

CVCF용 인버터의 Energy Sinking 메커니즘에 관한 연구

한병길*, 태동현*, 이후동*, 이명근*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

A Study on Energy Sinking Mechanism of CVCF Inverter

Byeong-Gill Han*, Dong-Hyun Tac*, Hu-Dong Lee*, Myung-Geun Lee* and Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 독립형 마이크로그리드에서 CVCF 인버터 및 CVCF 인버터용 배터리를 도입하여 마이크로그리드를 운영하는 연구들이 진행되고 있다. 이러한 계통에서 신재생에너지전원의 출력이 부하의 소비전력보다 큰 경우, CVCF용 인버터가 잉여전력을 흡수하는 현상(energy sinking)이 발생한다. 이 현상으로부터 CVCF용 인버터는 배터리의 SOC에 따라 비정상적으로 동작할 수 있으며, 이로 인해 CVCF용 인버터가 계통으로부터 급격하게 탈락하여 마이크로그리드 전체 계통에 정전을 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 독립형 마이크로그리드에서 배터리 SOC에 따라 energy sinking에 의한 CVCF용 인버터 동작특성을 분석하기 위해 energy sinking의 메커니즘을 제시한다. 이 메커니즘은 신재생에너지전원의 출력과 배터리의 SOC, 수용가 부하에 따라 3가지 모드로 분류한다. 한편, PSIM을 이용하여 energy sinking 모델링을 수행하고 배터리 SOC에 따른 CVCF용 인버터의 특성을 분석한 결과, 배터리의 SOC 상태가 100%에 근접하게 도달하여 잉여전력을 흡수할 수 없게 되는 경우, CVCF 인버터의 DC측 커패시터에 흐르는 전류가 급격하게 상승하게 CVCF인버터에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

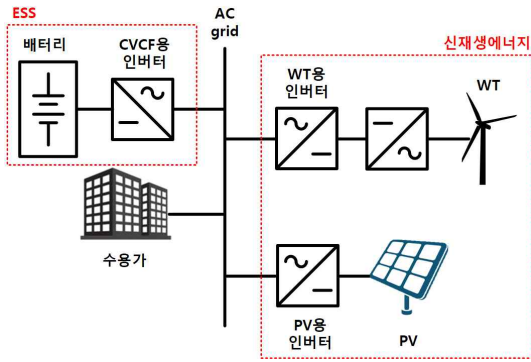
1. 서 론

국·내외적으로 CO2배출의 저감을 위한 기술적인 방안 중 하나로 도서지역의 마이크로그리드에 기 설치된 디젤발전기의 가동률을 줄이고 신재생에너지전원의 비중을 높여 운영하고 있는 실정이다. 특히, 기존의 디젤발전기 대신 정전압, 정주파수(constant voltage constant frequency, CVCF) 기능을 가진 CVCF 인버터 및 CVCF 인버터용 배터리를 도입하여 마이크로그리드를 안정적으로 운영하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. CVCF 인버터를 기반으로 하는 도서지역용 마이크로그리드에서는 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 독립형 마이크로그리드에서 분산전원의 출력이 부하보다 큰 경우, 배터리의 SOC에 따라 CVCF 인버터 특성을 분석하기 위해 energy sinking의 발생 메커니즘을 제시한다. 한편, PSCAD/ EMTDC의 모델

링을 이용하여, 제시한 energy sinking 특성을 분석한 결과, 분산전원의 출력에 따라 CVCF 인버터에 악영향을 미칠 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. CVCF용 인버터의 energy sinking 정의

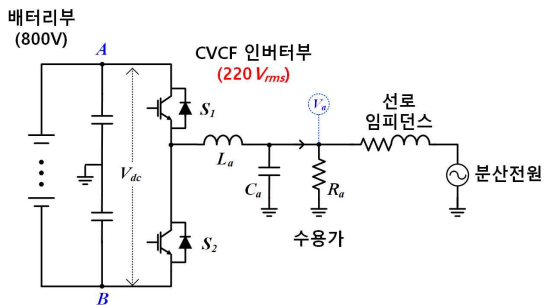
CVCF용 인버터는 그림 1과 같이 신재생에너지원과 수용가부하로 구성된 독립형 마이크로그리드의 정전압 및 정주파수를 제어하는 역할을 수행한다. 이러한 독립형 마이크로그리드에서 신재생에너지원의 출력이 수용가 부하보다 작은 경우, 수용가는 CVCF용 인버터와 신재생에너지원에서 전력을 공급받는다. 한편, 신재생에너지원의 출력이 수용가 부하보다 큰 경우, 수용가는 신재생에너지원으로부터 전력을 모두 공급받게 된다. 이때, 신재생에너지원의 잉여전력이 발생하는데, 이 잉여전력이 CVCF용 인버터로 흘러들어가는 현상을 energy sinking으로 정의한다.



