마이크로그리드에서 하이브리드 시스템의 Feeder Flow Mode 운영을 위한 제어 알고리즘

논 문
60-1-1

Control Algorithm of Hybrid System for Feeder Flow Mode Operation in Microgrid

문 대 성* · 서 재 진** · 김 윤 성*** · 원 동 준†
(Dae-Seong Moon · Jae-Jin Seo · Yun-Seong Kim · Dong-Jun Won)

Abstract - Active power control scheme for distributed generation in microgrid consists of feeder flow control and unit power control. Feeder flow control is more useful than the unit power control for demand-side management, because microgrid can be treated as a dispatchable load at the point of common coupling(PCC). This paper presents detailed descriptions of the feeder flow control scheme for the hybrid system in microgrid. It is divided into three parts, namely, the setting of feeder flow reference range for stable hybrid system operation, feeder flow control algorithm depending on load change in microgrid and hysteresis control. Simulation results using the PSCAD/EMTDC are presented to validate the inverter control method for a feeder flow control mode. As a result, the feeder flow control algorithm for the hybrid system in microgrid is efficient for supplying continuously active power to customers without interruption.

Key Words : Microgrid, Distributed generation, Hybrid system, Active power control, Feeder flow control, Unit power control

1. 서 론

최근 우리나라 전력 소비량이 지속적으로 증가하는 추세인 반면, 대응하는 발전 설비의 확충은 부지확보 문제와 환경문제, 자원 수급 문제 등으로 대형 화력, 원자력 발전소 건설이 제한되면서 점차 어려워지고 있는 실정이다. 또한, 점차 산업이 고도화됨에 따라 전력품질에 대한 요구도 함께 증가하고 있어서 대규모 발전 단지 중심의 개발보다는 수요관리 및 제어를 고려한 다양한 형태의 에너지원 비중이 점차 확대되고 있다.

현재 풍력, 태양광, 연료전지 등의 신재생 에너지가 분산전원 형태로 전력 계통과 연계되고 있다. 마이크로그리드는 이러한 분산전원들로 구성된 소규모 네트워크 계통으로서 계통상황에 따라서 주계통과의 연계운전 및 독립운전이 가능하고, 분산전원의 효율적 이용을 통한 에너지 효율향상, 전력의 역송전, 신뢰도향상 등이 가능하기 때문에, 차세대 전력IT 기술로 떠오르고 있다[1]. 하지만 마이크로그리드에서 제어 불가능한 전원인 풍력, 태양광 발전시스템의 투입은 오히려 계통의 전력 품질 및 안정도를 저감시킬 수 있다. 따라서 진정한 의미의 마이크로그리드 시스템을 구축하기 위해서는 제어 불가능한 풍력, 태양광 발전 시스템에 연료전지, 배터리 등과 같은 제어 가능한 발전 시스템을 함께 결합한 하이브리드 시스템으로 계통과 연계해야 한다[2]-[4].

또한 출력 제어가 가능한 하이브리드 시스템으로 구성된 분산전원의 출력 제어 방법으로 다음과 같은 두 가지 방법이 있다. 첫째 방법으로 분산전원의 출력을 원하는 양으로 일정하게 유지시키는 Unit power control이 있고, 둘째 방법으로 분산전원 앞단의 선로 조류를 원하는 양으로 일정하게 유지시키는 Feeder flow control이 있다. Unit power control의 경우, 계통의 부하 변동 상황에 무관하게 분산전원의 출력을 일정하게 제어하는 방법이다. 이때 마이크로그리드의 부하 변동은 상위 계통으로 부터 공급이 증감하여 맞춰지게 된다. Feeder flow control의 경우, 분산전원이 연계된 모선의 조류를 일정하게 유지하기위해 마이크로그리드 내부의 부하 변동을 분산전원이 출력을 조정하여 제어하는 방법으로 계통 운영자 측면에서, 마이크로그리드는 일정한 전력을 소비하는 부하처럼 생각될 수 있다는 장점이 있다[4].

본 논문에서는 마이크로그리드 내에서 하이브리드 시스템을 효율적으로 운영할 수 있는 인버터 제어 알고리즘과 Feeder flow control을 안정적으로 동작할 수 있게 하는 Feeder flow control의 설정 값 범위를 제안할 것이다. 또한 시뮬레이션 프로그램 PSCAD/EMTDC를 이용하여 하이브리드 시스템 및 마이크로그리드 계통을 모델링하였고, 시뮬레이션을 통해서 제안한 것들을 검증하였다.

