Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 9 pp. 526-535, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.9.526
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

CVCF 인버터 기반의 Micro-grid에 있어서 과도상태 운용알고리즘에 관한 연구

이후동[1], 최성식[1], 남양현[1], 손준호[2], 노대석[1*]
[1]한국기술교육대학교 전기공학과
[2]LG전자

A Study on the Transient Operation Algorithm in Micro-grid based on CVCF Inverter

Hu-Dong Lee[1], Sung-Sik Choi[1], Yang-Hyun Nam[1], Joon-Ho Son[2] and Dae-Seok Rho[1*]
[1]Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
[2]LG Electronics

요 약 최근, 도서지역에서는 CO_2 배출의 저감을 위하여, 디젤발전기의 가동률을 줄이고 신재생에너지전원의 비중을 높여, 계통을 안정적으로 운용할 수 있는 방안들이 연구되고 있다. 특히, Carbon free를 목표로 하는 도서지역용 Micro-grid에서는 CVCF(constant voltage & constant frequency) 인버터를 기반으로 운용되는데, CVCF 인버터용 배터리의 SOC(state of charge) 상태에 따라, 계통의 부하소비 보다 신재생에너지전원의 출력이 큰 경우에 CVCF 인버터 내에서 발생하는 에너지 Sinking에 의하여, 배터리측 전압이 급격히 상승하여, 인버터의 과전압 보호동작에 의해 CVCF 인버터가 급격하게 탈락되어 계통에 정전이 발생하는 문제점이 일어날 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CVCF 인버터를 기반으로 한 도서지역용 Micro-grid의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 Sinking 시에 발생 가능한 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지하는 과도상태 운용알고리즘을 제안한다. 또한, PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, 제안한 알고리즘을 적용한 Micro-grid의 과도상태 운용특성을 분석한 결과, 배터리의 전압과 SOC에 따라 CVCF 인버터가 탈락하는 과도상태를 사전에 방지할 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

Abstract Recently, in order to reduce the CO_2 emission in the island area, countermeasures to operate power system in a stable manner are being researched due to decrease of the operation rate in diesel generators and the increase of renewable energy sources. The phenomenon of energy sinking can be occurred if the output of renewable energy sources is larger than customer loads. Voltage of CVCF(constant voltage & constant frequency) battery could be increased rapidly according to the condition of SOC(state of charge) and blackout could be occurred due to shut-down of CVCF inverter, at carbon free island micro-grid based on the CVCF inverter. In order to overcome these problems, this paper proposes a transient operation algorithm in CVCF based micro-grid which in advance prevents shut-down of CVCF inverter during the energy sinking. And also this paper proposes the modeling of micro-grid including CVCF inverter, PV system, customer load using PSCAD/EMTDC S/W. From the results of micro-grid modeling based on the proposed algorithm, it is confirmed that CVCF based micro-grid can properly prevent shut-down of CVCF inverter according to SOC and battery voltage of CVCF inverter when energy sinking is occurred.

Keywords : Battery, Carbon free island Micro-grid, CVCF inverter, Energy sinking, SOC, Transient operation

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20163010012310)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20172410100030)에 의하여 수행되었음.
*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr
Received July 16, 2018 Revised July 31, 2018
Accepted September 7, 2018 Published September 30, 2018

1. 서론

최근, 지구 온난화 및 일본의 원전사고, 고유가 등의 에너지 위기가 전 세계적인 문제로 부각되고 있다. 이러한 에너지와 환경 문제를 해결할 수 있는 방안으로 전력 시스템의 효율화와 신재생에너지전원의 도입확대가 해결책으로 제시되고 있으며, 이를 위한 기술적인 방안 중의 하나로 도서지역용 Micro-grid가 활발히 보급되고 있다[1-3]. 즉, 도서지역에서는 디젤발전기의 가동률을 줄이고 신재생에너지전원의 비중을 높여, 계통을 안정적으로 운용할 수 있는 방안들이 연구되고 있다[4-5]. 특히, Carbon free 도서지역용 Micro-grid에서는 기존의 디젤발전기 대신, CVCF 인버터가 계통의 전압과 주파수를 제어하게 된다[6]. 그러나, CVCF 인버터를 기반으로 하는 도서지역용 Micro-grid에서는 CVCF 인버터용 배터리의 SOC 상태에 따라, 계통 부하보다 신재생에너지전원의 출력이 클 때 발생하는 에너지 Sinking(과도상태)의 경우에, 배터리 전압이 급격히 상승하여, 인버터의 과전압 보호동작에 의해 CVCF 인버터가 급격하게 탈락되어 정전이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CVCF 인버터 기반 Micro-grid의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 Sinking 시에 발생 가능한 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지하는 과도상태 운용알고리즘을 제안한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, CVCF 인버터, 태양광전원, 수용가부하로 구성된 Micro-grid의 모델링을 제시하고, 과도상태인 에너지 Sinking과 CVCF 인버터의 운용특성을 분석한다. 제안한 알고리즘을 바탕으로 Micro-grid의 과도상태 운용특성을 분석한 결과, 배터리의 전압과 SOC에 따라 CVCF 인버터가 탈락할 수 있는 과도상태를 사전에 방지하는 방안을 제시하여, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. 도서지역용 Micro-grid의 운용특성 분석

