

# CVCF 인버터 기반 마이크로그리드의 과도상태 운용 방안

최성식  
한국폴리텍대학 전남캠퍼스 전기과  
e-mail : immotal@kopo.ac.kr

## The Transient Operation Methods of Micro-grid based on CVCF Inverter

Sung-Sik Choi  
Dept. of Electrical Engineering, Korea Polytechnics Jeonnam

### 요 약

최근 국내의 도서지역용 마이크로그리드에서는 디젤발전기의 가동률을 줄이고 CVCF(constant voltage & constant frequency) 인버터, 신재생에너지전원과 ESS를 이용하여, 계통을 안정적으로 운용할 수 있는 CVCF 인버터 기반의 마이크로그리드에 대한 관심이 증가되고 있다. 그러나, CVCF 인버터 기반의 도서지역용 마이크로그리드에서는 CVCF 인버터용 배터리의 SOC(state of charge) 상태에 따라, 계통 부하보다 신재생에너지전원의 출력이 클 경우, CVCF 인버터 내에서 에너지 sinking 현상이 발생하여 배터리 전압이 급격히 상승하면, 인버터의 과전압 보호동작에 의해 CVCF 인버터가 급격하게 탈락되어 계통에 정전이 발생하는 문제점이 일어날 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CVCF 인버터를 기반으로 하는 도서지역용 마이크로그리드를 안정적으로 운용하기 위하여, 에너지 sinking 시에 발생 가능한 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지할 수 있는 과도상태 운용방안을 제안한다. 그리고, 본 논문에서 제안한 과도상태 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로 제안한 알고리즘을 적용한 Micro-grid의 과도상태 운용 특성을 분석한다.

## 1. 서 론

국내의 도서지역용 마이크로그리드에서는 디젤발전기의 가동률을 줄이고 CVCF(constant voltage & constant frequency) 인버터, 신재생에너지전원과 ESS를 이용하여, 계통을 안정적으로 운용할 수 있는 CVCF 인버터 기반의 도서지역용 마이크로그리드에 대한 관심이 증가되고 있다[1-4]. 그러나, CVCF 인버터 기반의 도서지역용 마이크로그리드에서는 CVCF 인버터용 배터리의 충전상태(state of charge, SOC)에 따라 계통 부하보다 신재생에너지전원의 출력이 클 경우, CVCF 인버터 내에서 에너지 sinking 현상이 발생하여 배터리 전압이 급격히 상승하고 인버터의 과전압 보호동작에 의해 CVCF 인버터가 급격하게 탈락되어 전체계통이 정전되는 문제점이 일어날 수 있다[5].

따라서, 본 논문에서는 CVCF 인버터를 기반으로 하는 도서지역용 마이크로그리드를 안정적으로 운용하기 위하여, 에너지 sinking 시에 발생 가능한 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지할 수 있는 과도상태 운용알고리즘을 제안한다. 그리고, 본 논문에서 제안한 운용알고리즘의 유용성을 확인하기

위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로 제안한 알고리즘을 적용한 Micro-grid의 과도상태 운용 특성을 분석한다.

## 2. 마이크로그리드의 운용 방안

### 2.1 과도상태 운용 모델링

그림 1은 리튬이온전지의 SOC와 전압과의 상관관계를 나타낸 것이다. 마이크로그리드에서 에너지 sinking이 발생하는 경우, 리튬이온전지의 SOC가 85% 보다 적으면 CC 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 크게 변동되지 않지만, SOC가 85% 보다 크게 되면 CV 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 급격하게 상승하여, 인버터가 탈락할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위하여, SOC의 운용 한계치( $SOC_M$ )를 85%로 상정하고, 배터리의 운용 한계전압( $V_M$ )을 인버터의 전압범위에 여유율( $\eta$ )을 곱하여 산정한다. 따라서, 에너지 sinking이 발생하는 경우, SOC가 운용 한계치에 도달하고, 배터리도 운용 한계전압에 도달하면, 적정한 용량의 태양광전원의 차단을

수행한다. 여기서, CVCF 인버터용 배터리의 운용 한계전압은 식 (1)과 같다.

