마이크로그리드에서 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 Feeder Flow Mode 운영 기법

문대성*, 강기혁**, 김윤성**, 서재진**, 원동준+
인하대학교 전기공학과

Feeder Flow Control Algorithm for Photovoltaic-Fuel cell Hybrid System in Micro-Grid

Dae-Seong Moon*, Gi-Hyeok Gang**, Yun-Seong Kim**, Jae-Jin Seo**, Dong-Jun Won+
School of Electrical Engineering, INHA University

Abstract - The paper deals with a inverter control scheme to apply feeder flow control in the hybrid system consisted of a photovoltaic system and a fuel-cell system. The inverter operation modes and a feeder control reference is changed by changing of the loads. Simulation results using the PSCAD/EMTDC are presented to establish a inverter control method for a Feeder flow control mode.

1. 서 론

최근 전력시스템에 풍력, 태양광, 연료전지 등의 신재생 에너지가 분산전원의 형태로 널리 보급되고 있다. 마이크로그리드는 이러한 분산전원을 이용한 소규모 네트워크 계통으로, 계통상황에 따라서 주계통과의 연계운전 및 독립운전이 가능하고, 분산전원의 효율적 이용을 통한 에너지 효율향상, 전력의 역송전, 신뢰도향상 등이 가능하기 때문에, 차세대 계통망으로 떠오르고 있다.

마이크로그리드에서 분산전원의 유효전력 출력제어방식에는 Unit 출력제어와 Feeder 조류 제어 방법이 있다[1][2]. Unit 출력제어는 부하의 변화를 고려하지 않고 분산전원이 가진 세팅 값으로 출력하는 방법이며, Feeder 조류 제어는 부하변동에 따라 분산전원의 유효 전력 출력을 제어하여 상위 계통에서 오는 출력을 조절하여 분산전원이 하위 계통의 부하의 일정부분 담당하게 하는 방법이다.

본 논문은 태양광과 연료전지 하이브리드 시스템을 전력시스템에 연계하여, 앞에서 설명한 두 가지 유효전력 출력 제어 방법에 따른 부하량, 분산전원의 출력량, 정격용량을 비교하여, 분산전원의 출력을 제어하는 방법을 제안하였다. PSCAD/EMTDC를 이용하여 분산전원 및 마이크로그리드 해석모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 제안된 제어 방법을 검증하였다.

2. 태양광-연료전지 하이브리드 시스템 모델링

태양광-연료전지 하이브리드 시스템은 그림 1과 같이 각각의 DC/DC 컨버터를 통해 DC버스에 커플링 되어 있으며 AC/DC인버터와 변압기를 통해 AC로 출력을 낸다.

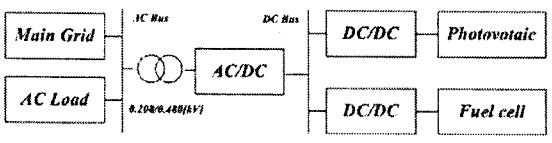

그림 1 태양광-연료전지 하이브리드 시스템 구조
Fig. 1 Photovoltaic and fuel cell hybrid system structure

하이브리드 시스템의 출력 설정 값은 태양광 발전 시스템의 출력과 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 출력 설정 값의 차이만큼을 연료전지 시스템이 보상하게 됨으로써, 원하는 출력 설정 값으로 운전 할 수 있게 된다.

태양광-연료전지 하이브리드 시스템에서 사용되는 연료전지는 제어가 쉽고, 연속운영과 대용량이 가능하기 때문에 제어 불가능한 태양광발전의 출력 보상용으로써 적합하다. 하지만 출력 변동이 큰 태양광발전 출력을 보상하기 위해서는 연료전지의 용량을 태양광발전의 용량보다 같거나 혹은 더 큰 값으로 설치되어야 한다. 만약 연료전지의 발전 용량이 태양광 발전 용량 보다 작다면, 하이브리드 시스템의 출력 범위 중에 예측 불가능한 출력 범위가 발생되기 때문에 문제가 발생한다. 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 연료전지는 수명과 효율성을 고려하여 최소 출력과 최대 출력의 운영 위치를 제한한다. 이로 인해 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 출력은 연료전지의 출력 범위에 의해서 제한되어진다.