일반적으로 도서지역용 Micro-grid는 Fig. 1과 같이 디젤발전기, 신재생에너지전원, ESS(energy storage system), 수용가부하 등으로 구성된다. 여기서, 디젤발전기와 신재생에너지전원은 부하에 전원을 공급하며, ESS는 신재생에너지전원의 출력안정화, 부하제어 등 다양한 기능을 수행한다[7].

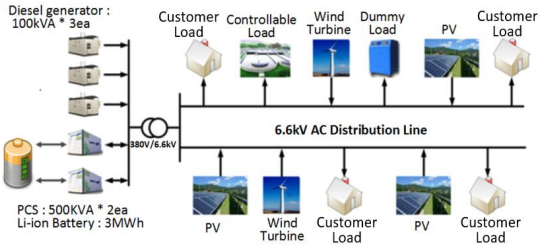


Fig. 1. Configuration of conventional island micro-grid

한편, 최근에는 CO_2의 배출량을 줄이기 위하여, Fig. 2와 같이 기존의 디젤발전기 대신 신재생에너지전원과 ESS의 운용비중을 높이고, CVCF 인버터가 Micro-grid의 전압과 주파수를 제어하는 Carbon free 도서지역용 Micro-grid의 운용이 증가하고 있다. 그러나, 인버터 베이스의 Micro-grid에서는 계통의 총 부하보다 신재생에너지전원의 출력이 더욱 큰 경우에 발생하는 에너지 Sinking 상태에서, Fig. 3과 같이 BMS(battery management system) 또는 인버터의 과전압 보호동작에 의해 CVCF 인버터가 급격하게 탈락되어, 계통에 정전이 발생하는 문제가 일어날 수 있다. 이것은 배터리의 SOC 상태에 따라, 배터리 전압이 급격하게 상승될 가능성이 있기 때문이다.

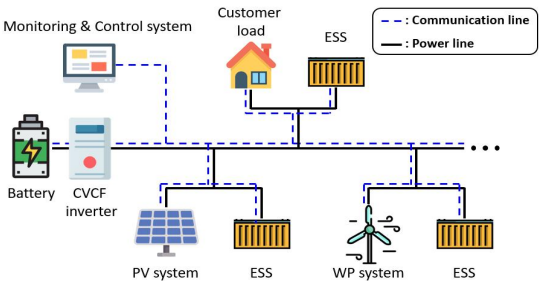


Fig. 2. Configuration of CVCF inverter based micro-grid

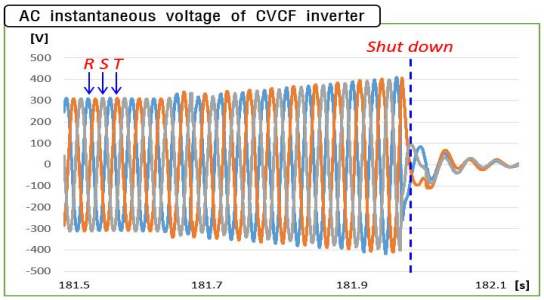


Fig. 3. Shut-down of CVCF inverter in case of energy sinking

3. CVCF 인버터 기반 Micro-grid의 과도상태 운용알고리즘

3.1 과도상태 운용모델링

디젤발전기가 없는 Carbon free 도서지역용 Micro-grid에서 계통의 전압과 주파수를 일정하게 유지하기 위한 CVCF 인버터의 운용조건은 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{inv}(t) = constant\ V \tag{1}$$

$$f_{inv}(t) = constant\ f \tag{2}$$

여기서, $V_{inv}(t)$: 인버터의 출력 전압, $Constant\ V$: 목표 전압, $f_{inv}(t)$: 인버터의 출력 주파수, $Constant\ f$: 목표 주파수

한편, Fig. 4는 리튬이온전지의 SOC와 전압과의 상관관계를 나타낸 것이며, 일반적으로 SOC가 약 85% 내외에서 CV(constant voltage)충전을 하게 되어, 단자전압이 급격히 상승하게 된다[8]. 즉, Micro-grid에서 에너지 Sinking이 발생하는 경우, SOC가 85% 보다 적으면 CC(constant current) 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 최대 전압에 여유율(η)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 (3)과 같다.