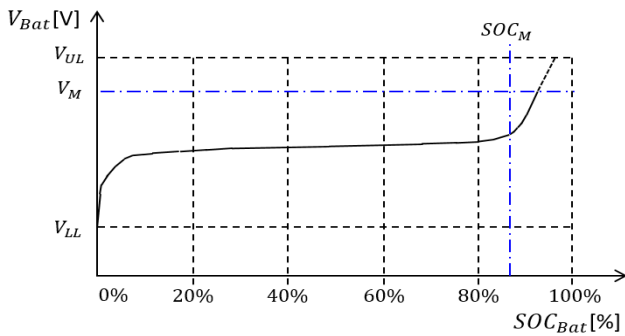
$$V_M = V_{LL} + (V_{UL} - V_{LL}) \times \eta \quad (1)$$

여기서,  $V_M$ : 운용 한계전압,  $V_{UL}$ : CVCF 인버터의 상한전압(DC),  $V_{LL}$ : CVCF 인버터의 하한전압(DC),  $\eta$ : 여유율

상기와 같이 에너지 sinking시에 발생하는 CVCF 인버터용 배터리의 급격한 전압상승을 방지하기 위하여, 적당한 용량의 태양광전원의 출력을 순차적으로 제한시켜야 한다. 여기서는 에너지 sinking 크기만큼의 태양광전원을 순차적으로 차단하고자 하며, 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,  $P_{PV}(t)$ : 마이크로그리드의 태양광전원 총 출력,  $P_L(t)$ : 마이크로그리드의 수용가부하 총 소비량,  $P_{PV-cut}(t)$ : 태양광전원의 차단량



[그림 1] CVCF 인버터의 과도상태 운용 모델링

## 2.2 과도상태 운용알고리즘

상기에서 제안한 과도상태 운용 모델링을 바탕으로 CVCF 인버터를 이용한 마이크로그리드의 과도상태 운용알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] CVCF 인버터의 운용 전압범위와 운용 한계 SOC ( $SOC_M$ )를 상정하고, 인버터의 상한전압 ( $V_{UL}$ )과 하한전압 ( $V_{LL}$ )으로부터 적절한 여유율( $\eta$ )을 고려하여 CVCF 인버터의 운용 한계전압 ( $V_M$ )을 산정한다. 또한, 마이크로그리드의 운용 시간대( $t$ )와 태양광전원의 차단용량( $P_{PV-cut}(t)$ )을

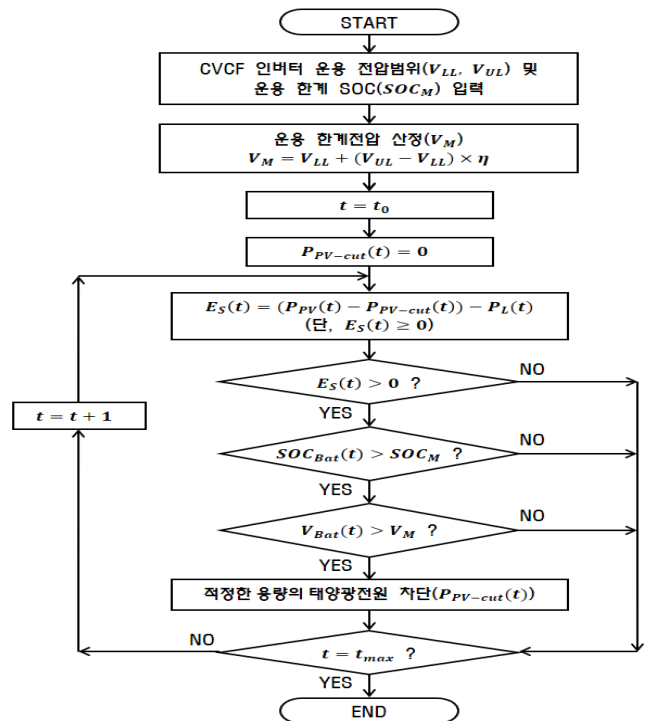
초기 값으로 설정한다.