2. 마이크로그리드 시스템 모델링

본 논문에서 각각의 태양광, 연료전지, 배터리 시스템은 등가회로를 이용하여 수학적으로 모델링 하고 [5]-[10], 이를 결합하여 그림 1과 같이 제어 가능한 하이브리드 시스템을 모델링하였다.

* 정 회 원 : (주)필링크 연구원
** 정 회 원 : (주)효성 연구원
*** 정 회 원 : 한국전기연구원 연구원
† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학부 조교수
E-mail : djwon@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 9월 13일
최종완료 : 2010년 11월 13일

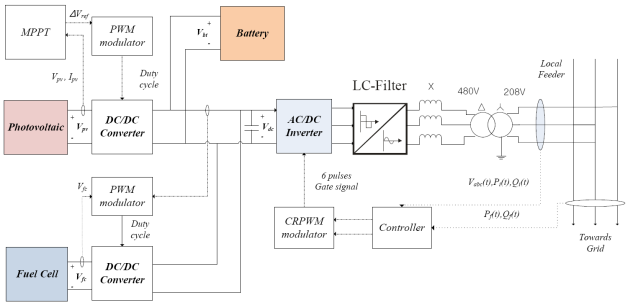


그림 1 하이브리드 시스템의 AC 계통 연계 구성도

Fig. 1 Configuration of Hybrid system with AC network

그림 1에서 태양전지는 컨버터 제어를 통해 최대전력점추종(MPPT) 방식으로 동작하고, 배터리는 짧은 순간 DC전압의 변동을 정류하는 역할을 수행한다. 마지막으로 연료전지는 DC전압 제어를 통해 정상상태에서의 전력수급 불균형을 보상하는 제어를 DC/DC 컨버터를 통해 수행한다.

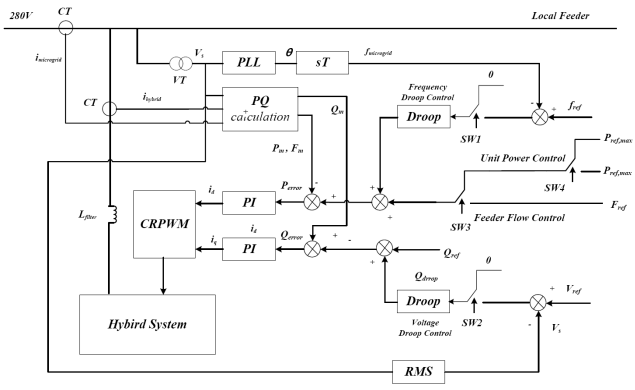


그림 2 하이브리드 시스템의 DC-AC 인버터제어 블록다이어그램

Fig. 2 DC-AC inverter control block diagram of Hybrid system

그림 2는 하이브리드 시스템의 DC-AC 인버터 제어기의 블록 다이어그램이다. 하이브리드 시스템에서의 인버터 제어 방법은 크게 유효전력 제어와 무효전력 제어로 나눌 수 있다. 따라서 유효전력 제어부분과 무효전력 제어부분이 각각 구현되어 있다. 한편, 유효전력을 제어하는 방법에 따라서 분산전원의 출력을 일정하게 유지하도록 제어하는 방법(Unit power control)과 분산전원 앞단의 선로 조류를 일정하게 유지하도록 제어하는 방법(Feeder flow control)으로 나눌 수 있다. Unit power control의 경우, 계통의 부하 변동 상황에 무관하게 분산전원의 출력을 일정하게 제어하는 방법이다. 이러한 경우 마이크로그리드가 계통과 연결되었을 때, 부하에서 추가적으로 필요한 전력은 주계통으로부터 공급받아 수요와 공급을 맞출 수 있다. Feeder flow control의 경우 분산전원이 연계된 모선의 조류를 일정하게 유지하기 위해 마이크로그리드 내부의 부하 변동을 분산전원이 출력을 조정하여 제어하는 방법으로, 주계통 측면에서 마이크로그리드는 일정한 전력을 소비하는 부하처럼 생각할 수 있다.

