ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 7, pp. 898～904, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.7.898

분산전원의 제어 특성을 고려한 마이크로그리드의 블랙 스타트 및 계통 동기화 전략

Black Start and Synchronization of Microgrid Considering Distributed Generation Control

최 진 영* · 원 동 준†
(Jin-Young Choi · Dong-Jun Won)

Abstract - In order to minimize the damage from power outage, power system should be restored quickly. In this paper, a procedure for the restoration of microgrid is proposed. After elimination of the causes of power outage, a black start algorithm is executed by considering the characteristics of distributed generation control. After all resources have been recovered to the normal state, a grid reconnecting algorithm for stable operation in grid-connected mode is performed. In order to verify the proposed algorithm, low voltage microgrid is simulated using PSCAD/EMTDC.

Key Words : Microgrid, Black start, Grid reconnection, Distributed generation, Synchronization

1. 서 론

전기는 모든 국민이 사용하는 공공재의 성격이 매우 강하기 때문에 위급한 상황이 발생할 경우 빠른 시간 안에 복구를 해야 하며 그에 대한 대책이 뚜렷하게 마련되어 있어야 한다. 일반적으로 큰 규모의 계통이 정전 후 복구될 때는 미리 준비된 절차에 따라 시스템 운영자에 의해 수동적으로 계통이 회복된다. 여기서 회복의 의미는 “시스템이 안정적인 운전 상태로 돌아온다.”이다. 정전은 신뢰도와 밀접한 관계를 가지고 계통 시스템 복구가 얼마나 빠르게 진행되는지에 따라 신뢰도가 향상되기 때문에 시스템의 복구는 가능한 한 빠르게 이루어져야 한다[1]. 정전 시, 시스템의 복구 절차를 Black Start라고 정의하며, 마이크로그리드의 경우 여러 가지 특성이 다른 발전원의 특성을 고려한 복구절차가 요구된다.

마이크로그리드의 정전은 크게 다음 두 가지 원인에 의해 발생한다. 첫 번째로, 계통에서 발전기의 유지보수를 위해 점검에 들어가듯 마이크로그리드도 유지보수가 필요하며 유지보수를 위해 계획적인 정전이 요구된다. 계획적 정전의 경우, 사전 정전 계획을 세움으로써 마이크로그리드 내부의 피해를 최소화하며 시스템을 점검할 수 있다. 두 번째로, 마이크로그리드의 외·내부 사고로 인하여 정전이 발생한다. 사고로 인한 비계획적 정전의 경우, 사전에 적절한 보호협조 알고리즘과 보호기기가 갖추어져 있어야만 정전의 피해를 최소화 할 수 있다[2].

계획적 정전이나 비계획적 정전이 발생한 이후 피해를 최소화하기 위해 빠르게 시스템 복구를 진행해야 한다. 신속한 시스템 복구를 위해서는 정전의 사유를 빠르게 판별하는 것이 중요하다. 계획적 정전의 경우 발전기 및 부하, 변압기, 선로 상태 등 모든 시스템 요소를 계획한 시간 안에 점검을 완료한다. 또한, 비계획적 정전의 경우, 사고의 위치 및 종류를 빠르게 판별하고 신속하게 수리하여 원인을 제거한다. 이와 같이 정전 사유에 따른 원인을 제거한 후, 블랙 스타트 알고리즘에 따라 고장 복구 절차를 진행한다.

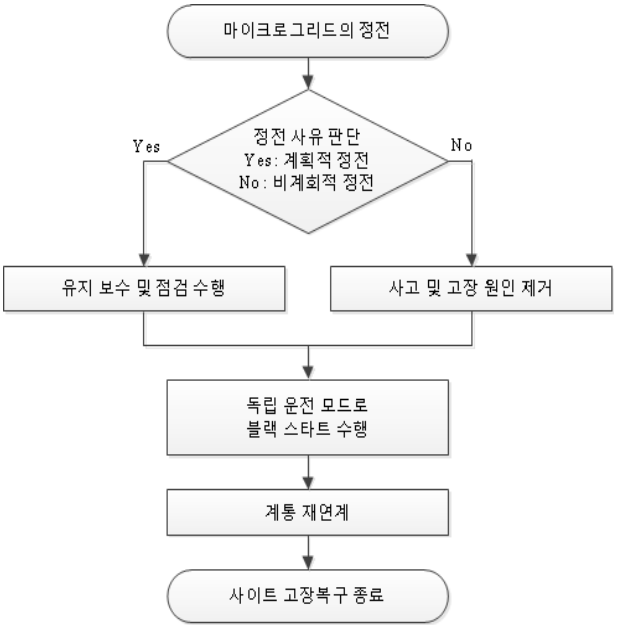

그림 1 마이크로그리드의 정전에 따른 사이트 고장복구 절차
Fig. 1 Site restoration process in accordance with a blackout of microgrid

* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea
E-mail : djwon@inha.ac.kr
Received : January 30, 2013; Accepted : June 5, 2013

정전 시, 마이크로그리드의 시스템 회복에 대한 연구가 지속적으로 활발히 이루어지고 있다[3]-[5]. [3],[4]에서는 인버터 기반의 풍력, 태양광, 마이크로가스터빈 및 배터리로 이루어진 저전압 마이크로그리드의 블랙 스타트 알고리즘을 제안하였다. 또한, [5]에서는 인버터 기반의 분산전원들로 이루어진 마이크로그리드에서 배터리의 충전상태에 따른 블랙스타트 알고리즘을 제안하였다. 하지만 위의 연구들에서는 마이크로그리드를 구성하는 분산전원들이 모두 인버터 기반으로 제한적이다. 본 논문에서는 분산전원들의 다양한 제어 특성을 고려하고, 시스템의 관성을 높일 수 있는 동기 발전기를 추가한 블랙스타트 알고리즘을 제안한다.

본 논문에서는 지속적으로 안정적인 전압을 제공하기 위해 분산전원들의 제어 특성을 고려한 블랙 스타트 절차를 개발하였고, 분산전원 배전계통 연계기준에 따른 계통 동기화 알고리즘을 제안하였다. 또한, 시뮬레이션 프로그램 PSCAD/EMTDC를 이용하여 저전압 마이크로그리드 계통을 모델링 및 시뮬레이션을 통해서 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 분산전원 제어 특성

분산전원은 정주파수/정전압 제어(isochronous control), 일정 출력 제어, 드룹 제어 및 최대 출력 추종 제어를 통해 출력을 제어할 수 있다[6]. 분산전원의 종류 및 특성을 고려하여 적절한 출력 제어 방법을 선택하여 운영하는 것이 효율적이다.

2.1.1 정주파수/정전압 제어

정주파수/정전압 제어는 항상 계통의 주파수와 전압을 일정한 지령값으로 유지하도록 분산전원의 출력을 제어하는 방법이다. 주로 출력 동특성이 느리고, 관성이 높은 동기 발전기가 이 제어 방법을 통해 출력을 제어한다. 현재 상용화되어 있는 분산전원들 중에는 디젤 엔진 발전기가 동기기 기반으로써 정주파수/정전압 제어에 적합하다. 이 제어를 통한 분산전원의 출력은 식(1), 식(2)와 같이 적분기를 통해 결정되며, 출력 동특성이 느리기 때문에 적분상수는 큰 값을 가진다.

$$P_{ref} = \frac{1}{T_{i1}} \int (f_{ref} - f) df \tag{1}$$

$$Q_{ref} = \frac{1}{T_{i2}} \int (V_{ref} - V) dV \tag{2}$$

여기서, P_{ref} : 유효전력 출력값, Q_{ref} : 무효전력 출력값, f_{ref} : 주파수 지령값, f : 측정된 주파수, V_{ref} : 주파수 지령값, V : 측정된 주파수, T_{i1}, T_{i2} : 적분상수

2.1.2 드룹 제어

드룹 제어는 식(3), 식(4)와 같이 주파수 차 및 전압 차에 따라 미리 설정된 드룹 계수에 의해 출력을 제어하는 방법이다[7]. 다수의 전원이 병렬로 운전 시 드룹 제어를 통해 출력값을 분담하여 헌팅현상을 억제할 수 있으며, 주로 출력 동특성이 빠른 전원들이 이 제어 방법을 통해 출력을 제어한다. 현재 상용화되어 있는 분산전원들 중에는 인버터 기반의 빠른 출력 동특성을 가지며, 충·방전이 가능한 에너지 저장장치가 드룹제어에 적합하다[7].

$$P_{ref} = P_{ref0} + P_{ref}^{droop}, \quad P_{ref}^{droop} = \frac{1}{R_f}(f_{ref} - f) \tag{3}$$

$$Q_{ref} = Q_{ref0} + Q_{ref}^{droop}, \quad Q_{ref}^{droop} = \frac{1}{R_v}(V_{ref} - V) \tag{4}$$

$$R_f = \frac{\triangle f(p.u)}{\triangle P(p.u)} \times 100\% \ , \ R_v = \frac{\triangle V(p.u)}{\triangle Q(p.u)} \times 100\% \tag{5}$$

여기서, P_{ref0} : 유효전력 지령값, Q_{ref0} : 무효전력 지령값, R_f : P-f 드룹 계수, R_v : Q-v 드룹 계수

2.1.3 일정 출력 제어

일반적으로 마이크로가스터빈과 같이 열부하를 담당하는 분산전원은 주파수 및 전압에 상관없이 열부하에 따라 일정한 출력을 공급하는 일정 출력 제어 방법으로 출력을 제어한다. 일정 출력 제어를 통한 분산전원의 출력은 지령값과 같다.

