

Power Balancing Strategy in the Microgrid During Transient

서재진* · 이학주** · 정원욱** · 원동준†
 (Jae-Jin Seo · Hak-Ju Lee · Won-Wook Jung · Dong-Jun Won)

Abstract - When problems such as line fault, breakdown of a substation or a generator, etc. arise on the grid, the Microgrid is designed to be separated or isolated from the grid. Most existing DGs(Distributed Generators) in distribution system use rotating machine. However, new DGs such as micro gas turbine, fuel cell, photo voltaic, wind turbine, etc. will be interfaced with the Microgrid through an inverter. So the Microgrid may have very lower inertia than the conventional distribution system. By the way, the rate of change of frequency depends on the inertia of the power system. Moreover, frequency has a strong coupling with active power in power system. Because the frequency of the Microgrid may change rapidly and largely during transient, appropriate and fast control strategy is needed for stable operation of the Microgrid. Therefore, this paper presents a power balancing strategy in Microgrid during transient. Despite of strong power or frequency excursions, power balancing in the Microgrid can be maintained.

Key Words : Microgrid, Distributed Generator, Power balancing, Frequency Droop Control, Controllable Load, Load shedding

1. 서론

기존 전력 계통에서의 전력 수급 불균형으로 인한 위급상황에 대한 자동 제어 시스템은 이미 마련되어 있다. 하지만 예기치 못한 중요 송전단에서의 지락 및 단락 사고, 대규모 발전기 탈락 등의 심각한 사고로 인한 위급 상황 발생 시 신속하고, 적절한 제어가 이루어지지 않는다면 2003년 8월 14일 뉴욕 대정전, 또는 2003년 9월 28일 이탈리아 대정전과 같은 대규모 정전 사태가 일어나게 될 것이고, 헤아릴 수 없는 인적·물적 손해가 발생할 것이다.

본래 마이크로그리드는 위와 같은 사고 발생 시 주 계통으로부터 분리하여 마이크로그리드 내부의 분산전원만을 이용하여 부하에 지속적인 전력 공급을 유지할 수 있는 전력 시스템이다. 하지만 마이크로그리드가 주 계통에서부터 분리 된다는 것은 중요 발전기의 탈락을 의미하는 것이기 때문에 본래 목적을 이루기 위해서는 전력 수급 불균형에 대한 신속하고 적절한 제어 및 전략이 필요하다. 그러나 마이크로그리드는 다음과 같은 단점들로 인해 기존 전력 계통에 비해 더욱 신속하고 적절한 방안이 필요하다.

만약 전력 수요가 증가하고 전력 공급이 부족하면 주파수는 떨어지게 되고, 반대로 전력 공급이 증가하고 전력 수요

가 낮으면 주파수가 올라가게 된다. 이런 주파수 변동의 정도는 시스템 관성에 달려있다. 현재의 회전기를 사용하는 대규모 발전기들이 사용되는 기존 전력 계통은 큰 관성을 가지고 있기 때문에 외란이 있는 동안 작은 변동을 보이지만, 마이크로그리드와 같이 전력전자 기반의 장치들이 주로 설치되는 관성이 작은 시스템은 회전 관성을 통한 지연 효과를 기대할 수 없기 때문에 외란에 대해 주파수가 빠르고 크게 변동할 것이다.

마이크로그리드는 관성이 큰 주 계통과 연계 운전 시에는 주 계통의 관성에 의해 부하 변동 및 태양광·풍력 발전기 출력 변동에도 불구하고 정 주파수를 유지 할 수 있지만, 마이크로그리드가 주 계통으로부터 분리된, 독립 운전 시에는 마이크로그리드 내부 주파수 제어가 수월하지 않을 것이다 [1]. 또한 마이크로그리드에서는 기존 배전계통과 달리 부하 변동뿐만 아니라 태양광·풍력 발전의 출력 변동이 동시에 일어나기 때문에 출력제어 가능 분산전원에 더욱 크고 급격한 출력 변동이 요구 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 전력 계통 발전기의 주파수를 이용한 출력 제어 방법 및 Load-Shedding 기법을 바탕으로 하고, 마이크로그리드의 연계운전에서 독립운전 전환 시 그리고 독립운전 상황에서 위와 같은 단점들을 보완할 수 있는 전력 수급 균형 전략을 제시 및 정리하였다.

2. 전력 수급 균형 전략

전력 수급 균형이란 계통내의 전체 발전기 출력과 전체 부하량이 같아 서로 균형을 이루는 것을 말한다. 전력 수급 균형을 이루기 위한 발전기 출력 제어를 위해서는 기존 값으로 주파수를 이용하게 된다. 전력 시스템의 주파수는

* 정 회 원 : (주)효성 중공업연구소 솔루션기술팀
 ** 정 회 원 : 전력연구원(KEPRI) 선임연구원
 † 교신저자, 정회원 : 인하대학교 IT공과대학 전기공학부
 조교수
 E-mail : djwon@inha.ac.kr
 접수일자 : 2009년 11월 27일
 최종완료 : 2010년 2월 12일

실제 전력이라 할 수 있는 유효전력 균형에 의해 좌우되며, 전력 시스템 전체에서 같은 값을 갖기 때문이다[2].

기존 전력 계통에서는 기본적으로 동기 발전기의 조속기를 이용한 주파수 제어를 통해 발전기 출력을 제어하여 전력 수급 균형을 이룬다. 조속기를 이용한 주파수 제어는 기계적 동작을 통한 제어이기 때문에 시간 지연이 발생하게 된다. 하지만 앞서 말한 바와 같이 회전기를 이용한 발전기는 회전 관성을 가지고 있기 때문에 부하 증가 시 약간의 주파수 하락을 통해서, 그리고 부하 감소 시 약간의 주파수 상승을 통해 제어 공백이 보상된다.

또한 발전량을 초과하는 과부하 또는 예상치 못한 발전기 고장 등의 심각한 시스템 외란 발생 시 전력 공급 정지와 전기적 고립이 발생할 수 있다. 이때 발전기의 빠른 출력 증가를 통한 전력 수급 균형 회복이 이루어지지 못하면 주파수에 대해 민감한 부하들에 의해 주파수 하락은 더 크고 빠르게 이루어질 것이고, 결국 각각의 발전기들은 저주파수 방지 계전기에 의해 계통으로부터 탈락하여 정전이 일어나게 될 것이다[2]. 이러한 위기 상황의 확장을 막기 위해 계통 주파수가 지정된 주파수 이하로 하락 시 사전에 지정된 부하를 탈락시킴으로서 전력 계통 붕괴를 회피하는 Under Frequency Load Shedding(UFLS) 방안이 [3], [4], [5], [6], [7] 등에서 연구되어왔다.