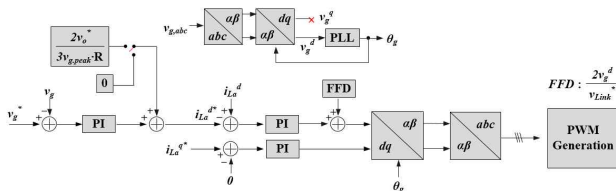
[그림 1] 독립형 마이크로그리드의 구성도

3. CVCF 인버터의 energy sinking 메커니즘

일반적으로 단상 half-bridge CVCF인버터는 그림 2와 같이 배터리부, CVCF 인버터부, 수용가, 선로임피던스, 분산전원으로 나타낼 수 있다. 여기서, CVCF 인버터부의 제어기는 그림 3과 같이 PI 제어기를 사용하여 220Vrms으로 제어를 수행하며, 제어기의 출력으로부터 스위치 S1, S2는 상호적으로 동작한다. 한편, CVCF 인버터는 분산전원의 출력량에 따라, 3가지의 모드로 동작하며, energy sinking 메커니즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] 단상 half-bridge CVCF 인버터의 구성



[그림 3] CVCF 인버터의 PI제어기 구성

(1) Mode I (분산전원 출력량 = 0)

분산전원이 발전하지 않는 경우, 수용가는 CVCF 인버터로부터 모든 전력을 공급받으며, CVCF 인버터의 제어기에서 계측된 전류 값은 수용가에 흐르는 값과 같다.

(2) Mode II (수용가 부하 < 분산전원 출력량)

분산전원의 출력이 수용가 부하보다 작은 경우, 수용가는 분산전원으로부터 공급받는 전력이 증가하기 시작한다. 또한, CVCF 인버터의 제어기에서 계측된 전류 값은 감소하기 때문에 S1의 duty는 감소하며 S2의 duty는 증가한다.

(3) Mode III (수용가 부하 > 분산전원 출력량)

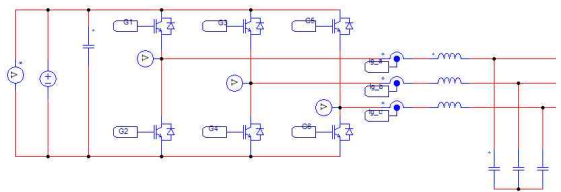
분산전원의 출력이 수용가 부하보다 큰 경우, 수용가는 분산전원으로부터 모든 전력을 공급 받고, CVCF 인버터는 잉여전력을 흡수하기 시작한다. 또한, CVCF 인버터의 충전량이 증가하기 때문에 S1은 duty는 감소하며, S2의 duty는 증가한다.

한편, Mode III의 경우, 배터리의 SOC가 85% 보다 크게 되는 경우, DC 측의 전압이 급격하게 상승하거나, 인버터의 DC 측 커패시터에 과전류가 흘러 H/W에 악영향을 미칠 수 있다.

4. PSIM을 이용한 energy sinking 모델링

4.1 CVCF용 ESS부 모델링

CVCF용 ESS부는 배터리와 인버터로 구성된다. 구체적으로, 인버터부는 그림 4와 같고, 제어부에서는 그림 5와 같이 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성을 빠르게 하고, 식 (1)과 같이 PI제어 알고리즘을 이용한다. 여기서, 식 (1)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 (2)는 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, 식 (1)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(pulse width modulation) 신호로 변환된다.