2.1 DC/DC 컨버터 제어방법

태양광-연료전지 하이브리드 시스템은 2개의 DC/DC 컨버터를 이용하여 공동의 DC버스에 연결하였다. 태양광 발전 시스템의 DC/DC 컨버터는 Buck-Boost 컨버터를 사용하였고, P&O(perturbation and observation)제어 알고리즘을 이용하여 최대출력 추종제어로 동작한다. 연료전지 시스템은 Boost DC/DC 컨버터를 이용하여 DC 버스의 전압을 유지하는 제어를 한다.

2.2 AC/DC 인버터 제어방법

태양광-연료전지 하이브리드 시스템은 경제성을 고려하여 1개의 AC/DC 인버터를 공용으로 사용한다. AC/DC 인버터 제어는 분산전원의 유효전력을 제어 한다. 분산전원의 유효전력을 제어하는 방법은 분산전원의 출력을 일정하게 유지하도록 제어하는 방법 (Unit power control)과 분산전원 앞단의 선로조류를 일정하게 유지하도록 제어하는 방법(Feeder flow control)이 있다. Unit 출력 제어 방법은 계통의 부하 변동 상황에 무관하게 분산전원의 출력을 일정하게 제어하는 방법이다. 이때 마이크로그리드가 계통과 연계되었을 때, 계통에서 필요한 전력은 주계통으로 부터 공급받아 수요와 공급을 맞출 수 있다. Feeder 조류 제어 방법은 분산전원이 연계된 모선의 조류를 일정하게 유지하여 마이크로그리드 내부의 부하 변동을 분산전원의 출력을 조정하여 제어하는 방법으로 주 계통 측면에서, 마이크로그리드는 일정한 전력을 소비하는 부하처럼 생각할 수 있다는 장점이 있다.

3. 인버터 운영 알고리즘

하이브리드 시스템의 구성을 그림 2와 같이 나타내었다. 여러 개의 분산전원이 직렬로 주계통에 연결되어 있다.

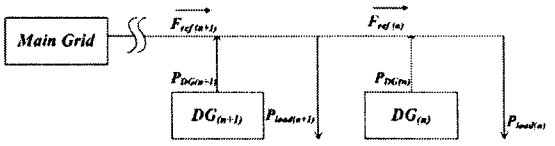

그림 2 하이브리드 시스템 구성
Fig. 2 Hybrid system configuration

이때, 각각의 분산 전원의 Feeder 지령 값($F_{ref(n)}$)은 $P_{DG(n)}^{max}$가 $P_{load(n)}^{max}+F_{ref(n-1)}$보다 크거나 같은 경우, $P_{load(n)}^{min}+F_{ref(n-1)}$이 $P_{DG(n)}^{min}$보다 크거나 같은 경우, 즉 분산전원이 마이크로 그리드 내부의 주파수 변동을 유지 할 수 있으면, 식 (1)에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$P_{laod(n)}^{max} - P_{DG(n)}^{max} + F_{ref(n-1)} \le F_{ref(n)} \le P_{laod(n)}^{min} - P_{DG(n)}^{min} + F_{ref(n-1)} \quad (1)$$

$$F_{DG(n)}^{min} \le F_{ref(n)} \le F_{DG(n)}^{max}$$

직렬로 주계통에 연결된 분산전원에 Feeder 지령 값($F_{ref(n)}$)들은 하위 Feeder 지령 값($F_{ref(n-1)}$)에 최소-최대 범위의 영향을 받는다. 따라서 주계통에서 가장 먼 곳에 위치한 분산전원의 Feeder 지령 값에 범위가 결정되면 그 다음 상위 분산전원의 Feeder 지령 값에 범위가 결정되게 된다. 본 논문에서는 제어불가능 전원원인 태양광의 출력을 최대로 낼 수 있는 $F_{ref(n)}^{min}$으로 하이브리드 시스템의 인버터 제어 운영 알고리즘을 구현하였다.