본 논문에서 제시하는 마이크로그리드 과도상태 전력 수급 균형 전략은 세 가지 방안을 통해서 전력 수급 균형이 이루어진다.

첫 번째 방안은 기존 전력 계통의 발전기의 역할을 하는 분산전원 제어를 통한 방안이다. 인버터를 기반으로 하는 분산전원은 관성을 가지고 있지 않은 단점이 있지만 회전기를 이용한 발전기에 비해 출력 응답 속도가 빠르기 때문에 적절한 제어가 이루어진다면 단점을 극복할 수 있을 것이다. 분산전원 출력 제어 방법으로는 현재 가장 널리 사용되는 동기발전기 조속기의 Frequency Droop Control 이론을 적용하여 출력 조절을 수행한다.

두 번째 방안은 전력저장장치의 빠른 반응 속도와 충·방전을 이용한 양방향 제어를 통한 마이크로그리드 유연성 향상 방안이다.

마지막 세 번째 방안은 앞의 두 방안 실패 시 제어 가능 부하들(Controllable Loads)의 제거 또는 투입을 통해 위급 상황에 대응하는 방안이다.

분산전원 제어에 있어서 집중형 제어와 독립형 제어에 대해 많은 연구들이 이루어져왔다. 하지만 집중형 제어 시스템은 MGCC(MicroGrid Control Center)의 제어 연산 오류 또는 통신 장애에 의해 전체 시스템의 제어 실패가 발생할 수 있는 근본적인 문제를 가지고 있다. 따라서 지속적인 제어가 필요한 분산전원 및 전력저장장치 제어는 각각의 출력 제어 가능 분산전원들(Dispatchable Distributed Generator)이 지역적인 전류, 전압 정보를 이용하여 자율적으로 Droop Control에 의해 출력을 조정하고 MGCC로부터는 경제급전을 위한 지령만 받는 것이 바람직하다[8].

제어 가능 부하들도 저주파수 또는 고주파수 계전기를 설치하여 마이크로그리드의 위급 상황 시 계전기 작동을 통해서 탈락 또는 투입시킬 수 있다. 하지만 제어 가능 부하들의 경우 지속적인 제어가 필요한 것이 아니라 위급 상황 시

에만 제어가 필요하고, 마이크로그리드 상황에 맞는 제어 가능 부하들 간의 제어 조율이 이루어지지 않는다면 부하 부족 또는 과보상으로 인해 오히려 마이크로그리드의 안정도를 악화시킬 수도 있다. 때문에 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 통해 MGCC에서 각각의 제어 가능 부하들에 스위치 ON/OFF 지령을 내려줌으로서 전력 수급 위급 상황에 대응하게 된다.

2.1 출력제어 가능 분산전원 제어

마이크로그리드가 연계운전 상태에서 독립운전 상태로 전환될 때 독립운전 상태에서의 주파수 제어는 기본적으로 마이크로그리드에 투입된 분산전원들 중에서 출력제어 가능 분산전원들이 담당한다. [2]에서 살펴 볼 수 있듯이 출력제어 가능 분산전원들(Dispatchable Distributed Generator)이 모두 정 주파수(60Hz) 제어만을 한다면 주파수 Hunting이 일어나게 되고, 마이크로그리드를 불안정한 상태로 만들 수 있다. 따라서 출력제어 가능 분산전원들의 Frequency Droop Control이 필요하다.

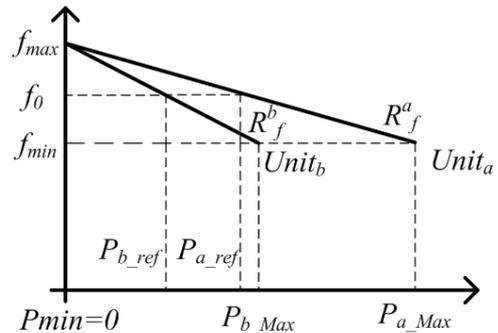


그림 1 정격용량을 고려한 두 분산전원의 Frequency Droop 특성 곡선[8]

Fig. 1 Frequency Droop characteristic curves of two DGs considering rated power[8]

각각의 출력제어 가능 분산전원들이 Frequency Droop Control을 사용할 때 Droop 계수를 알맞게 정하는 것은 경제적 측면은 물론이고 안정도 측면에서도 중요하다[9]. 일반적으로 Droop 계수를 정할 때 분산전원의 최소 출력과 최대 출력이 주파수 제어 범위 내에서 이루어지도록 설정한다. 따라서 발전 비용이 같다고 가정한다면 그림 1과 같이 분산전원 용량에 따라 Droop 계수가 정해져 각각의 출력제어 가능 분산전원들의 Frequency Droop 특성 곡선 기울기가 달라질 것이다.

정격용량이 큰 분산전원 일수록 Droop 계수의 크기가 작을 것이고 그에 따라 완만한 형태의 Frequency Droop 특성 곡선을 갖는다. 반대로 정격용량이 작은 분산전원 일수록 Droop 계수의 크기가 커지기 때문에 가파른 형태의 Frequency Droop 특성 곡선을 갖는다. 완만한 형태의 Droop 특성을 갖는 정격용량이 상대적으로 큰 분산전원은 가파른 형태의 Droop 특성을 갖는 정격용량이 작은 분산전원 보다 같은 주파수 변동에 대해 출력 가감이 상대적으로 크게 된다. 다시 말해 정격용량이 상대적으로 큰 분산전원

이 부하 변동에 대해 더 많은 분담률을 갖게 되는 것이다.

2.2 전력저장장치 제어

전력저장장치의 가장 큰 장점은 충·방전이 가능하다는 것이다. 이를 통해서 시스템의 유연성을 높일 수 있고, 마이크로그리드의 안정적 운영을 피할 수 있다. 또한 전력저장장치는 반응 속도가 매우 빠르기 때문에 마이크로그리드에서의 외란 발생 시 초기 반응속도가 상대적으로 느린 디젤엔진 발전기 혹은 연료전지의 제어 공백을 보상해 줄 수 있다 [1][8][10].