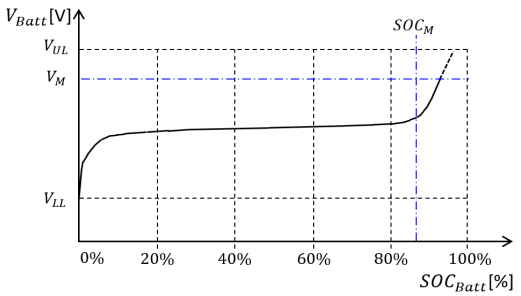


Fig. 4. Transient operation strategy of CVCF inverter

$$V_M = V_{LL} + (V_{UL} - V_{LL}) \times \eta \tag{3}$$

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

상기와 같이 에너지 Sinking시에 발생하는 CVCF 인버터용 배터리의 급격한 전압상승을 방지하기 위하여, 적당한 양의 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 (4)와 같다.

$$E_S(t) = (P_{PV}(t) - P_{PV-cut}(t)) - P_L(t) \tag{4}$$

여기서, $E_S(t)$: 에너지 Sinking의 크기, $P_{PV}(t)$: Micro-grid에서의 태양광전원 총 출력, $P_L(t)$: Micro-grid에서의 수용가부하 총 소비량, $P_{PV-cut}(t)$: 태양광전원의 차단량

3.2 과도상태 운용알고리즘

상기에서 제안한 과도상태 운용전략 및 운용 모델링을 바탕으로 CVCF 인버터를 이용한 Micro-grid의 과도상태 운용 알고리즘을 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 적정한 여유율(η)을 고려하여 CVCF 인버터의 운용 한계전압(V_M)을 산정한다. 또한, Micro-grid의 운용 시간대(t)와 태양광전원의 차단용량($P_{PV-cut}(t)$)을 설정한다.

[Step 2] 각 시간대별로 Micro-grid의 태양광전원의출력량($P_{PV}(t)$)과 수용가 부하량($P_L(t)$)에 의하여 에너지 Sinking의 크기($E_S(t)$)를 산정한다. 이 값으로부터 CVCF 인버터가 과도상태이면, CVCF 인버터용 배터리의 SOC($SOC_{Bat}(t)$)와 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 발생하고, SOC가 운용 한계치를 초과하며, 각 시간대별 배터리 전압($V_{bat}(t)$)이 CVCF 인버터의 운용 한계전압(V_M)을 벗어난 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 Fig. 5와 같다.

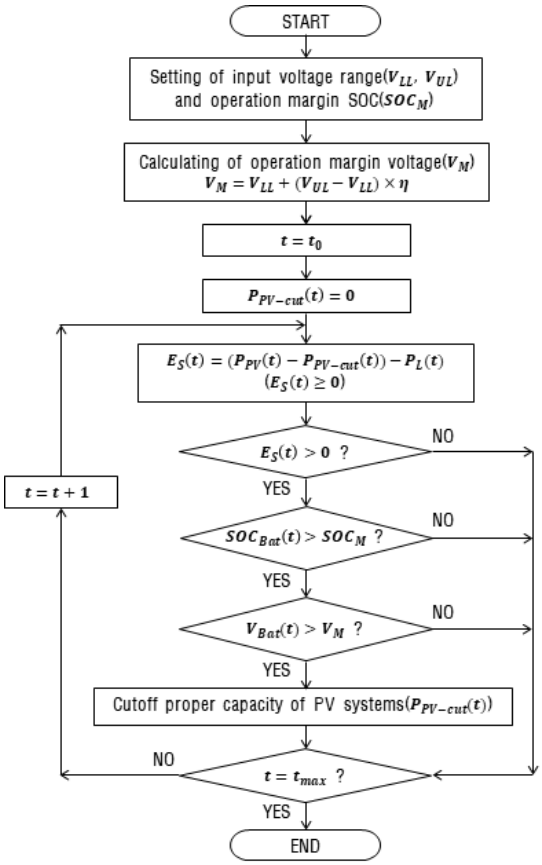


Fig. 5. Transient operation algorithm of CVCF inverter based micro-grid

4. PSCAD/EMTDC에 의한 CVCF 인버터 기반 Micro-grid의 모델링

4.1 CVCF 인버터 모델링

CVCF 인버터는 제어부와 인버터부로 구성된다. 구체적으로, 제어부에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성을 빠르게 하기 위하여, 식 (5)과 같이 PI 제어 알고리즘을 이용한다. 여기서, 식 (5)의 첫 번째 항은 목표전압(V_{ref})과 현재 출력전압($V(t)$)의 차를 고려하여 비례제어신호를 산정하고, 두 번째 항은 오차를 누적하여 적분제어신호를 구한다. 세 번째 항은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 제어신호를 나타낸다. 한편, 식 (6)은 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, 식 (5)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(pulse width modulation) 신호로 변환된다.