2.1.4 최대 출력 추종 제어

태양광 발전기, 풍력 발전기와 같은 신재생에너지원들은 일사량, 풍속 등의 자연환경에 따라 출력이 변동한다. 따라서 신재생에너지원들은 자연환경에 따라 최대의 출력을 낼 수 있도록 제어하는 것이 효율적이다. 신재생에너지원으로도 주파수 및 전압 제어에 참여할 수 있지만, 본 논문에서는 효율성을 높이기 위해 최대 출력 추종 제어만을 고려하였으며, 자연환경에 따라 출력이 변동하기 때문에 제어 불가능한 분산전원으로 분류하였다.

2.2 분산전원의 제어 특성을 고려한 블랙 스타트 및 계통 동기화 절차

시스템의 복구 과정, 즉 블랙 스타트 과정에서 계통을 기동하는 방법, 분산전원을 전력시스템에 연결하는 방법, 부하 조정 방식, 그리고 전압과 주파수 제어 방식 등이 가장 중요한 고려사항이 된다. 이러한 문제를 고려하여 블랙 스타트를 하기 위해 분산전원의 제어 특성을 고려한 시스템 복구 절차를 개발해야 한다. 그림 2에서는 정전 이후, 안정적인 독립 운전 모드로 마이크로그리드를 운영하기 위해 분산전원들의 제어 특성을 고려한 블랙 스타트 절차를 제안하였다.

① 독립운전 모드로 블랙스타트 시작

사이트 내부의 정전 원인을 제거하였어도 사이트 외부 사고 존재 유무에 따른 위험은 존재한다. 사이트 외부 사고가 제거되지 않았을 경우에, 내부 정전 원인을 제거하였다고 바

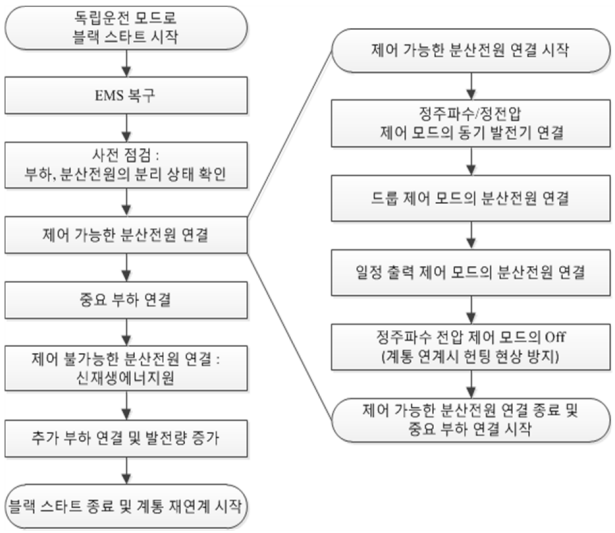

그림 2 분산전원의 제어 특성을 고려한 마이크로그리드의 블랙 스타트 및 계통 동기화 절차

Fig. 2 Process of the black start and the synchronization of microgrid considering the characteristics of distributed generation control

로 계통과 동기화를 시도하는 것은 재정전 사태를 발생할 수 있다. 따라서 독립운전 모드로 블랙스타트를 시작하는 것이 안정성을 향상시킬 수 있다.

② EMS 복구

마이크로그리드의 시스템 제어 및 상태 모니터링을 총괄하는 EMS(energy management system)의 복구가 전원 및 부하 투입 이전에 선행되어야 한다. 따라서 정전 상태에서도 EMS를 운전할 수 있도록 비상용 전원이 사이트에 항상 구비되어야 한다.

③ 사전 점검

정전 후 부하가 연결되어 있는 상태에서 시스템 복구를 시작한다면 주파수·전압의 과도적인 큰 변화가 일어날 수 있다. 따라서 블랙스타트를 시작하기 전에 모든 부하를 분리시켜야 한다. 또한, 분산전원의 특성이 다르기 때문에 안정적으로 분산전원들을 투입시키기 위해 우선적으로 모든 분산전원들을 분리시켜야 한다.

④ 제어 가능한 분산전원 연결

ⓐ 정주파수/정전압 제어 모드의 동기 발전기 연결

마이크로그리드는 인버터 기반의 전원이 많기 때문에 작은 관성력을 가지고 있으며, 시스템의 관성이 작은 경우, 추가적인 분산전원이 투입할 때 과도현상이 심하게 발생하여 시스템이 불안정해지고 투입되었던 분산전원이 다시 분리될 수 있다. 또한, 인버터 기반의 분산전원들을 마이크로그리드에 연결시켜주기 위해서는 기본 입력 전압원의 역할을 수행하는 전원이 필요하며, 이러한 전원은 다른 분산전원들을 순차적으로 연결시킴에도 안정적인 전압원 역할을 수행할 수 있는 능력을 가져야 한다. 따라서 시스템의 관성을 높여주기 위해 정주파수/정전압 제어 모드로 운영하는 동기 발전기를 최우선으로 연결시켜주어 안정적인 전압원 역할을 수행하도록 한다. 동기 발전기 연결 시, 큰 돌입전류를 막기 위해 무부하 운전으로 시작하여 기동 부하를 순차적으로 증가시켜준다. 또한, 헌팅현상을 방지하기 위해서는 정주파수/정전압 제어 모드의 분산전원은 단 한기만을 운영하도록 한다.