[Step 2] 각 시간대별로 마이크로그리드의 태양광전원의출력량( $P_{PV}(t)$ )과 수용가 부하량( $P_L(t)$ )에 의하여 발생하는 에너지 sinking의 크기( $E_S(t)$ )를 산정한다. 에너지 sinking이 발생하고 있는 경우, 이 값으로부터 CVCF 인버터용 배터리의 SOC( $SOC_{Bat}(t)$ )와 SOC 운용 한계치( $SOC_M$ )를 비교한다. 이 값이 운용 한계치를 초과하면, 각 시간대별 배터리 전압( $V_{Bat}(t)$ )과 CVCF 인버터의 운용 한계전압( $V_M$ )을 비교한다.

[Step 3] CVCF 인버터에서 에너지 sinking이 발생하며, SOC가 운용 한계치를 초과하고, 각 시간대별 배터리 전압 ( $V_{Bat}(t)$ )이 CVCF 인버터의 운용 한계전압( $V_M$ )을 벗어나 경우에는 발생된 에너지 sinking 크기( $E_S(t)$ ) 만큼의 태양광전원을 순차적으로 차단( $P_{PV-cut}(t)$ )한다.

[Step 4] CVCF 인버터에 에너지 sinking이 발생하지 않거나, SOC가 운용 한계치( $SOC_M$ ) 이내에 있거나, 각 시간대별 배터리 전압( $V_{Bat}(t)$ )이 CVCF 인버터의 운용 한계전압( $V_M$ )을 벗어나지 않는 경우에는 [Step 2]로 돌아가서 해당 과정을 반복하고, 운용 시간대( $t$ )가 설정한 최대시간( $t_{max}$ )에 도달하면 반복을 종료한다.

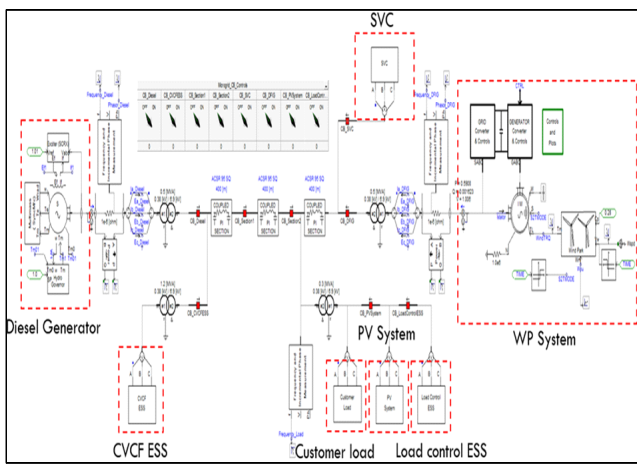
상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] 마이크로그리드의 과도상태 운용알고리즘

### 3. CVCF 인버터기반 마이크로그리드 모델링

CVCF 인버터, 태양광전원, 풍력발전기, 부하제어용 ESS, SVC로 구성된 CVCF 인버터 기반 도서지역용 마이크로그리드를 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, 디젤발전기는 비상시에만 계통에 전력을 공급하고, 정상시에는 CVCF 인버터가 계통의 전압과 주파수를 제어하며, 태양광전원과 풍력발전기가 계통에 전력을 공급한다. 또한, 풍력발전기 기동시에는 SVC가 적정한 무효전력을 보상하여 풍력발전기가 계통에서 탈락되지 않도록 운영되고, 부하제어용 ESS는 충전 및 방전 동작을 통하여 계통의 유효전력을 제어하도록 CVCF 인버터 기반 도서지역용 마이크로그리드를 구성한다.