$$Wave_{ref}(t) = \left[K_p\left(1-\frac{V(t)}{V_{ref}}\right)+K_i\int_{t_0}^{t}\left(1-\frac{V(\tau)}{V_{ref}}\right)d\tau\right] \quad (5)$$

$$\cdot\ Sin(2\pi ft+\phi)$$

$$Wave_{carrier}(t) = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{Cos(2n-1)\omega t}{(2n-1)^2} \quad (6)$$

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 기준파형을 구하는 식 (5)와 반송파 제어신호 식 (6)을 바탕으로, CVCF 인버터의 한 상에 대한 제어부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 Fig. 6과 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 역할을 수행하는 것을 나타낸다. 또한, D부분은 삼각파의 반송파를 출력하는 것을 나타내고, E부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환하는 것을 나타낸다.

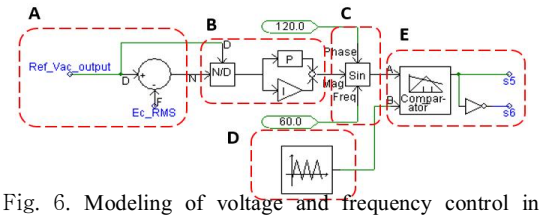


Fig. 6. Modeling of voltage and frequency control in CVCF inverter

또한, CVCF 인버터용 배터리는 여러 종류의 모델이 있지만, 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 전지 내부전압 및 내부저항으로 구성된 등가회로를 적용한다[9]. 여기서, $E_{bat}(t)$는 배터리의 기전력, $V_{bat}(t)$는 배터리의 단자전압 그리고 R_{bat}은 배터리의 내부저항이다.

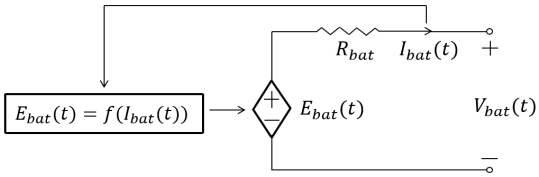


Fig. 7. Equivalent circuit of CVCF battery

구체적으로, 배터리의 기전력 $E_{bat}(t)$는 SOC의 역함수와 지수함수의 조합으로 나타내며, 여기서 SOC는 배터리 전체 용량에서 누적된 전류의 비로 충전상태를 의미한다. 또한, 배터리 단자전압 $V_{bat}(t)$는 기전력 $E_{bat}(t)$에서 내부저항에 의한 전압강하를 뺀 값이며, 이를 수식으로 나타내면 식 (7) ~ 식 (9)와 같다.

$$E_{bat}(t) = E_0 - K\frac{1}{SOC} + Aexp(-BQ(1-SOC)) \quad (7)$$

$$SOC = \frac{Q - \int_{t_0}^{t_1} I_{bat}(t)\,dt}{Q} \times 100 \quad (8)$$

$$V_{bat}(t) = E_{bat}(t) - I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (9)$$

여기서, $E_{bat}(t)$: 배터리 기전력, E_0: 배터리 전압 상수, K: 양극화 상수, Q: 배터리 용량, A: 지수함수 크기 상수, B: 반전지수함수 시간 상수, SOC: 충전상태(%), $V_{bat}(t)$: 배터리 전압, R_{bat}: 배터리 내부저항, $I_{bat}(t)$: 배터리 전류

따라서, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배터리의 등가회로를 모델링하면 Fig. 8의 A부분이고, 보호동작을 수행하기 위한 BMS를 나타내면 그림 10의 B부분이다. 여기서, BMS는 SOC가 0~100%의 범위를 벗어나거나 전압이 설정된 범위를 벗어나면, 배터리의 회로를 차단하도록 제어한다.