ⓑ 드룹제어를 수행하는 분산전원 연결

다수의 분산전원들을 연결시키기에는 정주파수/정전압 제어 모드로 운영하는 분산전원의 용량 한계가 있다. 따라서 지속적인 분산전원들의 연결로 인한 과도현상을 억제하기 위해서는 드룹제어를 수행하는 분산전원을 추가하여 주파수 및 전압 제어에 참여하는 것이 안정적이다. 배터리와 슈퍼캐패시터 등과 같은 에너지 저장장치들을 드룹 제어로 운영할 경우, 안정적인 운영을 위해서는 상대적으로 에너지 용량이 큰 에너지 저장장치를 먼저 연결하도록 한다.

ⓒ 일정 출력 제어 모드의 분산전원 연결

PQ 출력 제어 모드로 동작하는 분산전원을 시스템에 연결한다. 분산전원 투입 시, 과도현상은 정주파수/정전압 제어 모드의 분산전원과 드룹제어 모드의 분산전원들 간의 협조 제어를 통해 안정화 시킬 수 있다.

ⓓ 정주파수/정전압 제어 모드의 동기 발전기 off

계통 연계 운영에서 마이크로그리드 내부의 발전기들 중에 정주파수 제어원이 있을 경우 헌팅 현상이 발생한다. 따라서 계통과 동기화를 하기 전에 정주파수/전압원 역할을 담당하는 분산전원을 정지시키거나, 다른 출력 제어 모드로 변환시켜줘야 한다. 이 때, 정주파수/전압원 역할을 담당하는 분산전원을 정지시켜도 드룹 기능을 가진 분산전원들이 주파수/전압 제어를 수행함으로써 마이크로그리드의 원활한 독립 운전 운영이 가능하다. 또한, 운전하는데 연료가 필요한 동기 발전기의 경우, 지속적으로 정주파수/정전압 제어 모드로 운영하는 것 보다 일정 출력 제어 모드로 변환하여 운영하는 것이 경제적이다.

⑤ 중요 부하 연결

제어 가능한 분산전원들을 모두 시스템에 연결한 이 후, 사이트 내 중요 부하를 우선적으로 투입하여 피해를 최소화한다.

⑥ 제어 불가능한 분산전원 연결

태양광 발전이나 풍력 발전 등 제어 불가능한 분산전원을 연결한다.

⑦ 추가 부하 연결 및 발전량 증가

점진적으로 비중요 부하를 투입하면서 전체 부하의 수요에 맞춰 마이크로그리드 내부의 전체 발전량을 증가시킨다. 이로써 마이크로그리드의 블랙 스타트 절차는 종료된다.

⑧ 마이크로그리드의 계통 연계 모드 전환

고장 원인 제거 후, 상위 계통과의 동기화 조건을 만족하

게 되면 마이크로그리드의 운전 모드를 독립 운전에서 계통 연계로 전환시킨다.

2.3 계통 동기화 알고리즘

마이크로그리드의 정전 이후, 블랙 스타트를 통해 시스템이 안정적인 독립 운전 모드로 회복하면 외부 계통에 상태에 따라 표 1의 배전계통 연계기준에 부합했을 때 STS 동작을 통해 계통과 재접속을 시도한다[8]. 주파수와 계통과 동기화는 STS가 2~3번의 Close/Open 동작을 통해 안정적으로 이루어지며, STS는 마이크로그리드와 계통 상태가 동기화 변수 제한범위 이내에 들어왔는지를 판단하여 Close/Open 동작을 수행한다.

표 1 계통 연계를 위한 동기화 제한 범위
Table 1 Interconnection standard of distributed resources in distribution system during synchronization

분산전원 정격용량 합계(kW)	주파수 차 (△f, Hz)	전압 차 (△V, %)	위상각 차 (△Φ, °)
0 ~ 500	0.3	10	20
500 ~ 1,500	0.2	5	15
1,500 ~ 20,000	0.1	3	10

2.4 모의결과

2.4.1 마이크로그리드 구성 요소

마이크로그리드는 다수의 분산전원들로 구성된 소규모 네트워크로써 계통상황에 따라서 주계통과의 연계운전 및 독립운전이 가능하고, 분산전원의 효율적 이용을 통한 에너지 효율향상, 전력의 역송전, 신뢰도 향상 등이 가능하여 스마트 그리드의 핵심기술로 떠오르고 있다. 하지만, 마이크로그리드 내의 분산전원들은 인버터 기반으로써 시스템 관성이 작은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 동기기 기반의 분산전원이 한 대 이상 연결시켜 운전하는 것이 안정적으로 마이크로그리드를 운영할 수 있다. 또한 동기기 기반의 분산전원을 연결시킴으로써 고장 및 사고 발생 시, 고장전류를 증가시켜 보호협조에 용이하다[9].