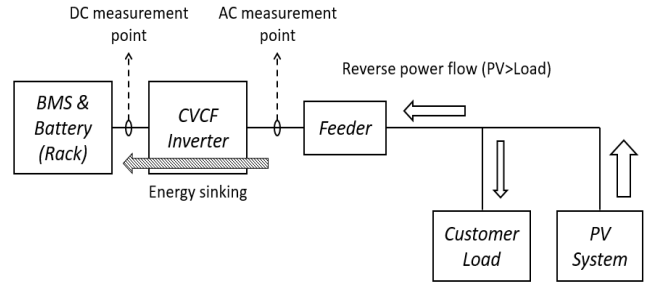


[그림 3] CVCF 인버터 기반 도서지역용 마이크로그리드 모델링

### 4. 시뮬레이션 결과

#### 4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 도서지역용 마이크로그리드의 과도상태 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 모델계통은 그림 4과 같이 배터리, CVCF 인버터, 수용가부하, 저압 배전선로 그리고 태양광전원으로 구성하였다. 이 그림에서 화살표 방향은 신재생에너지전원의 용량이 수용가부하보다 큰 경우 CVCF에서 발생하는 에너지 Sinking을 나타낸 것이다. 또한, 각 구성에 대한 운용조건 및 설정치는 표 1과 같으며, 여기서 CVCF 인버터용 배터리의 운용 한계 SOC는 85%이고, 운용 한계전압은 131.8[V]로서 인버터 최대 전압의 약 95%의 여유율로 산정한 것이다. 또한, 에너지 sinking을 발생시키기 위하여 수용가부하량은 6[kW]로 고정시키고, 태양광전원의 출력은 0[kW]에서 18[kW]까지 3[kW]단위로 단계적으로 증가시키며 시뮬레이션을 수행한다.



[그림 4] CVCF 인버터 기반 마이크로그리드의 계통 구성도

[표 1] 구성요소에 대한 시뮬레이션 조건

items		conditions
battery (rack)	configuration of cell	32S84P (Lithium-ion cell, 3.7V)
	range of operation voltage(BMS)	89.6 ~ 134.4[V]
	setting of SOC( $SOC_M$ )	85[%]
CVCF inverter	range of operation voltage(DC)	90 ~ 134[V]
	AC output voltage & frequency	220 ± 6% [V] & 60 ± 0.2 [Hz]
	setting of voltage ( $V_M$ )	131.8[V] ( $\eta=0.95$ )
customer load		6 [kW]
PV system		0 ~ 18[kW]

한편, 도서지역용 마이크로그리드의 과도상태 운용 시나리오는 표 2와 같이, SOC가 과도상태 운용범위에 있는 경우(Case I)와 SOC가 과도상태 운용범위에 있지만, 신재생에너지전원을 단계별로 탈락시킨 경우(Case II)로 분류한다.

[표 1] 과도상태 운용 시나리오

	Case I	Case II
initial SOC(%)	90%	90%
setting of $V_M$ and $SOC_M$	X	0

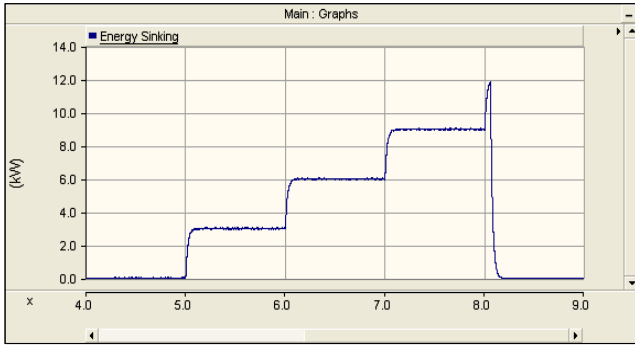
(Note: 설정은 0를, 설정하지 않음은 X를 나타냄)

CVCF 인버터용 배터리의 SOC가 과도상태 운용범위인 90%일 때의 특성을 분석하면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5의 (a)는 시간대별 에너지 sinking의 크기를 나타낸 것이며, (b)는 에너지 sinking의 크기에 따른 CVCF 인버터용 배터리의 전압, (c)와 (d)는 각각 마이크로그리드의 전압과 주파수를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, CVCF 인버터용 배터리 전압은 128.8[V]

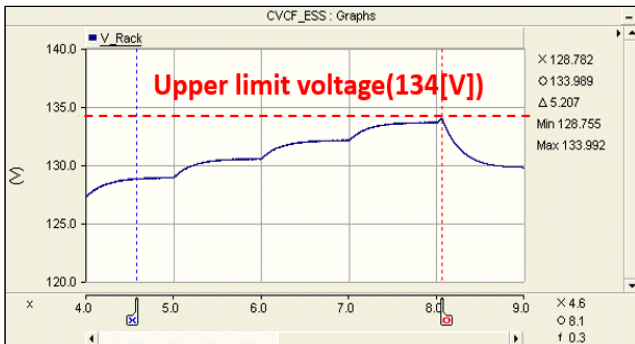
에서 134[V]까지 급격하게 상승되어, 인버터의 허용전압 범위(90~134[V])를 벗어나 인버터가 탈락되는 것을 알 수 있었다. 따라서, SOC가 과도상태 운용 범위에 있는 경우, 에너지 sinking을 해소할 수 있는 적절한 조치가 필요함을 알 수 있다.

