력하고, E부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환하는 것을 나타낸다.

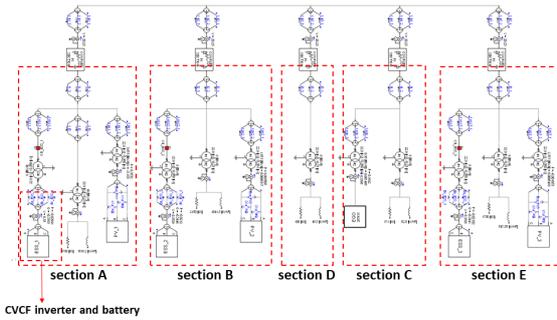


[그림 5] CVCF 인버터부 모델링

4.2 전체 시스템

독립형 마이크로그리드는 그림 6과 같이, 한전 계통과 독립적으로 마을 단위 마이크로그리드만으로 구성된다. 여기서,

section A는 CVCF인버터부와 CVCF용 배터리부, 태양광전원부, 수용가부, 등으로 구성되어 마이크로그리드의 전압을 안정적으로 유지한다. section B와 E는 태양광전원부와 ESS부, 수용가부, 등으로 구성되고, section C는 수용가부 만으로 이루어지며, section D는 수용가부와 지열발전부로 구성된다.



[그림 6] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

독립형 마이크로그리드의 형태로 운용되는 마을 단위 마이크로그리드의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, CVCF 인버터용 배터리의 운용 한계 SOC는 85% 이고, CVCF 인버터의 운용 한계전압은 611.8[V]로서 인버터 최대 전압의 약 95%의 여유율로 산정한 것이다.

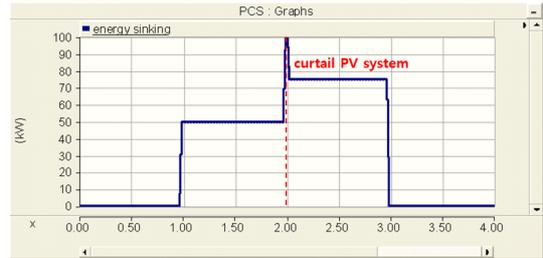
[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역
배터리	운용 전압 범위	408.2 ~ 611.8 [V]
	SOC	85 [%]
CVCF 인버터	운용한계 전압 범위	410 ~ 610 [V]
	정격용량	500 [kW]
	최대 운용 전압	600[V]

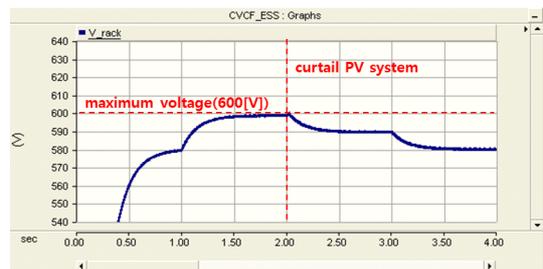
4.2 독립형 마을 단위 마이크로그리드의 운용특성

본 논문에서 제시한 알고리즘에 의한 독립형 마이크로그리드의 운용 특성은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 7의 (a)는 마이크로그리드에서 발생하는 에너지 sinking의 크기를 나타낸 것이고, (b)는 CVCF용 배터리의 전압특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 100[kW]의 에너지 Sinking이 발생하면, CVCF 인버터용 배터리 전압은 운용 한계전압인 600[V]에 도달하게 된다. 이때, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 최소한의 용량으로 차단하면, 에너지 sinking 크기와 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 동시에 단

계적으로 감소됨을 알 수 있다. 즉, 배터리 전압이 인버터의 운용전압 범위(410 ~ 610[V])를 벗어나지 않고, 마이크로그리드의 전압이 안정적으로 유지되어, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.



(a) energy sinking의 크기



(b) CVCF 인버터용 배터리의 전압특성
[그림 7] 제안한 알고리즘의 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 마을 단위 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위하여, 독립형 마이크로그리드의 형태로 운용하는 경우, 에너지 sinking에 의한 CVCF 인버터의 탈락을 방지할 수 있도록 배터리의 SOC가 85% 이상일 때 에너지 sinking이 발생하면 태양광전원의 출력을 최소한으로 제한하는 운용 알고리즘을 제시한다. 이를 바탕으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 독립형 마을 단위 마이크로그리드의 모델링을 수행하고 제안한 알고리즘의 운용 특성을 분석한 결과, 에너지 자립율이 100%인 경우 CVCF 인버터가 탈락하지 않고 안정적으로 운용됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20213030160080) 및 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] 김지명 외 3인, “5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 해석 모델링에 관한 연구”, 전기학회 논문지, 71(1), 45-54, 2022.1