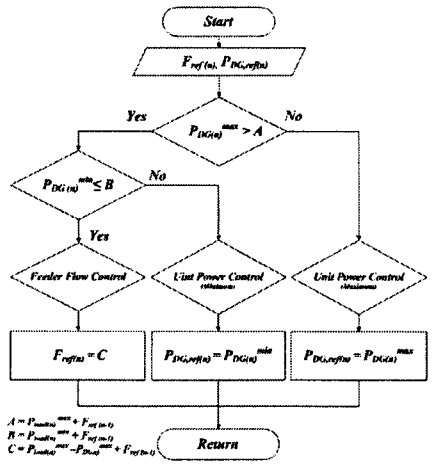

그림 3 하이브리드 시스템의 인버터 운영 알고리즘
Fig. 3 Inverter operation algorithm of the hybrid system

인버터의 Feeder 조류 제어 방법은 마이크로그리드 내부의 부하 변동량과 관계가 있다. 즉, 계통 주파수를 일정하게 유지할 수 있도록 분산전원 시스템의 용량을 산정하면, Feeder 조류 제어 방법은 어떤 부하 상황에서도 분산전원의 출력을 조정하여 마이크로그리드 내부의 부하수급 균형을 맞출 수 있다. 하지만 마이크그리드 내부의 계통 주파수를 분산전원이 감당 할 수 없으면, 주계통에서 출력 제어를 조정하여 마이크로그리드 내부의 수급 균형을 맞추어야 한다. 즉, 분산전원은 Unit 출력 제어 방법으로 인버터 제어로 변경해야 된다. 결과적으로 그림 3과 같이 하이브리드 시스템의 인버터 제어 운영 알고리즘을 도출할 수 있다. 여기서, $F_{ref(n)}$는 Feeder 조류 제어 방법의 인버터 지령 값이며, $P_{ref(n)}$는 Unit 출력 제어 방법의 인버터 지령 값이다. $P_{DG(n)}^{max}$가 $P_{load(n)}^{max}+F_{ref(n-1)}$보다 크거나 같은 경우, $P_{DG(n)min}$이 $P_{load(n)}^{min}+F_{ref(n-1)}$보다 작은 경우에는 인버터는 Feeder 조류 제어 방법(모드1)으로 동작하고, $P_{DG(n)}^{max}$가 $P_{load(n)}^{max}+F_{ref(n-1)}$보다 크거나 같은 경우에는 인버터는 Unit 최소 출력 제어 방법(모드2)으로 동작하게 된다. 또한, $P_{DG(n)}^{max}$가 $P_{load(n)}^{max}+F_{ref(n-1)}$보다 작은 경우에는, 인버터는 Unit 최대 출력 제어 방법(모드0)으로 동작하게 된다.

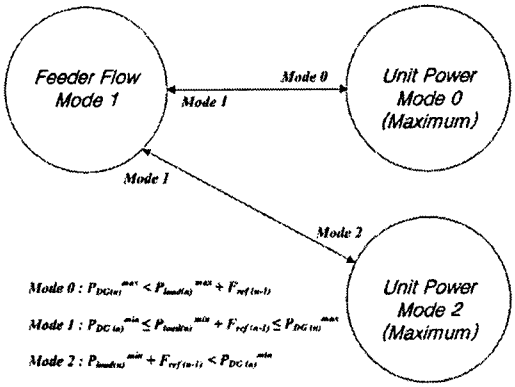

그림 4 하이브리드 시스템의 인버터 운영 모드
Fig. 4 Inverter operation modes of the hybrid system

하이브리드 시스템의 인버터 Feeder 조류 제어 방법은 그림 4와 같이 간략하게 도식화 할 수 있다. 결과적으로 마이크로 그리드 내부의 부하 변동량에 따라서 또는 분산 전원의 최소 최대 출력 용량에 따라서 인버터의 동작 모드는 변경하게 된다.