그리고 전력저장장치에 사용되는 Frequency Droop 특성을 그림 2와 같이 적용한다면, 마이크로그리드의 주파수가 f_0 일 때는 운전 대기상태가 되지만, 부하 증가 혹은 타 분산전원의 출력 감소로 인한 주파수의 하락 시 방전을 통해서 빠르게 전력을 마이크로그리드에 공급하여 전력 수급 균형을 이룰 수 있게 해주며, 반대로 부하 감소 또는 타 분산전원의 출력 증가로 인한 주파수의 상승 시 충전을 통해서 빠르게 여분의 전력을 흡수하여 출력제어 가능 분산전원의 상대적으로 느린 출력 변동 반응에 의한 전력 공백을 메워 줄 수 있다.

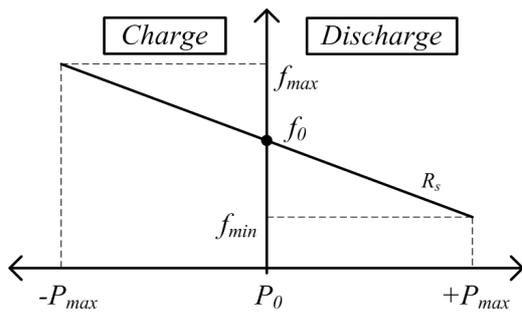


그림 2 전력저장장치의 Frequency Droop 특성 곡선
Fig. 2 Frequency Droop characteristic curve for storage system

2.3 제어 가능 부하 운영

분산전원과 전력저장장치를 이용한 마이크로그리드 전력 수급 균형 전략이 실패하여 주파수가 허용 범위($f_{max} - f_{min}$)를 넘어서게 되면 마이크로그리드의 안정적 운영을 위하여 미리 정해진 부하들을 탈락 시키거나 잉여 부하 투입을 통해서 마이크로그리드를 안정하게 해줄 수 있다. 제어 가능 부하(Controllable Loads) 개념은 마이크로그리드 전력 수급 불균형 상황에서 중요한 역할을 수행할 수 있다. 또한 본 논문에서 제안하는 제어 가능 부하들을 제어해 주는 제어 가능 부하 제어기(Controllable Loads Controller)는 마이크로그리드의 독립운전 전환 또는 독립운전 상황에서 과부하, 분산전원 과출력에 따른 길고 강한 주파수 변동에 대비하여 작동 되며, 변동한 주파수를 허용범위 안으로 회복시켜 주는 역할을 수행한다.

다음 그림 3(a)의 Load-Shedding 알고리즘과 그림 3(b)의 Dummy Load 알고리즘은 MGCC의 지령을 통해서 실행되어 지고, 마이크로그리드의 안정화는 물론 제어 가능 부하들의 변동으로 인한 과도상태 최소화를 목적으로 개발되어

졌다. 제어 가능 부하들의 제어를 위해서는 우선 다음과 같은 3단계 초기화 과정을 거치게 된다.

- 1 단계 : 주파수 변동 허용 범위(Dead Band) 정의
→ 본 논문의 시뮬레이션에서는 60Hz를 기준으로 $\pm 1\%$ 로 가정하였다.
- 2 단계 : 제어 가능한 부하 선정
→ 과부하(전력 부족) : Load-Shedding
: 비중요 부하 선정 및 고객과의 계약 체결
→ 과전력(부하 부족) : Dummy Load
: ex. 연료전지를 위한 전해조(Electrolyzer)
- 3 단계 : 선정된 제어 가능 부하들의 단락 혹은 투입 우선순위를 결정한다.

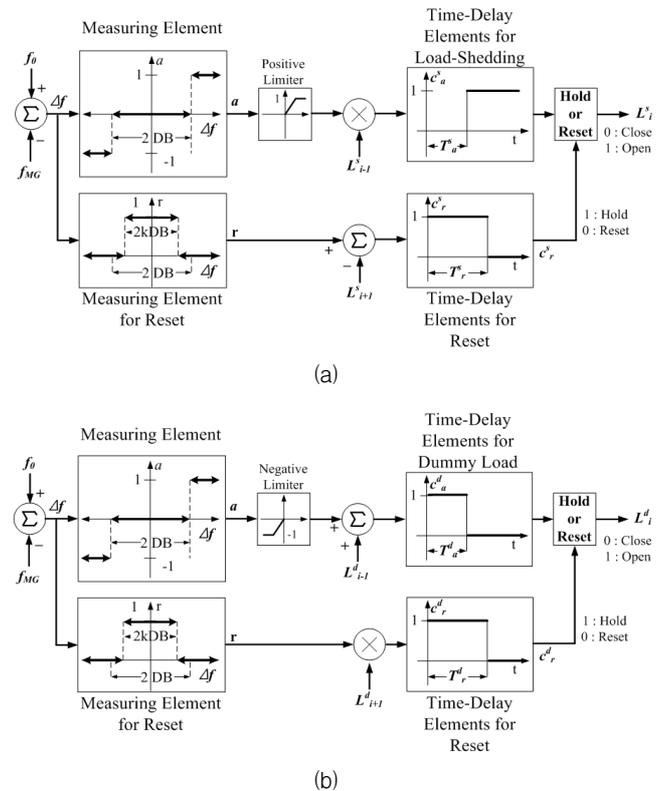


그림 3 제어 가능 부하 제어기 블록 다이어그램 (a) Load-Shedding 제어 시스템 (b) Dummy Load 제어 시스템

Fig. 3 Structure block diagram of Controllable Loads Controller (a) Load-Shedding control system (b) Dummy Load control system

위 초기화 과정을 거쳐 주파수 변동 허용 범위와 제어 가능 부하들이 선정된 후에는 MGCC의 제어 가능 부하 제어기에 의해 마이크로그리드 주파수가 과부하(전력 부족)에 의해 허용 범위 이하로 하강 되는 상황 발생 시 그림 3(a)과 같은 알고리즘을 통해 사전에 소비자와 계약된 제어 가능 부하들이 탈락하게 되고, 마이크로그리드 주파수가 과전력(부하 부족)에 의해 허용 범위 이상으로 상승하게 되는 상황 발생 시 그림 3(b)와 같은 알고리즘을 통해 사전에 준

비된 제어 가능 부하들이 투입 되면서 주파수를 허용 범위 내로 회복시켜 준다.

제어 가능 부하 제어기는 마이크로그리드 주파수를 기준 주파수와 비교하여 Δf 를 생성하고 Measuring Element로 보내게 된다. Measuring Element에서는 입력으로 받은 Δf 의 크기에 따라 a 값이 결정된다.