3. 하이브리드 시스템의 Feeder Flow Mode 운영 기법

본 장에서는 마이크로그리드의 하이브리드 시스템에서 Feeder flow control을 안정적으로 운전하기 위한 3가지 운영 기법을 제안하도록 하고, 각 신재생 에너지원의 단점들을 보완해 줄 수 있는 태양광-연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용해 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

3.1 Feeder Flow Reference 범위 설정

마이크로그리드에서의 분산전원(DG)들을 그림 3과 같이 병렬로 연결하였고, 이때 각각의 분산전원은 제어 가능한 발전 시스템과 제어 불가능한 발전 시스템으로 조합하여 하나의 하이브리드 시스템으로 구성하였다.

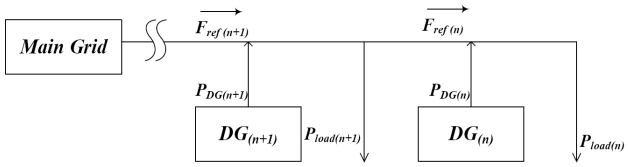


그림 3 간단한 방사형 마이크로그리드

Fig. 3 Simple radial microgrid

방사형 계통의 분산전원들이 모두 Feeder flow control 한다면, 상위 분산전원의 출력에 영향을 받으므로 Feeder flow 지령 값의 범위 설정 시 아래의 조건들을 고려해야 한다. Unit power control을 하기 위해서는 식(1)의 조건을 만족해야 하지만, Feeder flow control을 하기 위해서는 기본적으로 식(2)의 조건을 만족해야 한다.

$$P_{DG}^{\min} > P_{laod}^{\min}, \quad P_{laod}^{\max} > P_{DG}^{\max} \tag{1}$$

$$P_{DG}^{\min} \le P_{laod}^{\min}, \quad P_{laod}^{\max} \le P_{DG}^{\max} \tag{2}$$

$P_{DG,max}$ 보다 $P_{load,max}$가 클 경우, 분산전원 시스템의 출력 한계가 있으므로 Feeder flow control을 유지할 수 없고, 또한 $P_{DG,min}$ 보다 $P_{load,min}$이 작을 경우, 분산전원 시스템의 출력이 $P_{DG,min}$ 이하로 발전할 수 없으므로 Feeder 조류 제어를 유지 할 수 없게 된다. 따라서 $P_{DG,max}$ 가 $P_{load,max}$ 보다 크거나 같은 경우, $P_{load,min}$이 $P_{DG,min}$보다 크거나 같은 경우에만 Feeder flow control이 가능하다.

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

$$F_{DG(n)}^{\min} \le F_{ref(n)} \le F_{DG(n)}^{\max} \tag{3}$$

식 (3)과 같이 Feeder flow 지령 값의 범위를 설정 할 수 있다. 이때, 병렬로 연결된 분산전원은 Feeder flow 지령 값($F_{ref(n)}$)설정 시, 하위 Feeder flow 지령 값($F_{ref(n-1)}$)에 최소-

최대범위의 영향을 받는다. 따라서 가장 하위에 위치한 분산전원의 Feeder flow 지령 값 범위가 결정되면 그 다음 상위 분산전원의 Feeder flow 지령 값 범위가 결정이 된다. 본 논문에서는 하이브리드 시스템의 태양광 발전 출력이 최대일 때인 $F_{ref(n)min}$으로 인버터 제어 운영 알고리즘을 구현하였다.

3.2 하이브리드 시스템 인버터 제어 알고리즘

분산전원의 Feeder flow control은 마이크로그리드 내부의 부하 변동량과 관계가 있다. 만약 분산전원이 하위의 부하변동을 감당할 수 없으면, Unit power control로 분산전원 제어 방법을 변경하여 상위의 분산전원 혹은 계통에서 부하 수급 균형을 맞추도록 하여야 한다. 결과적으로 그림 4와 같은 하이브리드 시스템의 제어 운영 알고리즘을 도출할 수 있다.