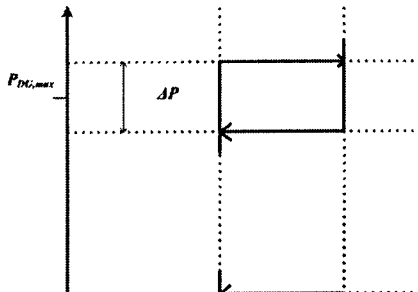

그림 5 히스테리시스를 이용한 인버터 모드 세팅
Fig. 5 Inverter mode setting using hysteresis

그림 5는 히스테리시스를 이용한 인버터 모드 세팅 방법을 보여준다. 하이브리드 시스템의 인버터 제어 알고리즘에 따라서 인버터 제어모드 변경 시, 모드 신호의 On/Off 변경을 최소화하기 위해서 히스테리시스를 이용하였다[3]. 마이크로그리드 내부의 부하량이 일정시간동안 최소값 또는 최대값 근처에서 미세하게 변화하여도, 인버터 제어 모드의 변화 없이 일정한 값을 유지 할 수 있다.

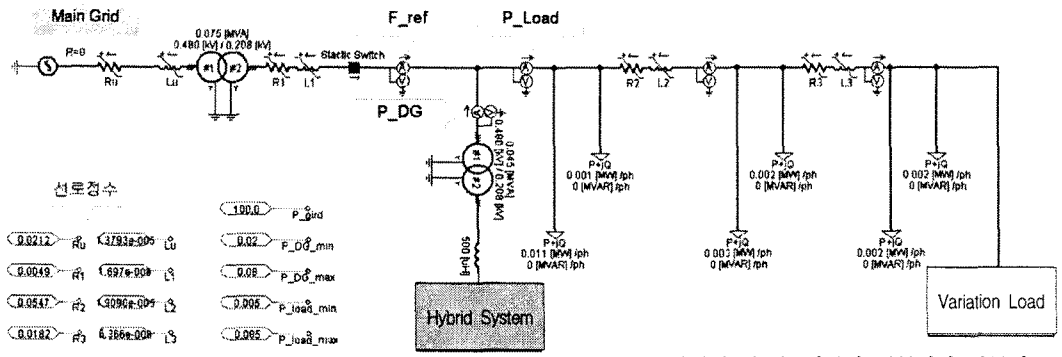

그림 6 마이크로그리드의 시뮬레이션 계통도
Fig. 6 Simulation diagram of the Microgrid test system

4. 시뮬레이션 및 결과

그림 6과 같은 마이크로그리드 계통을 전력계통 동적해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하였다. 태양광 발전시스템과 연료전지 시스템은 각각 등가회로를 이용하여 실제의 분산전원으로 모델링하였다. 유효전력 출력 제어는 분산전원의 인버터 제어 알고리즘을 이용하여서 출력을 조정 하도록 설계하였고, 무효전력을 0으로 설정하여 역률을 고정시켰다. 계통의 부하도 유효전력 부하로만 구성하였다. 테스트 계통은 208V의 3상 계통으로 480V의 상위 계통과 연결하였다. 마이크로내부의 부하변동량은 0.005~0.085[MW]이다. 계통에서 유입되는 부하(P_load)의 양, 태양광-연료전지의 출력(P_PV, P_FC)과 분산전원의 출력(P_DG), 분산전원이 제어하고 있는 조류(F_ref), 분산전원의 인버터 제어모드, 그리고 계통의 주파수의 변동을 그림 7에 나타내었다.