식 (1)과 같이 마이크로그리드 주파수 f_{MG} 가 주파수 변동 허용 범위 내에 있다면, 즉 Δf 가 -DB(Dead Band) 보다 크고 +DB 보다 작을 경우에는 $a=0$ 이 된다. f_{MG} 가 주파수 변동 허용 범위의 최소값 보다 작게 되면, 즉 Δf 가 +DB(Dead Band) 보다 큰 경우에는 $a=1$ 이 된다. 마지막으로 f_{MG} 가 주파수 변동 허용 범위의 최대값 보다 크게 되면, 즉 Δf 가 -DB(Dead Band) 보다 작은 경우에는 $a=-1$ 이 된다.

$$a = \begin{cases} 0 & \text{for } -DB \leq \Delta f \leq +DB \\ 1 & \text{for } \Delta f > +DB \\ -1 & \text{for } \Delta f < -DB \end{cases} \quad (1)$$

Measuring Element 블록에서 출력된 a 는 그림 3(a)에서는 Positive Limiter에 의해 0과 1만 통과하고 -1은 무시된다. 반대로 그림 3(b)에서는 Negative Limiter에 의해 0과 -1만 통과하고 1은 무시된다. 그림 3(a)와 그림 3(b)의 Time Delay Element는 주파수 f_{MG} 가 Dead Band 경계에서 머무를 때 식 (2)와 식 (3) 같은 delay time을 두어 제어 가능 부하의 탈락과 투입이 빈번하게 일어나는 것을 막는 역할을 한다. 식 (2)와 식 (3)은 주파수 변동 크기에 따라 작동 지연 시간을 변화시킨다. 식 (2)의 T_a^s 는 Load-shedding 명령에 적용되는 delay time으로 초기 설정 값이 T_{a0}^s 이고 주파수 하락 정도가 클수록 delay time T_a^s 이 감소하여 이벤트 상황(마이크로그리드 분산전원들의 출력 부족 정도)에 따라 빠르게 반응할 수 있게 된다. Dummy Load 경우도 Load-shedding과 마찬가지로 식 (3)의 T_a^d 는 Dummy Load 명령에 적용되는 delay time으로 초기 설정 값이 T_{a0}^d 이고 주파수 상승 정도가 클수록 delay time T_a^d 이 감소하여 이벤트 상황(마이크로그리드 분산전원들의 출력 초과 정도)에 따라 빠르게 반응할 수 있게 된다.

$$T_a^s = \frac{T_{a0}^s}{|\Delta f / DB|} \quad (2)$$

$$T_a^d = \frac{T_{a0}^d}{|\Delta f / DB|} \quad (3)$$

마이크로그리드가 위급 상황을 벗어나고 주파수가 안정한 범위 $\pm kDB$ 이내로 회복되면 탈락 또는 투입하였던 부하들을 Measuring Element for Reset 블록을 나타내는 식 (4)를 통해서 초기화 시켜준다.

$$r = \begin{cases} 1 & \text{for } -kDB \leq \Delta f \leq +kDB \\ 0 & \text{for } \Delta f > +kDB \\ 0 & \text{for } \Delta f < -kDB \end{cases} \quad (0 < k \leq 1) \quad (4)$$

이때도 마찬가지로 Time-Delay Element for Reset 블록

의 식 (5)와 식(6)에 의해 결정된 delay time을 넘지 못하면 r 값에 상관없이 c_r^s 와 c_r^d 이 1로 출력되어 Load-Shedding과 Dummy Load 투입 명령을 초기화 시키지 못한다. 각각의 r 값이 1이면서 delay time을 초과하면 c_r^s 와 c_r^d 이 0으로 출력되어 Time-Delay Element for Load-shedding 블록의 최종 출력인 c_a^s 를 0으로, 그리고 Time Delay Element for Dummy Load 블록의 최종 출력인 c_a^d 를 1로 초기화 시킨다.

식 (5)의 T_r^s 는 Load-shedding 이후에 부하의 재투입 시 적용되는 delay time으로 초기 설정 값이 T_{r0}^s 이며, 주파수가 $\pm kDB$ 이내로 회복되고, Δf 가 작을수록 delay time이 줄어들어 부하 재투입 시점이 앞당겨지게 된다. 또한 식 (6)의 T_r^d 도 Dummy Load 투입 이후에 Dummy Load의 제거 시 적용되는 delay time으로 초기 설정 값이 T_{r0}^d 이며, 주파수가 $\pm kDB$ 안으로 회복되고, Δf 가 작을수록 delay time이 줄어들어 부하 제거 시점이 앞당겨진다.

$$T_r^s = |\Delta f / kDB| \times T_{r0}^s \quad (5)$$

$$T_r^d = |\Delta f / kDB| \times T_{r0}^d \quad (6)$$

그림 3(a)의 L_{i-1}^s 와 L_{i+1}^s 은 각각 전 순위와 다음 순위의 Load-Shedding 부하를 나타낸다. 이것들은 Load-Shedding과 탈락했던 부하의 재투입이 미리 정해진 우선순위에 의해 순차적으로 일어날 수 있도록 설정하기 위해 입력된다. a 값이 1이 되어 Load-shedding 조건이 만족 되었을 때 첫 번째 Load-Shedding 부하(L_1^s) 이후의 Load-Shedding은 전 단계의 부하가 shedding되어 있음을 뜻하는 L_{i-1}^s 값이 1이 되어 있어야만 i 번째의 부하도 shedding이 이루어진다. 반대로 Load-Shedding 이후에 주파수가 회복되어 부하들이 재투입 될 때는 Load-Shedding의 반대 순서로 부하들이 재투입된다. r 값이 1이 되어 부하 재투입 조건이 만족 되었을 때 마지막 Load-Shedding 부하(L_n^s) 이후의 재투입은 전 단계의 부하가 재투입되어 있음을 뜻하는 L_{i+1}^s 값이 0이 되어 있어야만 i 번째의 부하도 재투입된다.

Load-Shedding과 마찬가지로 Dummy Load의 투입과 제거도 그림 3(b)의 L_{i-1}^d 와 L_{i+1}^d 의 입력을 통해 미리 정해진 순서에 의해 순차적으로 일어날 수 있도록 설정된다. a 값이 -1이 되어 Dummy Load 투입 조건이 만족 되었을 때 첫 번째 Dummy Load(L_1^d) 이후의 Dummy Load 투입은 전 단계 Dummy Load가 투입되어 있음을 뜻하는 L_{i-1}^d 이 1이 되어 있어야만 i 번째의 Dummy Load도 투입된다. Dummy Load 투입 이후에 주파수가 회복되어 Dummy Load들이 제거될 때도 투입 반대 순서로 Dummy Load들이 제거된다. r 값이 1이 되어 Dummy Load의 제거 조건이 만족 되었을 때 마지막으로 투입된 Dummy Load(L_n^d) 이후의 제거는 전 단계의 Dummy Load가 제거되어 있음을 뜻하는 L_{i+1}^d 값이 1이 되어 있어야만 i 번째의 부하도 제거된다.