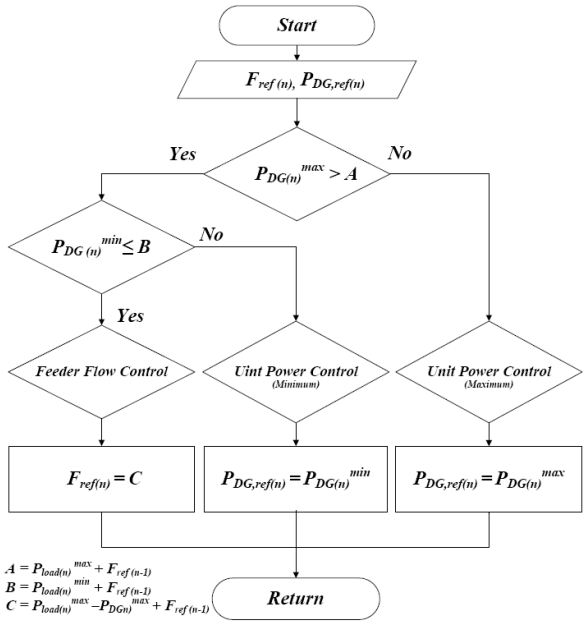


그림 4 하이브리드 시스템의 운영 알고리즘
Fig. 4 Operation algorithm of Hybrid system

$F_{ref(n)}$는 Feeder flow control의 지령 값이며, $P_{ref(n)}$는 Unit power control의 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 Feeder flow control 방법(모드 1)으로 동작하고, $P_{DG(n)max}$가 $P_{load(n)max}+F_{ref(n-1)}$보다 크거나 같은 경우에는 Unit power control 최소 출력 제어 방법(모드 2)으로 동작하게 된다. 또한, $P_{DG(n)max}$가 $P_{load(n)max}+F_{ref(n-1)}$보다 작은 경우에는, Unit power control 최대 출력 제어 방법(모드 0)으로 동작하게 된다. 하이브리드 시스템의 운영 모드는 그림 5와 같이 간략하게 도식화 할 수 있다. 결과적으로 마이크로 그리드 내부의 부하 변동량 또는 분산 전원 출력 용량에 따라 분산전원 출력 제어 모드가 변경된다.

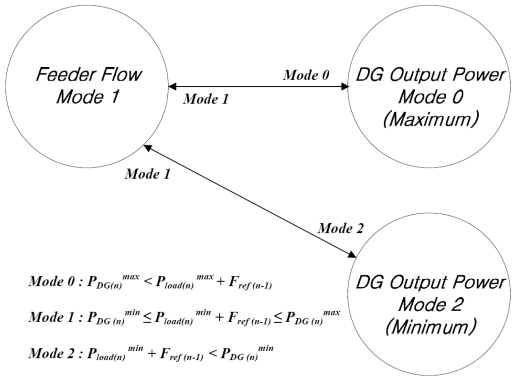


그림 5 하이브리드 시스템 운영 모드
Fig. 5 Operation mode of Hybrid system

3.3 Hysteresis 운영 모드 제어

그림 6은 히스테리시스를 이용한 분산전원 출력 제어 모드 세팅 방법을 보여준다. 하이브리드 시스템인 분산전원 제어 알고리즘에 따라서 제어 모드 변경 시, 모드 신호의 On/Off 변경을 최소화하기 위하여 히스테리시스를 이용하였다[7]. 마이크로그리드 내부의 부하량이 일정 시간 동안 최소값 또는 최대값 근처에서 미세하게 변화하여도, 인버터 제어 모드의 변화 없이 일정한 값을 유지할 수 있다.

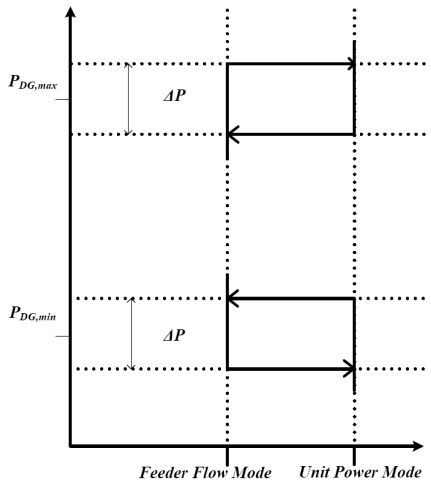


그림 6 히스테리시스를 이용한 인버터 모드 세팅
Fig. 6 Inverter mode setting using hysteresis

4. 성능모의

4.1 마이크로그리드에서 제안된 알고리즘 모의

PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 7과 같은 마이크로그리드 시뮬레이션 계통을 모델링하였다. 태양광 시스템, 연료전지 시스템, 배터리 시스템을 각각 등가회로를 이용하여 모델링하였다. 제 3장에서 제안한 분산전원 제어 알고리즘을