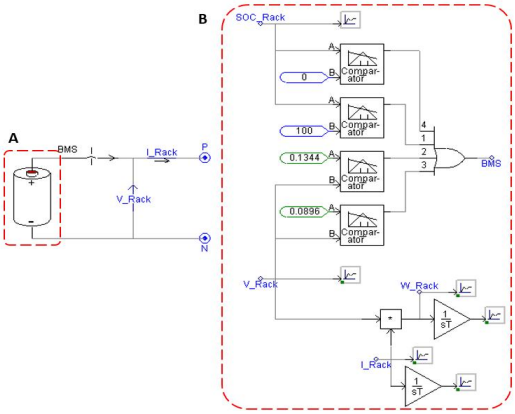


Fig. 8. Modeling of CVCF battery and BMS

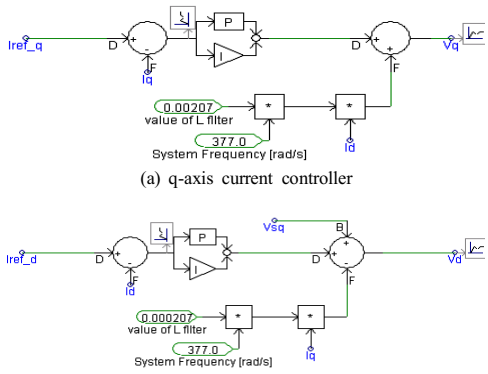
4.2 태양광전원 모델링

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (10)과 식 (11)과 같고, 이 제어기를 모델링하면 Fig. 9와 같다[10]. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (10)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (11)$$

여기서, V_d, V_q: 인버터 출력을 위한 d-q축 전압, I_{ref-dq}: 인버터 출력의 기준전류, I_q, I_d: d-q동기좌표계에 의한 계통전류(직류), V_{sq}: 계통의 순시전압



(a) q-axis current controller

(b) d-axis current controller

Fig. 9. Modeling of current controller in PV system

4.3 수용가부하 모델링

수용가 부하는 R, L, C를 조합하여 다양한 조건을 모의할 수 있도록 모델링하면 Fig. 10과 같다. 여기서, R(저항)부하는 상당 100[W]~10[kW] 범위로 조절이 가능하고, L(리액터)과 C(콘덴서)부하는 상당 100[Var]~10[kVar] 범위로 조절이 가능하도록 구성한다.

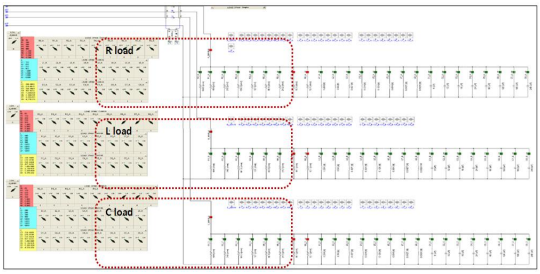


Fig. 10. Modeling of customer loads

4.4 전체 시스템 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 일정한 전압 및 주파수 제어하기 위한 CVCF 인버터, 태양광전원과 수용가부하로 구성된 Micro-grid의 전체 시스템을 나타내면 Fig. 11과 같다.

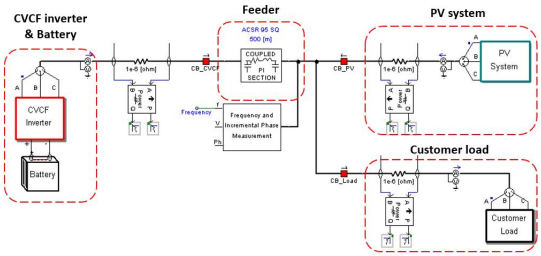


Fig. 11. Entire system modeling of CVCF inverter based micro-grid

5. 시뮬레이션 결과 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 도서지역용 Micro-grid의 과도상태 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 모델계통은 Fig. 12와 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 Table 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.

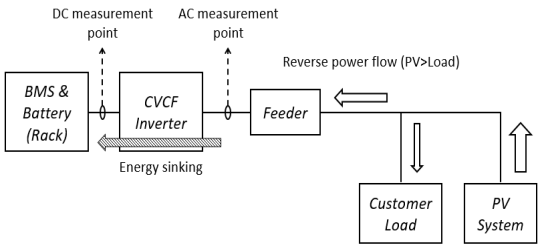


Fig. 12. Configuration of CVCF inverter based micro-grid

Table 1. Simulation conditions of micro-grid components

items		conditions
battery (rack)	cell type	ICR 18650-22F (32S84P)
	range of operation voltage (BMS)	89.6 ~ 134.4[V]
	setting of SOC(SOC_M)	85[%]
CVCF inverter	range of operation voltage (DC input)	90 ~ 134[V]
	AC output voltage & frequency	$220 \pm 6\%$[V] & 60 ± 0.2[Hz]
	setting of voltage(V_M)	131.8[V] (η=0.95)
customer load		6 [kW]
PV system		0 ~ 18[kW]