다음 3장에서는 전력 계통 시뮬레이션 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 간단한 구조의 마이크로그리드를 모델링하였고, 다양한 사례연구를 통해 제안 및 정리한 과도상태 시의 마이크로그리드 전력 수급 균형 전략을 검증하였다.

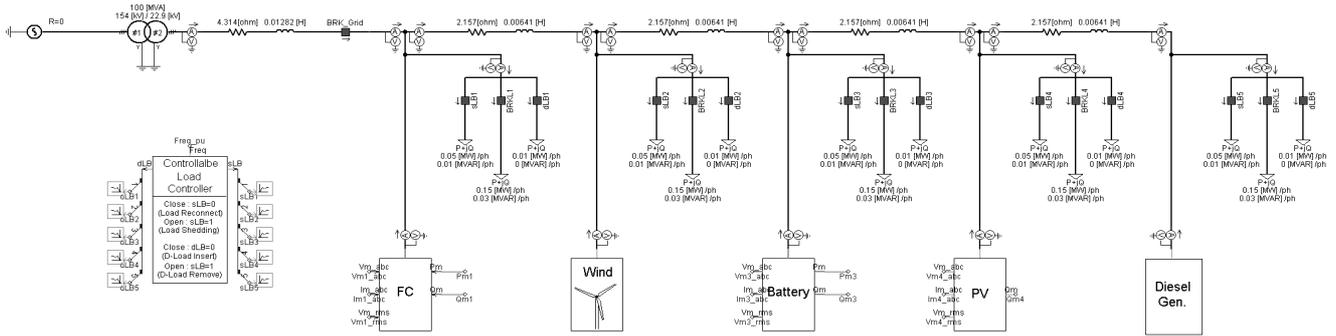


그림 4 시뮬레이션을 위한 마이크로그리드 계통 모델
 Fig. 4 Microgrid system modelling for simulation

3. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 마이크로그리드 계통 모델은 그림 4와 같은 방사형 계통으로 마이크로그리드 시스템 상세 파라미터와 시뮬레이션 결과 그래프 기호는 표 1과 같다.

마이크로그리드 계통 모델에는 연료전지, 풍력 터빈, 배터리, 태양광, 디젤 엔진이 모델링 되어 투입되었다. 태양광 발전과 풍력터빈 발전기는 random 함수에 의해 각각의 일사량과 풍속이 변동하게 되고 출력에 반영된다. 모델링된 분산전원은 출력제어 가능 여부에 따라 두 종류로 나눌 수 있는데, 출력제어 가능 분산전원은 디젤엔진 발전기, 연료전지, 배터리이고, 출력제어 불가능 분산전원은 풍력 터빈 발전기와 태양광 발전기이다.

마이크로그리드 계통 모델은 Static Switch 역할을 하는 스위치(BRK_Grid)의 ON/OFF를 통해 마이크로그리드의 계통과의 연계 운전에서 독립 운전으로의 전환을 모의 할 수 있다. 또한 마이크로그리드 독립운전 전환 시와 독립운전 상황에서의 주파수 및 전압은 출력제어 가능한 디젤엔진 발전기, 연료전지, 배터리의 출력 조절을 통해서 제어를 해주고 마이크로그리드 부하 수급 균형을 맞춰준다. 하지만 출력제어 가능 분산전원(Dispatchable Distributed Generator)의 제어 범위를 넘는 가혹한 부하 수급 불균형이 일어나게 되면 제어 가능 부하 제어기(Controllable Load Controller)가 작동하고, Load-Shedding 또는 Dummy Load 투입을 통해 부하 수급 균형을 이루어 불안정 상태에서 벗어나는 4가지 사례를 PSCAD/EMTDC를 통해서 시뮬레이션 하였다.

3.1 Case 1 : 태양광·풍력 발전 출력 변동

Case 1은 2초에 마이크로그리드가 계통으로부터 분리된 이후 외부 조건의 변화 없이 마이크로그리드의 시뮬레이션이 이루어진 경우이다. 다만 출력제어 불가능 분산전원인 태양광·풍력 발전기가 태양 빛의 세기와 풍속 변화에 의해 출력이 지속적으로 변동하게 된다.

그림 5(a)와 (b)를 통해서 마이크로그리드의 독립운전 전환 시와 독립운전 상황에서 출력제어 불가능 분산전원의 지속적인 출력 변동에 대해 출력제어 가능 분산전원들이 Frequency Droop Control을 통해서 전력 수급 균형을 이루어 마이크로그리드를 안정적으로 운영하고 있다는 것을 볼 수 있다.

표 1 마이크로그리드 계통 파라미터 및 약 기호

Table 1 Parameters of microgrid system and Abbreviations

시스템 파라미터		
V_{base}	22.9 kV(L-L, rms)	
f_{base}	60 Hz	
Line impedance	2.157(ohm/km), 0.00641(H/km)	
Constant Loads	0.45 MW / 0.12 MVAR (pf = 0.98)	
Loads for shedding	0.15 MW / 0.03 MVAR (pf = 0.98)	
Dump Loads	0.03 MW / 0 MVAR (pf = 1)	
분산전원 파라미터		
PhotoVoltaic	P_{Rate}	0.5 MVA
	V_{Rate}	0.5 kV(L-L, rms)
Wind Turbine	P_{Rate}	0.5 MVA
	V_{Rate}	0.69 kV(L-L, rms)
FuelCell	P_{Rate}	0.5 MVA
	V_{Rate}	0.5 kV(L-L, rms)
	$f Droop R_f$	0.02
Diesel Engine	P_{Rate}	1 MVA
	V_{Rate}	22.9 kV(L-L, rms)
	$f Droop R_f$	0.01
Battery	P_{Rate}	0.5 MVA/ -0.25 MVA
	V_{Rate}	0.2 kV(L-L, rms)
	$f Droop R_f$	0.01
제어 가능 부하 제어기 파라미터		
DB	±1 %	
k	0.9	
T_{α}^s	0.5 sec	
T_{α}^d	0.5 sec	
T_{r0}^s	2 sec	
T_{r0}^d	2 sec	
그래프 기호		
P_grid	계통 유효전력	
P_fc	연료전지 유효전력	
P_wind	풍력 발전 유효전력	
P_btry	배터리 유효전력	
P_pv	태양광 유효전력	
P_diesel	디젤 엔진 발전 유효전력	
P_DGT	전체 분산전원 유효전력	
P_LT	전체 부하 소비 유효전력	
P_DG_ds	전체 제어 가능 분산전원 유효전력	
P_DG_nds	전체 제어 불가능 분산전원 유효전력	