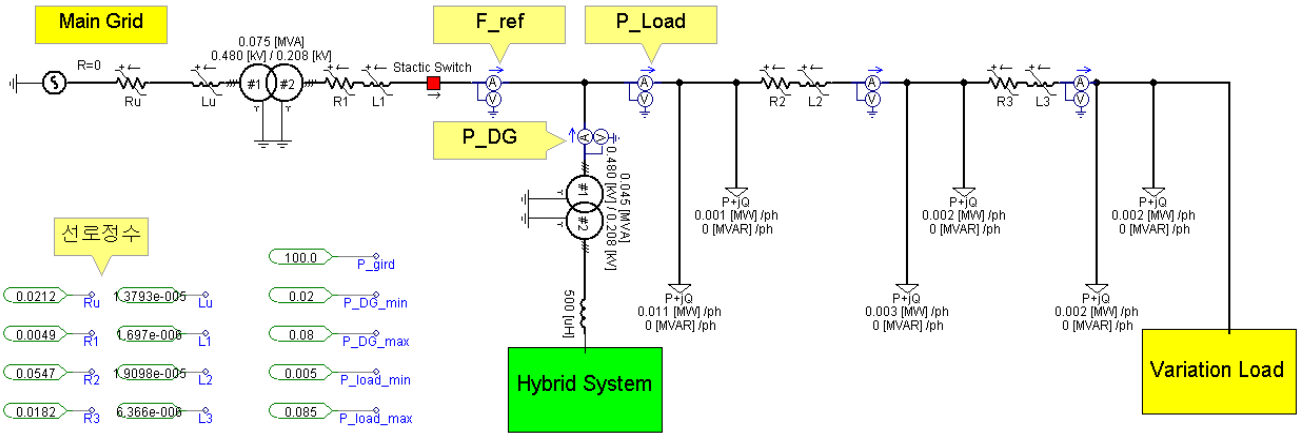


그림 7 마이크로그리드 시뮬레이션 계통도

Fig. 7 Microgrid simulation network

이용하여 하이브리드 시스템의 유효전력 출력을 조정하도록 하였고, 무효전력은 0으로 설정하여 역률을 1로 고정시켰다. 계통의 부하도 유효전력 부하로만 구성하였다. 테스트 계통은 208V의 3상 계통으로 480V의 상위 계통과 연결하였다. 마이크로그리드 내부 부하 변동량은 0.005~0.085[MW]으로 설정하였다.

태양광 시스템의 경우 온도와 일사량을 변화 시킬 수 있으나 본 논문의 시뮬레이션은 온도를 298K로 일정하게 유지 시키고 일사량을 랜덤 함수를 이용하여 변화시켰다.

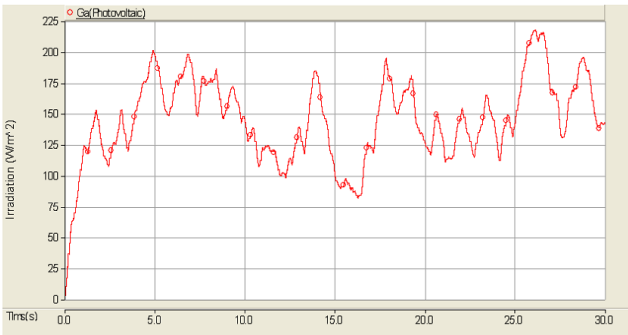


그림 8 태양전지 시스템의 일사량(Ga)

Fig. 8 Irradiation(Ga) of Photovoltaic system

그림 9를 통해서 마이크로그리드 내부의 부하(P_load)는 0.005~0.085[MW]으로 변동하고, 본 논문에서 제안한 분산전원 제어 알고리즘에 의해서 하이브리드 시스템(P_DG)의 출력 모드가 변하는 것을 알 수 있다. 이때 0.010~0.070[MW] 사이의 부하 변동 시 모드 1로 동작하고, Feeder flow의 지령값(F_ref)을 -0.01[MW]으로 유지하는 것을 볼 수 있다. 하지만 0.010~0.070[MW]사이를 벗어나게 되면 0.010[MW]이하일 때는 모드 2로 동작하고, 0.070[MW]이상 일 때는 모드 0으로 동작하게 된다. 결과적으로 하이브리드 시스템의 최소 최대 출력 범위 안에서의 부하 변동은 하이브리드 시스템 출력을 조절에 의해 부하 수급 균형이 이루어지고, 그 이상의 부하 변동은 주계통으로부터 주입되는 전력량에 의해 부하 수급 균형이 이루어진다. 시간에 따른 제어모드 변화를 살펴보면, 0초에서 7초 사이에는 모드 1로 운전 되고, 변동하는 부하량에 따라서 하이브리드 시스템의 유효전력(P_DG)을 조절하게 된다. 즉, 하이브리드 시스템 앞단의 조류(F_ref)를 -0.01[MW]로 유지하는 제어를 한다. 이때, 태양광 시스템의 출력(P_PV)은 일사량(Ga)에 따라서 변동되며, 연료전지 시스템의 출력(P_FC)은 하이브리드 시스템 출력과 태양광 시스템 출력의 차이만큼을 보상하여 발전하게 된다. 7초에서 11.5초 사이에는 부하의 변동이 하이브리드 시스템의 최소 출력 이하로 변동하였기 때문에 모드 2로 운전하게 된다.