한편, 도서지역용 Micro-grid의 과도상태 운용 시나리오는 Table 2와 같이, CVCF 인버터용 배터리의 SOC가 정상상태 운용범위에 있는 경우(Case Ⅰ)와 SOC가 과도상태 운용범위에 있는 경우(Case Ⅱ) 그리고 SOC가 과도상태 운용범위에 있지만, 신재생에너지전원을 단계별로 탈락시킨 경우(Case Ⅲ)로 분류한다.

Table 2. Scenarios of transient operation

	Case Ⅰ	Case Ⅱ	Case Ⅲ
initial SOC(%)	50%	90%	90%
setting of V_M and SOC_M	X	X	O

(Note: Set to 'O', not set to 'X')

5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 CVCF 인버터용 배터리의 과도상태 시 전압특성

에너지 Sinking이 발생하는 과도상태 시, CVCF 인버터용 배터리의 전압특성을 분석하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, SOC가 85% 보다 적으면 CC충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 크게 변동되지 않지만, SOC가 85% 보다 크게 되면 CV 충전특성에 의해 CVCF 인버터의 DC측 전압이 급격하게 상승하게 된다. 따라서, SOC가 어느 정도 높은 상태에서 에너지 Sinking을 계속 허용하면, 인버터의 최대전압인 134[V]에서 과전압 보호동작에 의해 인버터가 차단됨을 알 수 있다.

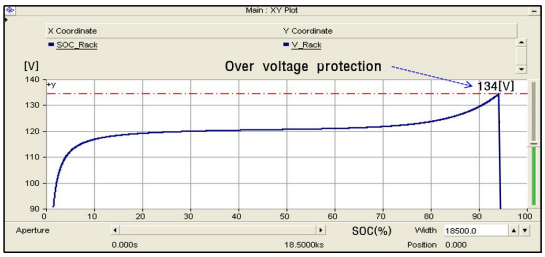
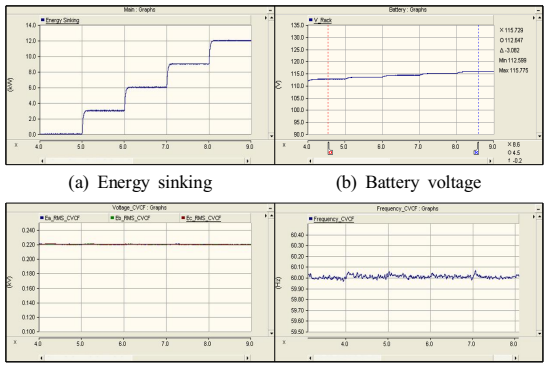


Fig. 13. Voltage characteristics of CVCF battery in case of transient state

5.3 PSCAD/EMTDC에 의한 과도상태 운용특성 분석

5.3.1 배터리 SOC가 정상상태 운용범위에 있는 경우(Case I)

본 논문에서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링을 이용하여, 배터리 SOC가 정상 운용범위에 있는 경우인 50%일 때의 운용특성을 분석하면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14 (a)는 시간대별 에너지 Sinking의 크기를 나타낸 것이며, (b)는 에너지 Sinking의 크기에 따른 CVCF 인버터용 배터리의 전압, (c)와 (d)는 각각 Micro-grid의 전압과 주파수를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 에너지 Sinking의 크기가 각 시간대별로 0[kW]에서 12[kW] 까지 3[kW] 단위로 증가한 경우, 배터리 전압은 112.6[V]에서 115.8[V]까지 상승하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 배터리 전압이 인버터의 운용 전압범위를 벗어나지 않으므로, Micro-grid의 전압 및 주파수가 220±13[V] 및 60±0.2[Hz]의 범위 내에서 안정적으로 공급되고 있음을 확인하였다.