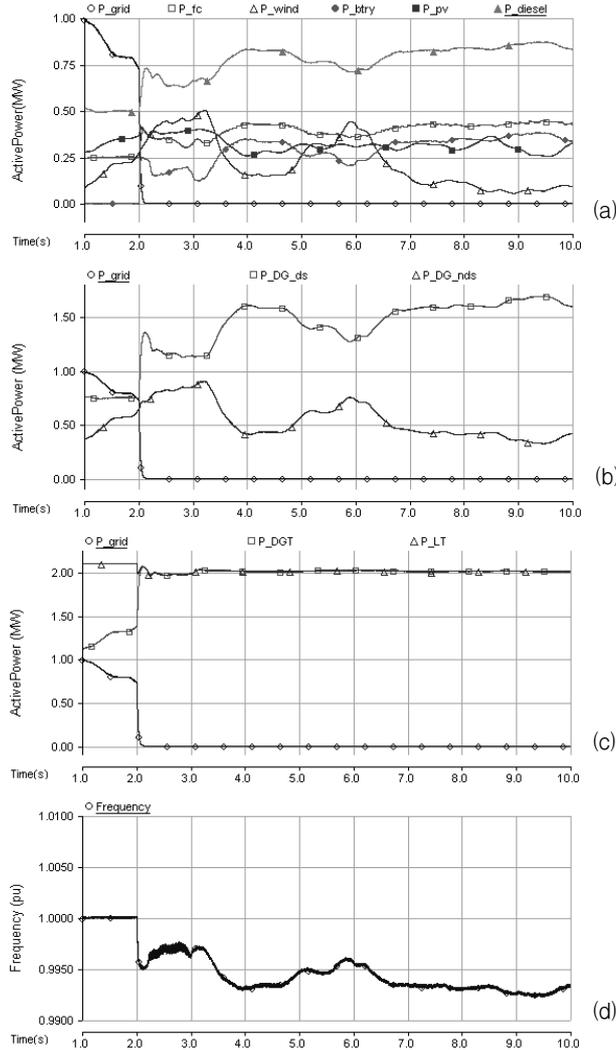


그림 5 Case 1에서의 유효전력과 주파수 시뮬레이션 결과 ((a) 각 분산전원 출력 (b) 출력제어 가능/불가능 분산전원 출력 비교 (c) 전체 분산전원 출력/부하 비교 (d) 마이크로그리드 주파수)

Fig. 5 Simulation results of real power and frequency in Case 1 ((a) Individual DG output (b) Dispatchable / NonDispatchable DG output (c) total DG output / total load (d) frequency in Microgrid)

3.2 Case 2 : 태양광·풍력 발전 출력 및 부하 변동

Case 2는 Case 1의 경우에서 부하변동이 추가로 일어나는 경우이다. 3.5초와 4.5초에 각각 부하의 step 감소가 일어나고, 6.5초와 7.5초에는 각각 부하의 step 증가가 일어나게 된다.

Case 2도 Case 1과 마찬가지로 출력제어 가능 분산전원의 Frequency Droop Control에 의해 부하의 step 변화에도 불구하고 전체 분산전원의 출력이 총 부하의 변동을 추종해 준다는 것을 확인할 수 있다. 다만 Case 1과는 다르게 4.5초와 5.5초 사이에 부하 감소에 의해 분산전원들의 출력이 총 부하량을 초과하여 배터리가 충전을 통해서 초과 전력을 흡수하여 마이크로그리드가 안정적으로 운영되도록 하는 것을 그림 6(a)를 통해서 확인할 수 있다.

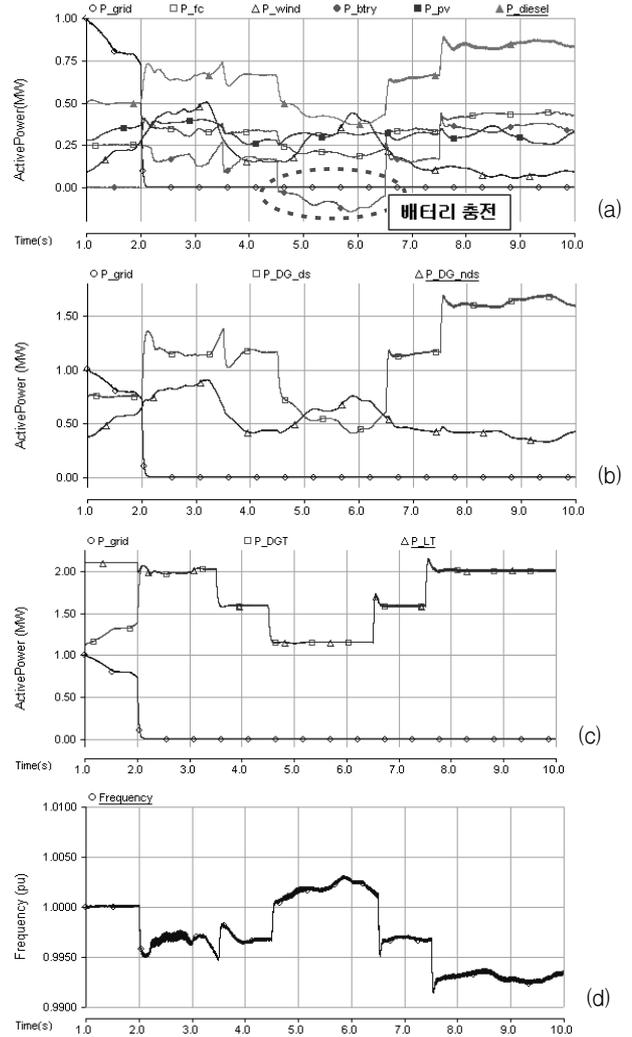


그림 6 Case 2에서의 유효전력과 주파수 시뮬레이션 결과 ((a) 각 분산전원 출력 (b) 출력제어 가능/불가능 분산전원 출력 비교 (c) 전체 분산전원 출력/부하 비교 (d) 마이크로그리드 주파수)

Fig. 6 Simulation results of real power and frequency in Case 2 ((a) Individual DG output (b) Dispatchable / NonDispatchable DG output (c) total DG output / total load (d) frequency in Microgrid)

3.3 Case 3 : 과부하(전력 부족)

Case 3은 마이크로그리드가 계통과 연계운전 시 계통으로부터 1.5 MW이상의 전력을 공급 받고 있는 상태에서 계통으로부터 분리되지만 분산전원이 충분히 전력을 공급해 줄 수 없어 전력 수급 불균형이 일어나거나 과도현상이 크게 일어나는 경우이다.