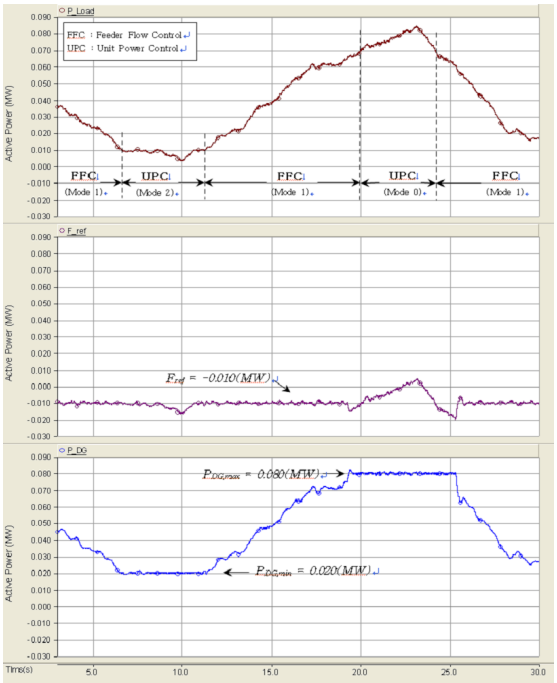


그림 9 F_ref = -0.010[MW]일 때, 연계운전시 부하 변동(P_load), 조류 지령치(F_ref) 및 하이브리드 시스템 유효전력 출력(P_DG)

Fig. 9 Load variation(P_load), feeder flow reference(F_ref) and active power(P_DG) of Hybrid system in Grid-connected mode microgrid at F_ref = -0.010[MW]

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 1로 운전하고, 19초에서 25.1초 사이에는 부하의 변동이 하이브리드 시스템의 최대 출력 이상로 변동하였기 때문에 모드 0으로 운전하게 된다. 즉, 하이브리드 시스템 출력은 최대값(P_DG_max=0.080[MW])으로 일정하게 유지하는 제어를 하게 되고, 계통의 부하 변동은 주계통으로 부터 공급받게 된다. 25.1초에서 30초에서는 부하량이 0.080[MW]이하로 감소하였으므로, 모드 1로 동작하게 된다.

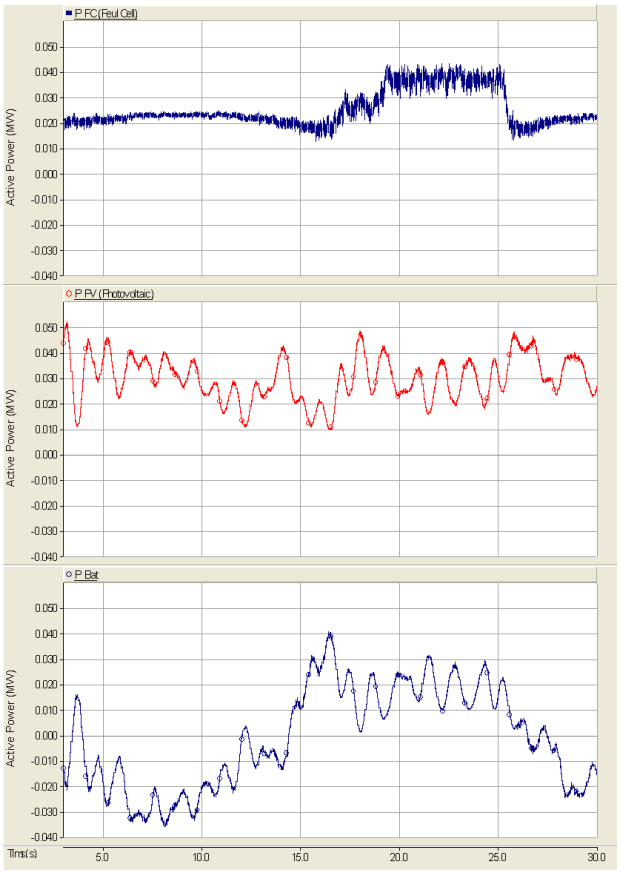


그림 10 마이크로그리드에서 연계운전 할 경우 연료전지, 태양광, 배터리 시스템의 유효전력 출력

Fig. 10 Active power of Fuel cell, Photovoltaic and Battery systems in Grid-connected mode microgrid