(4) 제안한 알고리즘을 적용한 경우(Case III)

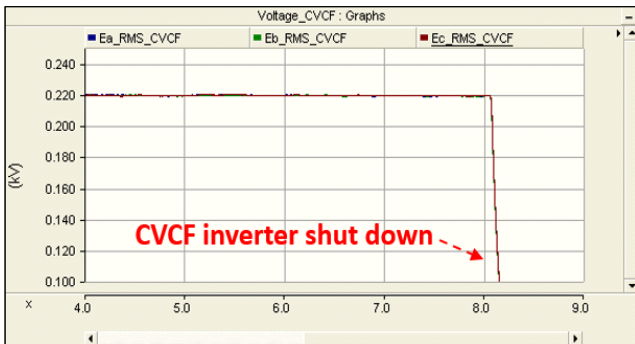
제안한 알고리즘을 적용한 경우의 마이크로그리드 운용특성을 분석하면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)는 시간대별 에너지 sinking의 크기를 나타낸 것이며, (b)는 에너지 sinking의 크기에 따른 CVCF 인버터용 배터리의 전압, (c)와 (d)는 각각 마이크로그리드의 전압과 주파수를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 9[kW]의 에너지 Sinking이 발생하면, CVCF 인버터용 배터리 전압은 128.7[V]에서 설정치인 131.8[V] ( $\eta = 95\%$ )에 도달하게 된다. 따라서, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 3[kW]씩 차단하면, 에너지 sinking 크기와 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 동시에 단계적으로 감소됨을 알 수 있다. 즉, 배터리 전압이 인버터의 운용전압 범위(90~134[V])를 벗어나지 않고, 마이크로그리드의 전압 및 주파수가 안정적으로 유지될 수 있으므로, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.