전력 수급 불균형이 일어나게 되면 MGCC 내부의 제어 가능 부하 제어기 알고리즘에 의해 Load-Shedding이 일어나 전력 수급 불균형을 해소 시켜주고 주파수가 허용범위 안으로 회복되게 된다. 또한 Shedding된 부하들이 주파수가 본 논문에서 정한 $\pm 0.9\%$ 이내로 회복된 상태에서 delay time 이상 동안 유지하면 탈락된 부하들이 순차적으로 재투입되는 것을 그림 7을 통해서 확인할 수 있다.

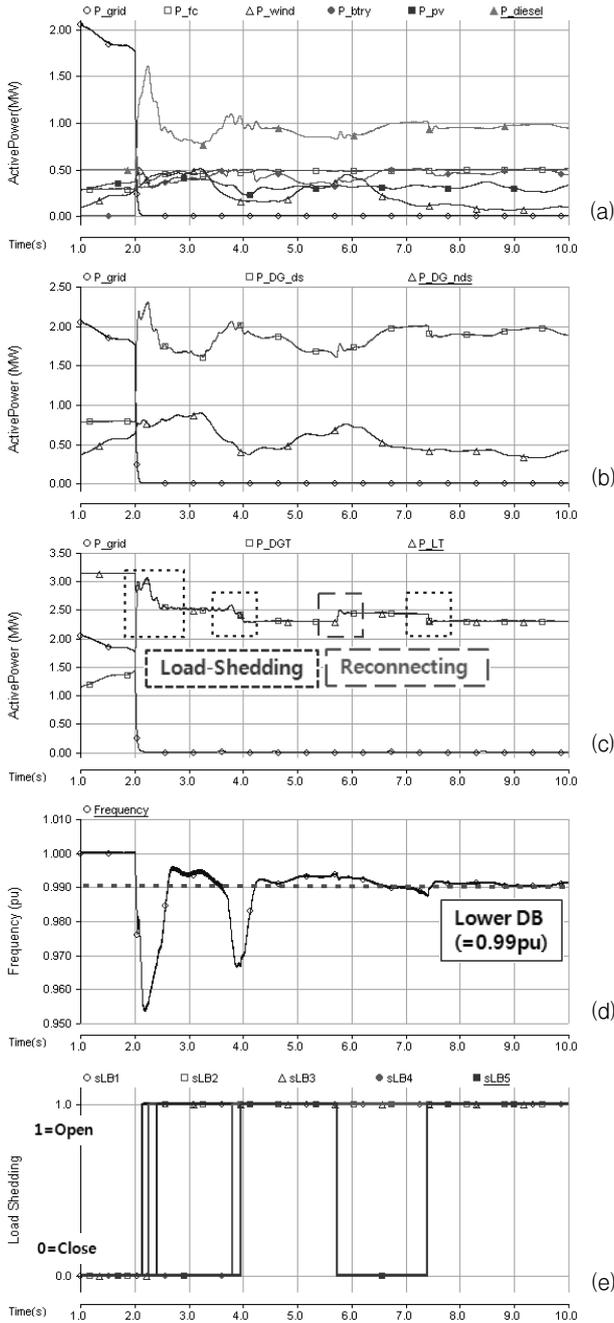


그림 7 Case 3에서의 유효전력과 주파수 시뮬레이션 결과 ((a) 각 분산전원 출력 (b) 출력제어 가능/불가능 분산전원 출력 비교 (c) 전체 분산전원 출력/부하 비교 (d)마이크로그리드 주파수 (e)Load-Shedding 스위치)
Fig. 7 Simulation results of real power and frequency in Case 3 ((a)Individual DG output (b)Dispatchable / NonDispatchable DG output (c)total DG output / load (d)frequency in Microgrid (e)switch of Load-Shedding)

3.3 Case 4 : 과전력(부하 부족)

Case 4는 마이크로그리드가 계통과의 연계운전 시 계통으로 0.7 MW이상의 전력을 역 송전하고 있는 상태에서 계통으로부터 분리되지만, 출력제어 불가능 분산전원인 태양광과 풍력 발전기들의 지속적인 출력으로 인해 마이크로그리