그림 10은 하이브리드 시스템 내부에서 에너지원들의 출력을 나타낸다. 태양광 출력(P_PV)은 그림 11의 일사량 변화에 따라서 최대출력제어를 하고 있고, 연료전지 출력(P_FC)은 최소 최대 출력 범위 안에서 하이브리드 시스템의 출력을 조절하게 된다. 또한 배터리 출력(P_Bat)은 충·방전 동작을 하면서 태양광의 출력을 보상하게 된다. 이때 각각의 에너지원의 DC 전류 변화는 그림 11과 같다. 그림 10, 11에서 볼 수 있듯이 하이브리드 시스템에서 배터리 시스템은 동작이 빠르기 때문에 급격하게 변동하는 태양광 시스템의 출력을 일차적으로 보상할 수 있다. 하지만 배터리 시스템의 용량이 작기 때문에 무한정 출력을 보상 할 수 없기 때문에 이차적으로 연료전지 시스템의 출력을 통해서 하이브리드 시스템이 원하는 출력을 계통으로 보낼 수 있다.

그림 9와 같이 마이크로그리드 내부에서 부하가 변동 할 때, 제 3장에 제안한 Feeder flow control 알고리즘에 의해서 그림 12(a)와 같이 마이크로 내부의 부하 변동에 따라서 모드 변화가 일어난다. 이때, 히스테리시스를 이용하지 않으면 그림 12(b)와 같이 모드 변화가 자주 발생하게 되므로 히스테리시스 이용하여 불필요한 모드 신호의 On/Off 변경을 최소화할 수 있게 된다.

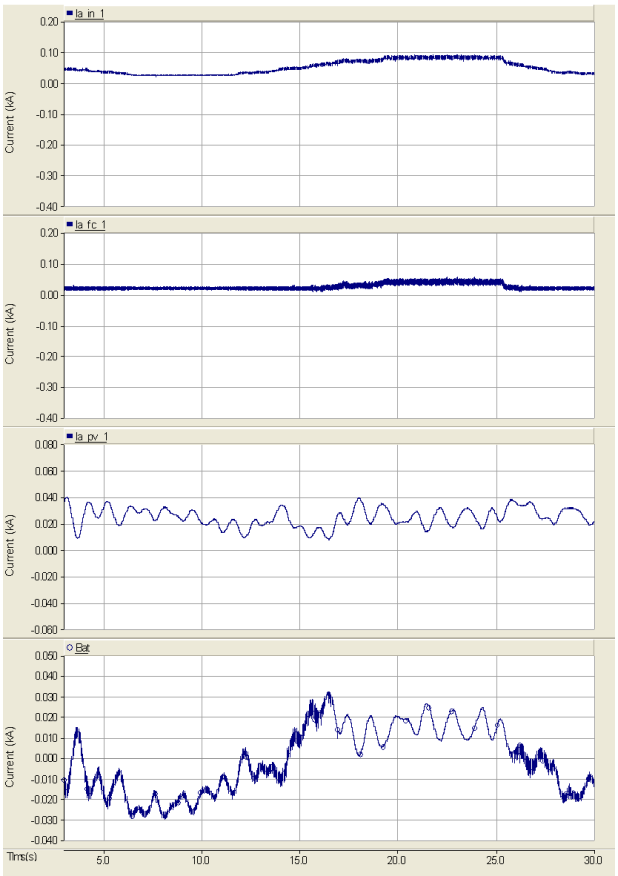
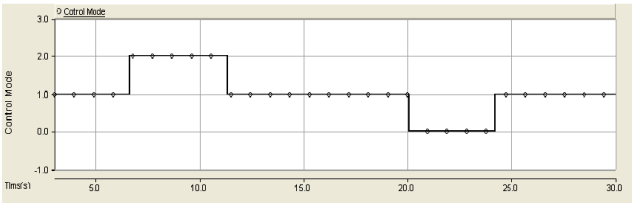
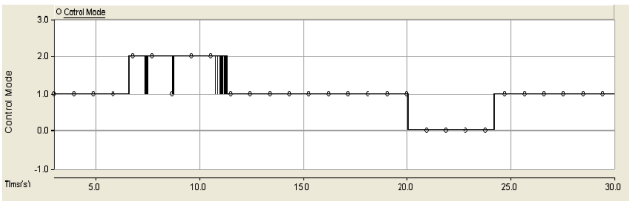