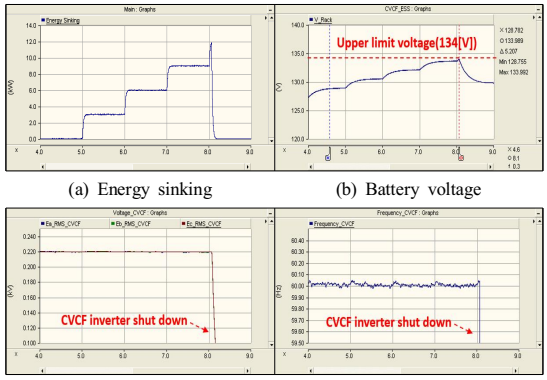
(a) Energy sinking (b) Battery voltage

(c) Micro-grid voltage (d) Micro-grid frequency

Fig. 14. Characteristics of transient operation(Case I)

5.3.2 배터리 SOC가 과도상태 운용범위에 있는 경우(Case II)

CVCF 인버터용 배터리의 SOC가 과도상태 운용범위인 90%일 때의 특성을 분석하면 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig. 15 (a)는 시간대별 에너지 Sinking의 크기를 나타낸 것이며, (b)는 에너지 Sinking의 크기에 따른 CVCF 인버터용 배터리의 전압, (c)와 (d)는 각각 Micro-grid의 전압과 주파수를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 에너지 Sinking이 Case I과 동일한 조건에서 발생되는 경우, CVCF 인버터용 배터리 전압은 125.3[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 적정한 조치가 필요함을 알 수 있다.



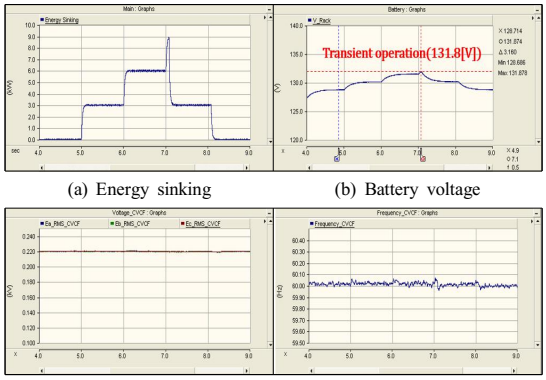
(a) Energy sinking (b) Battery voltage

(c) Micro-grid voltage (d) Micro-grid frequency

Fig. 15. Transient operation characteristics(Case II)

5.3.3 제안한 알고리즘을 적용한 경우(Case III)

5.3.2항의 문제점을 극복하기 위하여, 제안한 알고리즘을 적용한 경우의 Micro-grid 운용특성을 분석하면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16 (a)는 시간대별 에너지 Sinking의 크기를 나타낸 것이며, (b)는 에너지 Sinking의 크기에 따른 CVCF 인버터용 배터리의 전압, (c)와 (d)는 각각 Micro-grid의 전압과 주파수를 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 9[kW]의 에너지 Sinking이 발생하면, CVCF 인버터용 배터리 전압은 125.3[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, Micro-grid의 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

Fig. 16. Transient operation characteristics(Case III)

6. 결 론

본 논문에서는 CVCF 인버터를 기반으로 하는 도서지역용 Micro-grid의 안정적인 운용을 위하여, 에너지 Sinking이 발생하는 과도상태 시에 CVCF 인버터의 탈락을 사전에 방지하는 과도상태 운용 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) PSCAD/EMTDC에 의한 30kW급 도서지역용 Micro-grid의 모델링을 이용하여, 배터리 SOC가 정상상태 운용범위인 50%일 때의 Micro-grid의 운용특성을 분석한 결과, 에너지 Sinking의 크기가 0[kW]에서 12[kW]까지 3[kW] 단위로 증가한 경우, 배터리 전압은 112.6[V]에서 115.8[V]까지 상승하는 것을 확인하였다. 따라서, Micro-grid의 계통 전압 및 주파수가 220±13[V] 및 60±0.2[Hz]의 범위 내에서 안정적으로 공급되고 있음을 확인하였다.

(2) PSCAD/EMTDC에 의한 30kW급 도서지역용 Micro-grid의 모델링을 이용하여, CVCF 인버터용 배터리의 SOC가 과도상태 운용범위인 90%일 때의 특성을 분석한 결과, 에너지 Sinking의 크기가 0[kW]에서 12[kW]까지 3[kW] 단위로 증가한 경우, CVCF 인버터용 배터리 전압은 125.3[V]에서 134[V]까지 급격하게 상승되어, 인버터의 허용전압 범위(90~134[V])를 벗어나 인버터가 탈락되는 것을 알 수 있었다.

(3) 본 논문에서 제안한 과도상태 운용 알고리즘을 30kW급 Micro-grid 시험장치에 적용하여 운용특성을 분석한 결과, 9[kW]의 에너지 Sinking이 발생하면, CVCF 인버터용 배터리 전압은 운용 한계전압(V_M)인 131.8[V]에 도달하게 된다. 이 때, 제안한 알고리즘에 따라 태양광전원을 3[kW]씩 차단하면, 에너지 Sinking 크기와 CVCF 인버터용 배터리의 전압이 동시에 단계적으로 감소되면서 Micro-grid의 계통전압과 주파수가 적정하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서, 제안한 알고리즘에 의하여 CVCF용 인버터의 탈락을 사전에 방지하여, 과도상태 운용알고리즘의 유효성을 확인할 수 있었다.