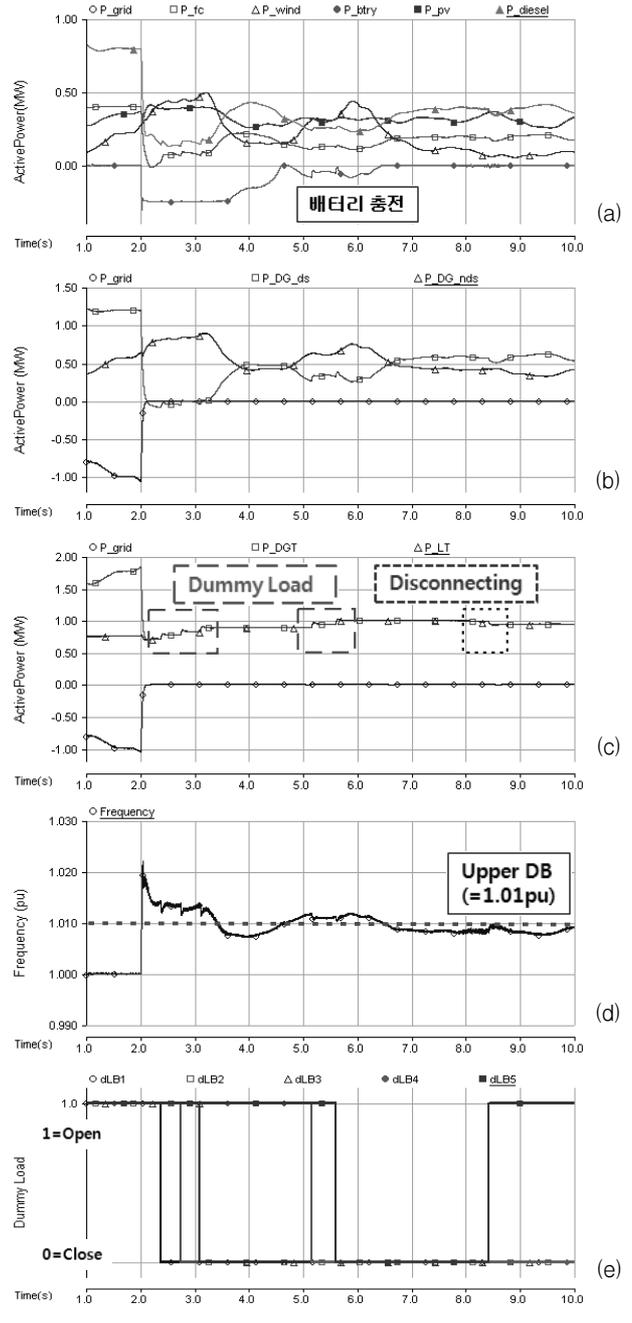


그림 8 Case 4에서의 유효전력과 주파수 시뮬레이션 결과 ((a) 각 분산전원 출력 (b) 출력제어 가능/불가능 분산전원 출력 비교 (c) 전체 분산전원 출력/부하 비교 (d) 마이크로그리드 주파수 (e) Load-Shedding 스위치)
Fig. 8 Simulation results of real power and frequency in Case 4 ((a) Individual DG output (b) Dispatchable / NonDispatchable DG output (c) total DG output / load (d) frequency in Microgrid (e) switch of Dummy Load)

드 분산전원들의 총 전력 생산량이 총 부하량과 배터리 충전 크기보다 많은 경우이다.

마이크로그리드가 독립운전 상태이기 때문에 잉여 전력을 계통으로 보내줄 수 없고, 분산전원과 전력저장장치의 제어만으로는 마이크로그리드 전력 수급 균형을 이룰 수 없다.

이때 MGCC 내부의 제어 가능 부하 제어가 알고리즘에 의해 Dummy Load가 투입되면 잉여 전력이 흡수되고, 전력 수급균형이 이루어져 주파수가 허용범위 안으로 회복된다.

또한 주파수가 본 논문에서 정한 $\pm 0.9\%$ 이내로 회복된 상태에서 delay time 이상 동안 유지하면 투입된 Dummy 부하들이 순차적으로 탈락하는 것을 그림 8을 통해서 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 인버터 기반의 분산전원들이 주로 투입되는 마이크로그리드에서의 독립운전 전환 및 독립운전 시, 외란으로 인한 과도상태에서의 전력 수급 균형 전략을 제시 및 정리 하였다. 본 논문에서 제시한 마이크로그리드 과도상태 시 전력 수급 균형 전략은 기존 전력계통의 유효전력 제어 기법을 바탕으로 하고, 인버터 기반의 분산전원들로 인해 회전 관성을 갖지 못하는 마이크로그리드의 단점 보완을 목적으로 한다.

본 논문의 네 가지 사례 연구를 통해 살펴 볼 수 있듯이 전력 수급 균형을 가장 중요한 역할을 담당하는 분산전원은 이미 잘 알려진 Frequency Droop Control을 이용하여 과도상태 시 Droop 특성 계수 크기에 따라 자동으로 분산전원들 간의 전력 분배가 이루어진다. 결국 모든 분산전원들의 총 출력이 총 부하를 추종하여 전력 수급 균형을 이룰 수 있다. 또한 전력저장장치는 태양광과 풍력 발전기 출력의 평활화에 쓰일 수도 있지만, 전력 수급 균형 관점에서는 연료 전지 또는 디젤 발전기와 같이 응답 특성이 느린 에너지원의 초기 보상과 충·방전을 통해 마이크로그리드 전체의 유연성을 상승시켜 안정도 향상에 기여할 수 있다. 마지막으로 제어 가능 부하(Controllable Load) 운영을 통해서 과부하 또는 전력 부족 시 Load-Shedding을 통한 전력 수급 불균형 해결은 물론이고 경부하 상태에서의 태양광과 풍력 발전기의 과출력으로 인한 전력 수급 불균형 시 Dummy Load 투입을 통해 잉여 전력을 흡수함으로써 위급 상황에서 벗어 날 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 전력연구원(R-2007-1-012-02)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] João Peças Lopes; et al, DD1 - "Emergency Strategies and Algorithms", UMIST CONTRIBUTION, EU MicroGrids project deliverable of task DD1, 2004
 [2] Kundur P., "Power System Stability and Control" (book), McGraw-Hill, Inc. 1994
 [3] Ir. N. Perumal, Chan Chee Ying, "A Proposed Strategy of Implementation Load Shedding and Load Recovery with Dynamic Simulations", National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia
 [4] V. Chuvychin, N. Gurov, S. Rubcov, "Adaptive Underfrequency Load Shedding and Underfrequency Load Restoration System", Power Tech, 2005 IEEE

Russia, 27-30 June 2005, pp. 1-6

[5] S.-J. Huang, C.-C. Huang, "An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 22, Issue 1, January 2000, pp. 51-58
 [6] Ali Mihirig, Hong Nguyen, Andrew J. Allen, "ON-LINE FAST LOAD SHEDDING TO MAINTAIN SYSTEM STABILITY AND OPERATION FOR ISOLATED OIL FIELD POWER SYSTEM", Petroleum and Chemical Industry Conference, 2006. PCIC '06. Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual 11-15 Sept. 2006, pp. 1-7
 [7] Shinichi Imai, Tadaaki Yasuda, "UFLS program to ensure stable island operation", Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES 10-13 Oct. 2004, pp. 283-288 Vol. 1
 [8] R. Lasseter, P. Piagi, "Control and design of Microgrid Components", Power System Engineering Research Center, final project report, Jan. 2006
 [9] E.Barklund; et al, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 23, NO. 5, SEPTEMBER 2008
 [10] Susan M. Schoenung, "Characteristics and Technologies for Long-vs. Short-Term Energy Storage", A Study by the DOE Energy Storage Systems Program March 2001

저 자 소 개

서 재 진 (徐 載 眞)

1981년 7월 30일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 (주)효성 중공업연구소 솔루션기술팀

이 학 주 (李 鶴 周)

1966년 12월 5일 생. 1989년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임연구원

정 원 옥 (丁 元 昱)

1978년 1월 25일 생. 2003년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2005년 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임연구원

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(박사). 2004년 동 공학연구소 연구원. 2005년~2006년 미국 University of Washington, APT Center 연구원. 2006년~현재 인하대학교 전기공학부 조교수.