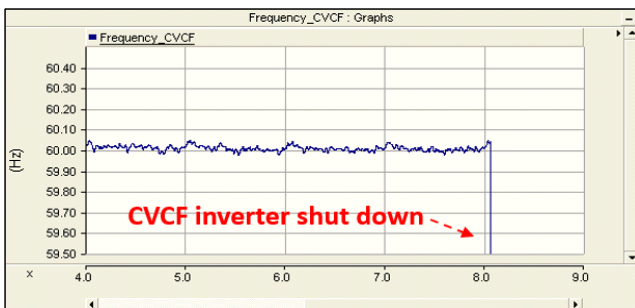
(a) Energy sinking



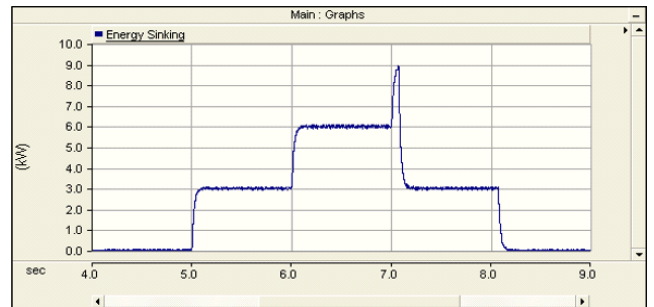
(b) Battery voltage



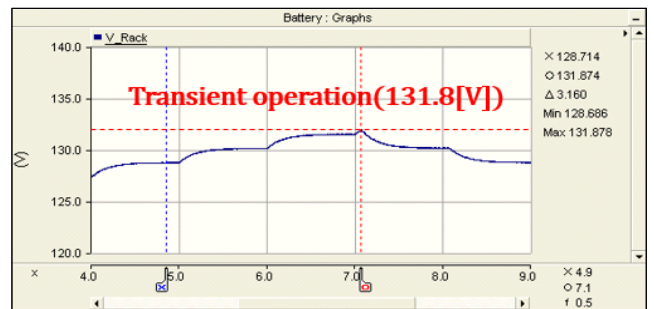
(c) Micro-grid voltage



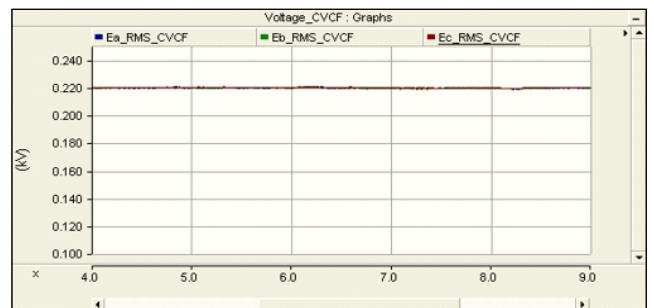
(d) Micro-grid frequency



(a) Energy sinking

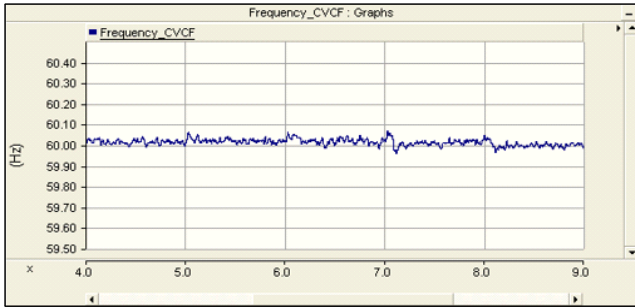


(b) Battery voltage



(c) Micro-grid voltage

[그림 5] SOC가 정상 운용범위를 벗어난 경우의 과도상태 운용특성



(d) Micro-grid frequency

[그림 6] 제안한 운용방식에 의한 과도상태 운용특성

## 5. 결 론

본 논문에서는 CVCF 인버터 기반의 도서지역용 마이크로그리드를 안정적으로 운용하기 위하여, 에너지 Sinking 시에 발생 가능한 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지할 수 있는 과도상태 운용알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안한 과도상태 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로 Micro-grid의 과도상태 운용 특성을 분석하였다. 에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CVCF 인버터용 배터리의 SOC가 과도상태 운용범위인 90%일 때의 특성을 분석한 결과, 에너지 sinking 현상이 발생되면 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 125.3[V]에서 134[V]까지 급격하게 상승되어, 인버터의 허용전압 범위 (90~134[V])를 벗어나 인버터가 탈락되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 제안한 과도상태 운용알고리즘을 적용하여 SOC가 과도상태 운용범위인 90%일 때의 특성을 분석한 결과, 에너지 sinking이 발생하면 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 3[kW]씩 차단하여 에너지 sinking 크기와 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 동시에 단계적으로 감소되고, 마이크로그리드의 계통전압과 주파수가 적정하게 유지되어, CVCF용 인버터의 탈락을 사전에 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] IEC White paper, "Microgrids for disaster preparedness and recovery with electricity continuity plans and systems", March, 2014.
- [2] S. Katsuaki, O. Shin'ya, "Study of The Micro-grid for The Cold Climates Island", IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy

Engineering Conference(APPEEC), pp. 1580~1583, 2016.

- [3] Alexander Franklin, Ruifeng Yan, Tapan Kumar Saha, "Investigation of a Micro-grid Operation: A Case Study of Heron Island Network, Australia", Australasian Universities Power Engineering Conference(AUPEC), pp. 1~6, 2013.
- [4] Woo-Hyun Hwang, Sang-Kyu Kim, Jung-Ho Lee, Woo-Kyu Chae, Je-Ho Lee, Hyun-Jun Lee, Jae-Eon Kim, "Autonomous Micro-grid Design for Supplying Electricity in Carbon-Free Island", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.9, No.3, pp. 1112~1118, 2014.
- [5] 김승호, 최성식, 김승중, 노대석, "마이크로그리드용 4-Leg 방식 PCS의 각상 개별제어 알고리즘에 관한 연구", 한국산학기술학회논문지, 제18권, 제11호, pp.817-825, 2017.11.