본 논문에서는 분산전원들의 제어 특성을 고려하기 위해서 전력연구원 내 실증사이트를 토대로 그림 3와 같이, 동기기 기반의 디젤 발전기(82kVA), 인버터 기반의 드룹 제어로 운전하는 배터리(50kVA/1h) 및 슈퍼캐패시터(50kVA/10s), 인버터 기반의 일정 출력 제어로 운전하는 마이크로가스터빈(60kVA), 신재생에너지원으로서 태양광 발전(30kVA), 부하(150kVA)로 이루어진 380V 저전압 마이크로그리드 시스템을 구성하였다[9].

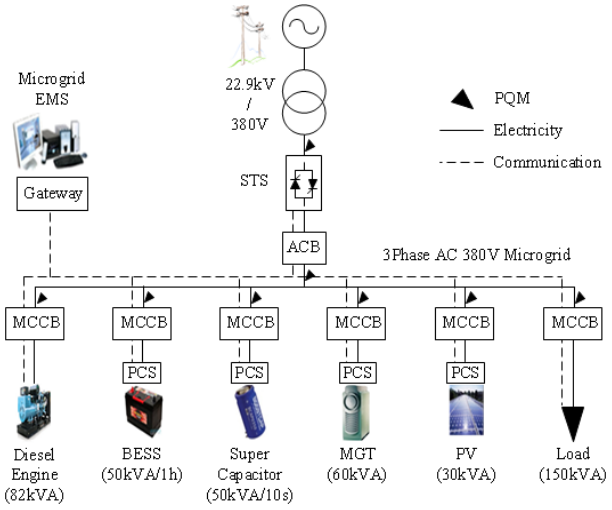

그림 3 마이크로그리드 구성도
Fig. 3 System Layout of Microgrid

2.4.2 시뮬레이션 설계

제안한 블랙 스타트 및 계통 동기화 절차를 검증하기 위하여 전력시스템 해석용 소프트웨어 PSCAD/EMTDC를 사

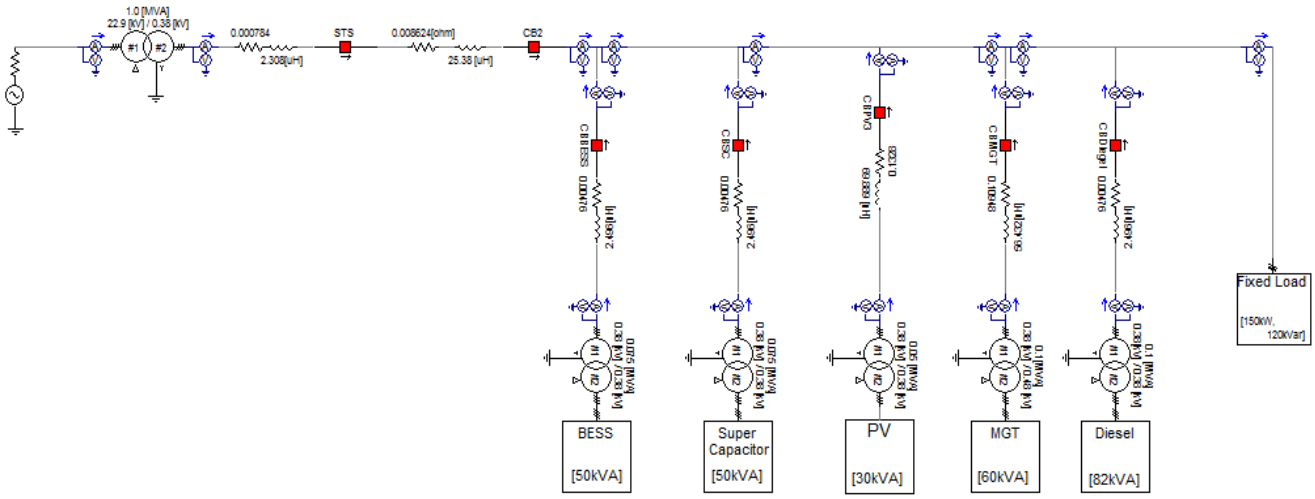

그림 4 마이크로그리드 시뮬레이션 계통도
Fig. 4 Microgrid simulation network

용하여 그림 4와 같이 380V 저전압 마이크로그리드를 모델링하였다. 디젤 발전기는 정격 82kW/380V의 동기 발전기로 모델링하였으며, 실증사이트와 같이 정주파수/정전압 제어 모드와 일정 출력 제어 모드로 선택하여 운전할 수 있다.