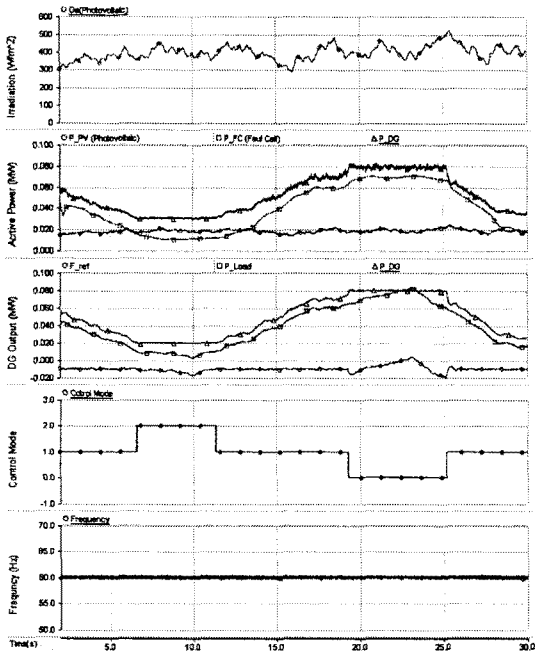

그림 7 모의 결과
Fig. 7 Simulation results

그림 7의 결과에서 볼 수 있듯이 계통에서 변동되는 부하(P_load)는 본 논문에서 제안한 인버터 출력 조절 알고리즘에 의해서 제어 모드가 변경된다. 시간에 따른 제어 모드 변화를 살펴보면, 0초에서 7초 사이에는 모드 1(Feeder flow control)로 운전 되고, 변동하는 부하량에 따라서 분산전원의 유효전력(P_DG)을 조절하게 된다. 즉, 분산전원앞단의 조류(F_ref)를 -0.01로 유지하는 제어를 한다. 이때, 태양광의 출력(P_PV)은 일사량(Ga)에 따라서 변동되며, 연료전지의 출력(P_FC)은 분산전원의 출력과 태양광의 출력의 차이만큼을 보상하여 발전하게 된다. 7초에서 11.5초 사이에는 부하의 변동이 분산전원의 최소 출력 이하로 변동하였기 때문에 인버터 출력 조절 알고리즘에 모드 2(DG Output power control)로 운전 하게 된다. 즉, 분산전원의 출력은 최소값(P_DG_min=0.020[MW])으로 일정하게 유지하는 제어를 하게 되고, 계통에서 변동하는 부하의 양은 주계통으로 부터 공급받게 된다. 11.5초에서 19초 사이에는 0초에서 7초 사이와 동일하게 모드 1(Feeder flow control)로 운전 된다. 19초에서 25.1초 사이에는 부하의 변동이 분산전원의 최대 출력 이상로 변동하였기 때문에 모드 0(DG output power control)로 운전 하게 된다. 즉, 분산전원의 출력은 최대값(P_DG_max=0.080[MW])으로 일정하게 유지하는 제어를 하게 되고, 계통에서 변동하는 부하의 양은 주계통으로 부터 공급받게 된다. 25.1초에서 30초에서는 부하량이 0.080[MW]이하로 감소하였으므로, 모드 1로 동작하게 된다. 마이크로그리드 내부의 계통 주파수는 분산전원의 인버터 제어 모드 변경으로 60[Hz]로 일정 하게 유지된다.

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 내부의 부하변화를 분산전원의 Feeder 조류 제어를 이용해서 효율적으로 운영할 수 있는 인버터 제어 알고리즘을 제안하였다. 분산전원의 출력이 최소-최대 출력 범위를 벗어나면 알고리즘을 통해서 인버터의 모드가 변경되도록 하였다. 히스테리를 이용하여 최소-최대 근처에서의 부하변화는 모드의 변화 없이 일정하게 유지하도록 하였다.

본 논문이 제안한 인버터 제어 알고리즘을 통해서 분산전원의 출력을 안정적으로 운영 할 수 있고, 효율적으로 부하관리를 할 수 있어 계통 운영을 여유롭게 할 수 있다. 이러한 연구는 출력변동으로 인해 마이크로 그리드 내 설치가 어려운 제어 불가능한 전원원인 태양광 발전 및 풍력발전의 설치용량 확대를 가져올 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] R. H. Lasseter, "Control and design of microgrid components," PSERC Final Project Report, Jan. 2006.
[2] P. Piagi, R. H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids," IEEE PES General Meeting, Jun. 2006.
[3] G. Kyriakarakos, G. Papadakis, Essam Sh. Mohamed, Realization and Testing of a Hybrid Renewable Energy Polygeneration System, 4th European Conference PV-Hybrid and Mini-Grid, 8pp, 2008.