References

[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.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779757

[3] Alexander Franklin, Ruifeng Yan, Tapan Kumar Saha, "Investigation of a Micro-grid Operation: A CaseStudy of Heron Island Network, Australia", Australasian

Universities Power Engineering Conference(AUPEC), pp. 1~6, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/AUPEC.2013.6725422

[4] K. H. Um, B. K. Kim, “Development of System and Measured Results for Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operation”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.4, pp.165-170, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.165

[5] K. H. Um, “Design of Measuring System for Insulation Resistance and Humidity in High-Power XLPE Cables in Operation and the Relationship Between Insulation Resistance and Humidity in the Oversheath”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.5, pp.179-184, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.5.179

[6] S. H. Hwang, E. Y. Kang, “Performance Analysis of IEEE 802.15.4 for D1 Small Distribution Substation”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.1, pp.115-121, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.1.115

[7] S. A. Jung, H. Bahn, “Real-time Task Scheduling Methods to Incorporate Low-power Techniques of Processors and Memory in IoT Environments”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.2, pp.1-6, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.1

[8] K. H. Um, “Application of Judgement Criteria to Measure Deterioration and to Judge Insulation Resistance in High-Power Live XLPE Cables”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.2, pp.239-244, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.239

[9] B. K. Kim, K. H. Um, “Analysis of Monitored Insulation Data Using Standard Deviation of Leakage Current Data in High-Power Cables at a Thermoelectric Power Station”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.2, pp.245-250, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.245

[10] H. C. Ki, “A Study on Millimeter Wave Power Amplifiers Using Spatial Combining”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.4, pp.77-82, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.4.77

[11] N. S. Kim, “Optimum Power Allocation of Cooperative NOMA Systems based on User Relay”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.5, pp.25-33, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.5.25

[12] 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.
DOI: http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2014.9.3.1112

[13] Jong-Yong Wang, Byung-Ki Kim, Jea-Bum Park, Byung-Mok Kim, Eung-Sang Kim, Dae- Seok Rho, “A Study on the Modeling and Operation Algorithm of Independent Power System for Carbon Free", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.65, No.5, pp. 760～768, 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.5.760

[14] Sang-Hyuk Kim, Il-Yop Chung, Hak-Joo Lee, Woo-Kyu Chae, “Voltage and Frequency Control Method Using Battery Energy Storage System for a Stand-alone Microgrid”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.64, No.8, pp. 1168～1179, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.8.1168

[15] Jung-Sik Choi, Seung-Yeol Oh, Dong-Hwa Chung, Dae-Seak Cha, "A Study on the PMS Control Strategy for Stable Operation of Stand-alone Micro Grid System based on CVCF ESS", Journal of the Korean Institute of IIluminating and Electrical Installation Engineers, Vol.31, No.5, pp. 51～59, 2017.
DOI: http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2017.31.5.051

[16] Irsyad Nashirul Haq, Riza Hadi Saputra, Frans Edison, Deddy Kurniadi, Edi Leksono, Brian Yuliarto, "State of charge(SoC) estimation of LiFePO4 battery module using support vector regression", Proceedings of the Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering(ICEVT&IMECE), pp. 16~21, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ICEVTIMECE.2015.7496640

[17] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, Abdel-Illah Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 284~289, 2007.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139

[18] Byung-Ki Kim, Kyung-Sang Ryu, Chan-Hyeok Kim, Dae-Seok Rho, “A Study on the Customer Voltage Characteristic of Distribution System with Large Scale PV”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.62, No.1, pp. 29~36, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.62.1.029

이 후 동(Hu-Dong Lee) [정회원]

- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, Micro-grid

최 성 식(Sung-Sik Choi) [정회원]

- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

남 양 현(Yang-Hyun Nam) [정회원]

- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>
배전계통 운용, 신재생에너지, Micro-grid

손 준 호(Joon-Ho Son) [정회원]

- 2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 12월 : 일본 북해도대학교 대학원 정보과학연구과 (공학박사)
- 2016년 12월 ~ 현재 : LG전자 ESS사업부 ESS영업/엔지니어링팀 과장

<관심분야>
전력/배전계통 해석, ESS/분산전원 최적운영, 수요자원거래시장

노 대 석(Dae-Seok Rho) [종신회원]

- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석