각각의 태양광, 배터리, 슈퍼캐패시터 및 마이크로가스터빈은 등가회로를 이용하여 수학적으로 모델링 하였다[10]-[12]. 드룹 제어로 운전하는 배터리의 출력 제어는 P_{ref0}=0kW, Q_{ref0}=0kVAR, R_f=0.01, R_v=0.0526으로 설정하였으며, 슈퍼캐패시터의 출력 제어는 P_{ref0}=0kW, Q_{ref0} =0kVAR, R_f=0.015, R_v=0.0575으로 설정하였다. 또한, 계통 측면에서 마이크로그리드는 제어 가능한 전원으로 간주할 수 있으므로, 모의를 위해 설계한 마이크로그리드의 총 용량은 최대 부하 용량인 150kW로써 STS의 동기화 변수 제한범위를 주파수 차 △f=±0.3Hz, 전압 차 △V=±10%, 위상각 차 △Φ=±20°로 설정하였다. 또한, STS의 제어는 주파수 및 전압의 잦은 변동에 대한 동작을 줄이기 위하여 주파수 변동 및 전압 변동에 대하여 0.5초의 시간지연을 시켰으며, 시간지연 신호와 위상각을 판별하여 STS가 Close/Open 동작하도록 하였다.

2.4.3 모의 결과

초기 정전 상태에서 정전의 원인을 제거하고 EMS의 복구 및 사전 점검 이후, 블랙스타트를 시작하도록 한다. 표 2는 제안하는 블랙 스타트 및 계통 동기화 알고리즘에 따른 시뮬레이션 시나리오를 나타낸다.

표 2 블랙 스타트 및 계통 동기화 시뮬레이션 시나리오
Table 2 Simulation scenarios of black start and synchronization

시뮬레이션 시나리오 내용		시간 [sec]
EMS 복구 및 사전 점검		0~0.4
제어 가능한 분산전원 연결	디젤 발전기 무부하 운전 (정주파수/정전압 제어)	0.4
	기동 부하 연결	0.6
	BESS 연결 (드룹 제어)	1
	슈퍼캐패시터 연결 (드룹 제어)	2
	마이크로가스터빈 연결 (일정 출력 제어)	3
	디젤 발전기 정지	4
	디젤 발전기 재연결 (일정 출력 제어)	5
부하/신재생 에너지원 연결	중요 부하 연결	7
	신재생에너지원 연결	8
	나머지 부하 추가 연결	9
계통 재연계	계통 재연계 시작	10
	계통 재연계 종료	13.2

그림 5와 그림 6은 분산전원들이 투입하면서 생기는 유효전력과 주파수 변동 및 무효전력과 전압 변동의 과도현상에 대한 시뮬레이션 결과이다. 블랙스타트 절차에 따라 디젤 발전기를 정주파수/정전압 제어 모드로 무부하 운전을 시작하며, 디젤 정격의 50%인 42kW까지 기동 부하를 천천히 증가시켜가면서 1초 이전까지 안정적으로 정격 전압을 유지하고 있다. 이후 3초까지 드룹 제어 모드로 운전하는 BESS와 슈퍼캐패시터를 순차적으로 연결하고, 일정 출력 제어 모드로 운전하는 분산전원 MGT를 연결한다. 이때 MGT는 관성이 큰 디젤 발전기가 재기동 시 과도현상을 줄이기 위해 부하량과 같은 출력량으로 출력하도록 하였다.

디젤 발전기 운전을 정지시키는 4초 이전까지는 디젤 발전기가 정주파수 전압원 역할을 수행함으로써 과도현상을 담당해준다. 디젤 발전기가 일정 출력 제어 모드로 재기동하는 5초 후에는 드룹 제어를 수행하는 BESS와 슈퍼캐패시터가 과도현상을 담당해준다. 또한, 디젤 발전기는 관성이 큰 동기기 기반이기 때문에 재기동시, 소프트 스타트 기법을 통해 천천히 출력을 증가시켜준다. 제어 가능한 분산전원의 연결이 모두 끝나면 정전에 대한 피해를 최소화하기 위해 우