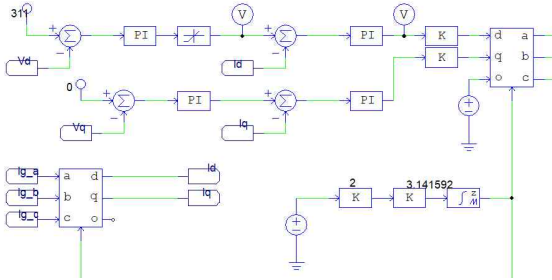


[그림 4] CVCF ESS부 모델링

$$Wave_{ref}(t) = \left[K_p \left(1 - \frac{V(t)}{V_{ref}} \right) + K_i \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{V(\tau)}{V_{ref}} \right) d\tau \right] \cdot \sin(2\pi f t + \phi) \quad (1)$$

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

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



[그림 5] CVCF 전압 및 주파수 제어기 모델링

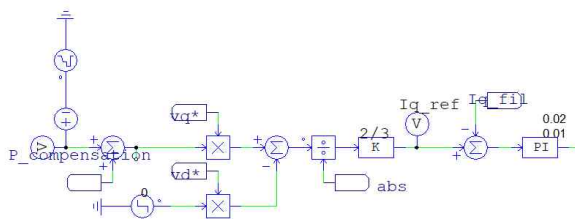
4.2 태양광전원부 모델링

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (3)과 식 (4)와 같고, 이 제어기를 모델링하면 그림 6과 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

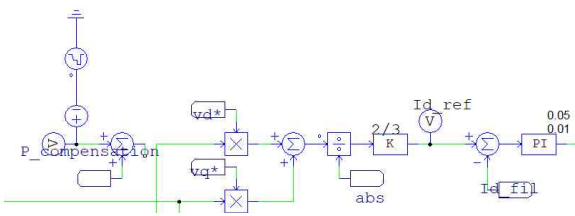
$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (3)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (4)$$

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



(a) q-axis current controller

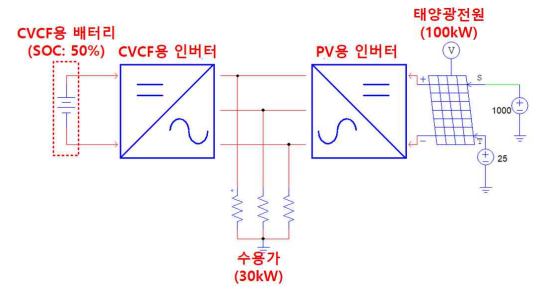


(b) d-axis current controller

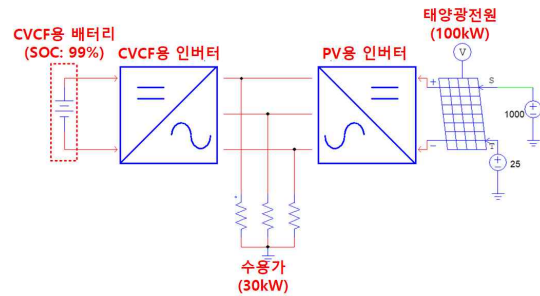
[그림 6] 태양광 인버터 제어기 모델링

4.3 Energy sinking 모델링

배터리 SOC에 따른 energy sinking 모델링은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 7(a)는 CVCF용 배터리의 SOC가 50%이고, 수용가 부하는 30kW인 상태에서 태양광전원용 인버터의 전력을 100kW로 발전하는 경우이다. 또한, 그림 7(b)는 CVCF용 배터리의 SOC가 99%이고, 수용가 부하는 30kW, 태양광전원용 인버터의 전력을 100kW로 발전하는 경우이다.



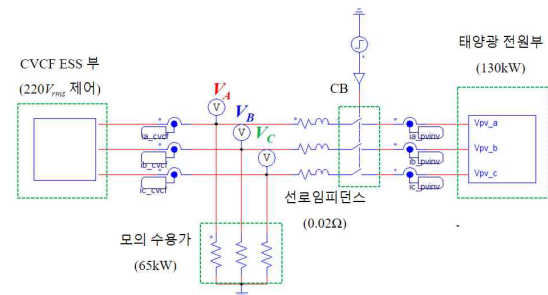
(a) CVCF용 배터리의 SOC가 50%인 경우



(b) CVCF용 배터리의 SOC가 99%인 경우
[그림 6] 태양광 인버터 제어기 모델링

4.4 전체 모델링

CVCF 인버터 기반 독립형 마이크로그리드에서의 독립형 마이크로그리드 전체 모델링은 그림 7과 같이 CVCF ESS부, 태양광 전원부, 모의 수용가부, 선로임피던스로 구성된다. 여기서, 모의 수용가는 유효전력만 고려하기 위해, 저항 부하로 구성한다.