그림 11 마이크로그리드에서 연계운전 할 경우 시스템 전체, 연료전지, 태양전지, 배터리 시스템의 DC 출력 전류

Fig. 11 DC output current of Total system, Fuel cell, Photovoltaic and Battery systems in Grid-connected mode microgrid



(a) 히스테리시스를 포함한 인버터 모드 변화



(b) 히스테리시스를 포함하지 않은 인버터 모드 변화

그림 12 히스테리시스를 이용한 인버터 모드 변화
Fig. 12 Inverter mode changing using hysteresis

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 내부의 부하변화를 하이브리드 시스템의 Feeder flow control를 이용해서 효율적으로 운영할 수 있는 분산전원 제어 알고리즘과 Feeder flow control를 안정적으로 동작할 수 있는 Feeder flow 설정 값의 범위를 제안하였다. 히스테리시스를 이용하여 최소-최대 근처에서의 부하 변화는 모드의 변화 없이 일정하게 유지하지만, 하이브리드 시스템의 출력이 최소-최대 출력 범위를 벗어나면 알고리즘을 통해서 분산전원 제어 모드가 변경되도록 하였다. 이를 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 하이브리드 시스템 및 마이크로그리드 계통을 모델링하였다. 각각의 에너지원 시스템들은 등가회로를 이용하여 수학적으로 모델링하고, 이를 결합하여 제어 가능한 하이브리드 시스템을 구성하고 동특성을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 인버터 제어 알고리즘을 통해서 하이브리드 시스템의 출력을 안정적으로 운영할 수 있고, 마이크로그리드에 하이브리드 시스템 설치 후 늘어나는 부하량 또는 피크 부하시에도 효율적으로 부하관리를 할 수 있어 계통 운영을 여유롭게 할 수 있다. 이러한 연구는 출력변동으로 인해 마이크로그리드 내 설치가 어려운 제어 불가능한 전원인 태양광 발전 및 풍력 발전의 설치용량 확대를 가져올 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2009-0074655)

참 고 문 헌

[1] R. H. Lasseter, "Microgrids," IEEE PES Winter Meeting, Jan. 2002.
[2] P. Piagi, R. H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids," IEEE PES General Meeting, Jun. 2006.
[3] F. Katiraei, M. R. Iravani, "Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 4, Nov. 2006, pp. 1821-1831.
[4] R. H. Lasseter, "Control and design of microgrid components," PSERC Final Project Report, Jan. 2006.
[5] 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.
[6] M.A.S. Masoum Dehbonei, E.F H. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltageand current-based maximum power-point tracking," IEEE Trans. on Energy Conversion, VOL. 17, NO. 4, pp. 514-522, December 2004.
[7] Minwon Park, In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS," IEEE Trans. on Energy Conversion, VOL. 19, NO. 1, March 2004.
[8] Fuel Cell Handbook, 5th ed., EG&G Services Parsons Inc., U.S. Department of Energy, 2000.
[9] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 442 - 451, Jun. 2005.
[10] Massomo Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead_Acid Batteries", IEEE transactons on power system, Vol.15, No.4 November, 2000.
[11] Stefano Barsali, Massimo Ceraolo, " Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues", IEEE transaction on energy conversion, vol. 17, no 1, march 2002.

저 자 소 개

문 대 성 (文 大 成)
1980년 2월 13일 생. 2006년 선문대학교 물리학과 졸업. 2009년 인하대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 (주)필링크 근무

서 재 진 (徐 載 眞)
1981년 7월 30일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 (주)효성 중공업 연구소 근무

김 윤 성 (金 閏 成)

1982년 5월 26일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 근무

원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기컴퓨터 공학부 졸업(공박). 2004년 동 공학연구소 연구원. 2005년 ~ 2006년 미국 University of Washington, APT Center 연구원. 2006년 ~ 현재 인하대학교 전기공학부 조교수.

E-mail : djwon@inha.ac.kr,

Homepage : http://power.inha.ac.kr