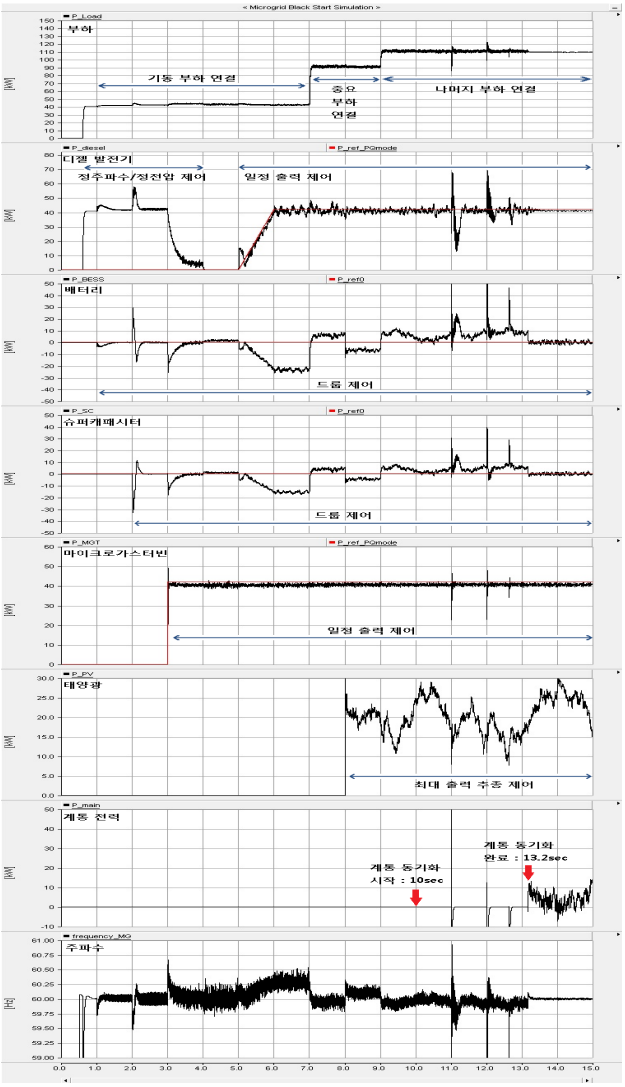

그림 5 블랙 스타트 및 동기화 시 유효전력 및 주파수 변동에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result for variations of active powers and frequency during black start and synchronization

선적으로 중요 부하부터 연결을 하고, 제어 불가능한 분산전원인 태양광 발전과 나머지 부하들을 순차적으로 연결하여 독립 운전 모드로 마이크로그리드를 안정적으로 회복시킨다.

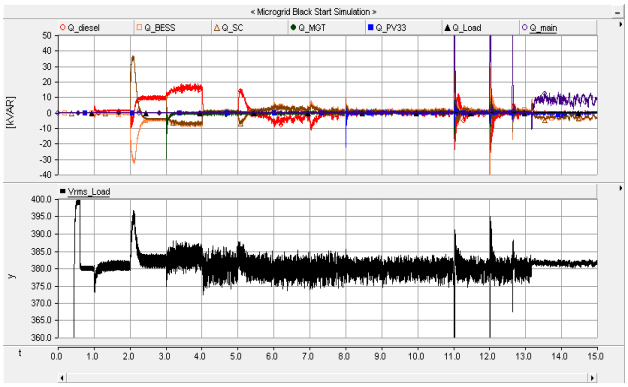

그림 6 블랙 스타트 및 동기화 시 무효전력 및 전압 변동에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 6 Simulation result for variations of reactive powers and voltage during black start and synchronization

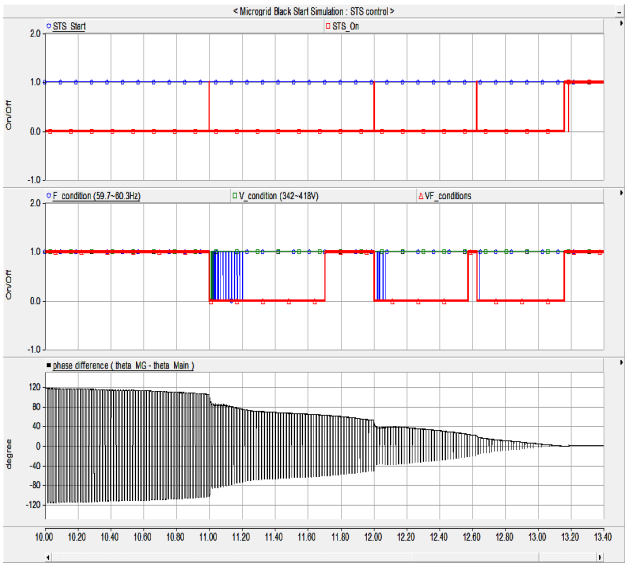

그림 7 동기화 시 STS 동작 특성

Fig. 7 Characteristics of STS operation during synchronization

그림 7은 계통의 이상 여부를 판단한 후, 앞에서 제안한 계통 동기화 알고리즘에 따른 STS 동작 특성을 나타내고 있다. STS 제어기는 주파수 및 전압 변동에 대하여 0.5초의 시간지연을 가지며, 제한 범위 안에 있을 경우 1의 신호를 출력하고, 제한 범위 밖에 있을 경우 0의 신호를 출력한다. 위의 신호와 위상차의 제한 범위 여부를 판별하여, 3개의 모든 동기화 변수가 만족할 경우 STS가 close 동작을 수행한다. 계통 재연계를 시작하는 10초에 계통과 마이크로그리드의 위상차가 ±115°를 나타내어 STS는 동작하지 않았다. 위상차가 제한 범위보다 크기 때문에 규정에 근거하여 동기화 시간을 단축하기 위하여 11초와 12초에 STS를 동작시켰다. 동기화가 이루어지지 않았을 때 임의로 STS를 동작시킴에 따라 그림 5와 그림 6에서와 같이 순간적인 주파수 및 전압의 변동이 크게 나타났지만, 위상차가 급격히 감소함으로써 동기화 시간을 감소시킬 수 있다. 12.626초에서는 동기화 변수(Δf=0.2Hz, ΔV=10V, $\Delta\Theta$=±20°)가 제한 범위 이내에 들어와서 STS가 동작하였지만, 주파수 변동이 0.3Hz를 벗어나 다시 Open 동작을 하였다. 13.157초에 동기화 변수(Δf=0.1Hz, ΔV=5V, $\Delta\Theta$=±2°)가 제한 범위 이내에 들어와서 STS가 close 동작을 하며, 이 후에도 제한 범위 이내를 유지하여 안정적으로 계통 연계에 성공한 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