[그림 7] CVCF 인버터 기반 독립형 마이크로그리드 전체 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 CVCF energy sinking 메커니즘의 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, CVCF 용량은 500kW로, 태양광 전원부 용량은 100kW로, 모의 수용가는 30kW로 상정한다. 또한, 선로 임피던스는 저항 성분만 고려하여 0.02Ω 인 것으로 고려하며, 배터리 SOC는 85%인 경우에 동작하는 것으로 상정한다. 한편, CVCF 인버터는 계통 전압을 220Vrms/60Hz로 제어를 수행하며, 수용가는 초기 동작모드에서 모든 전력을 CVCF ESS로부터 공급받는다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내용
배터리 SOC		85[%]
CVCF 인버터	정격출력	500[kW]
	전압 및 주파수	220[V] & 60[Hz]
customer load		30 [kW]
PV system		0 ~ 100[kW]

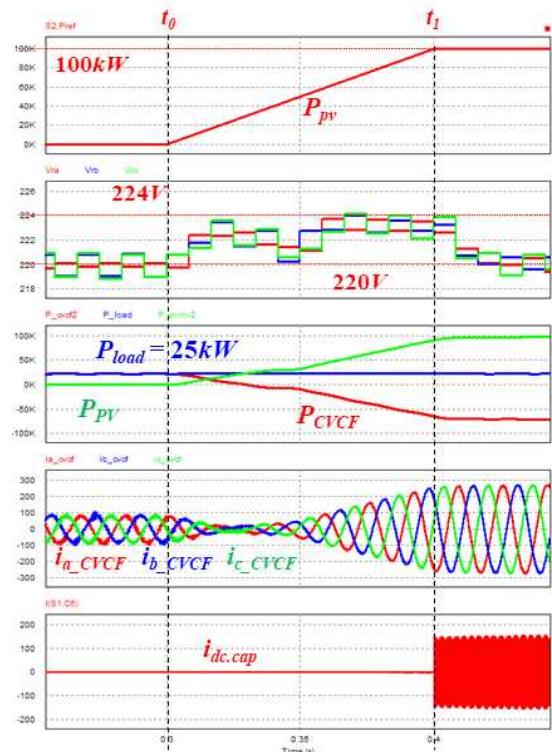
5.2 Energy sinking 특성분석

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 CVCF 인버터의 energy sinking 특성을 분석하면, 그림 8과 같다. 여기서, t_0 는 태양광 출력이 증가하기 시작하고, t_1 은 energy sinking이 시작하는 시간이다. 먼저, t_0 에서 태양광 출력이 120kW로 증가하기 시작하면서 동시에 CVCF 인버터의 방전량은 점차 감소하지만 계통 전압은 일정하게 유지된다. 한편, 태양광 출력이 수용가의 부하보다 크게 되면 energy sinking이 시작한다. energy sinking으로 인해 배터리 SOC가 85% 이상이 되어 더 이상 충전하지 못할 경우, 계통 전압은 일정하게 유지되지만, CVCF 인버터의 DC 측의 커패시터에 큰 리플이 발생하여 기기 내부에 악영향을 미칠 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드에서의 CVCF 인버터에 대하여 energy sinking 메커니즘을 제시하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) PSIM에 의한 독립형 마이크로그리드에서를 모델링 하여 운용특성을 분석한 결과, 분산전원의 출력에 따라 3가지 모드로 운용함을 알 수 있다.



[그림 8] CVCF 인버터의 energy sinking 특성

(2) 태양광 출력이 수용가의 부하보다 크게 되면 energy sinking이 시작한다. 또한, energy sinking으로 인해 배터리 SOC가 85% 이상이 되어 더 이상 충전하지 못할 경우, 계통 전압은 일정하게 유지되지만, CVCF 인버터의 DC 측의 커패시터에 큰 리플이 발생하여 기기 내부에 악영향을 미칠 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 (No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 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