유지 보수를 위한 계획적 원인이나 외·내부 사고 및 고장에 의한 비계획적 원인으로 인해 정전이 발생한 경우 빠른 시간 안에 복구를 해야 하며 그에 대한 대책이 뚜렷하게 마련되어 있어야 한다. 정전은 신뢰도와 밀접한 관계를 가지고 계통 시스템 복구가 얼마나 빠르게 진행되는지에 따라 신뢰도가 향상되기 때문에 시스템의 복구는 될 수 있는 한 빠르게 이루어져야 한다.

계통 시스템 복구 시, 안정적인 전압을 제공하는 전원의 유무가 주요하다. 본 논문의 블랙 스타트 및 계통 동기화 알고리즘은 지속적으로 안정적인 전압을 제공하기 위해 분산전원들의 다양한 제어 특성을 고려하였으며, 다음과 같은 장점을 가진다. 첫 번째로, 동기기 기반의 정주파수/정전압 제어로 운전하는 디젤 발전기를 최우선으로 연결시켜줌으로써 마이크로그리드의 관성을 높여주고 다른 분산전원의 투입에 의한 과도상태에서도 안정적으로 전압을 유지시켜줄 수 있다. 두 번째로, 드룹 제어로 운전하는 분산전원을 연결시, 디젤 발전기가 정주파수 입력 전압원 역할을 수행해줄 수 있다. 세 번째로, 계통 동기화를 대비하여 디젤 발전기를 일정 출력 제어로 바꿔주며, 이 때 드룹 제어로 운전하는 분산전원들이 주파수/전압 제어를 수행함으로써 안정적인 전압을 마이크로그리드에 공급해줄 수 있다.

본 논문에서 제안한 블랙 스타트 및 계통 동기화 알고리즘을 통해 정전 이후에 마이크로그리드가 안정적으로 복구되는 과정을 시뮬레이션을 통해 검증하였고, 향후 실증사이트에 실제로 적용할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. 20120003126)

감사의 글

본 논문은 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. 20120003555)

References

[1] P. Kundur, NJ Balu, MG Lauby, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., pp. 1073-1077, 1994.

[2] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, "Microgrid protection", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, pp. 1-6, 2007.

[3] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, "Control Strategies for Microgrids Emergency Operation", 2005 International Conference on Future Power Systems, pp. 1-6, Nov. 2005.

[4] C. L. Moreira, J. A. P. Lopes, "Using Low Volatge Microgrids for Service Restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, no. 1, pp. 395-403, Feb. 2007.

[5] Thale, S., "A Smart Control Strategy for the Black Start of a Microgrid Based on PV and Other Auxiliary Sources under Islanded Condition", 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 2454-2459, June. 2011.

[6] 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.

[7] Micah J.Erickson, Rovert H.Lasseter, "Integration of Battery Energy Storage element in a CERTS Microgrid", 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 2570-2577, Sept. 2010.

[8] KEPCO, "Standard for interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", 2010.

[9] Dae-Geun Jin, Jong-Chan Choi, Dong-Jun Won, Hak-Ju Lee, Woo-Kyu Chae, Jung-Sung Park, "A Practical Protection Coordination Strategy Applied to Secondary and Facility Microgrids." Energies, Vol. 5, no. 9, pp. 3248-3265, Aug. 2012.

[10] 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.

[11] Min Chen and Gabriel A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, June. 2006.

[12] Li Jun Jun, "Modeling and Simulation of Micro Gas Turbine Generation System for Grid Connected Operation", 2010 Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1-4, March. 2010.

저 자 소 개

최 진 영 (崔 珍 永)

1983년 12월 8일생

2010년 인하대 공대 전자전기공학 졸업, 2012년 동 대학원 전기공학 석사 졸업, 2012년 ~ 현재 동 대학원 전기공학 박사 과정

E-mail : jy128308@gmail.com

원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일생

1998년 서울대 공대 전기공학 졸업, 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학 석사 졸업, 2004년 동 대학원 전기컴퓨터공학 박사 졸업, 2006년 ~ 현재 인하대 전기공학부 부교수

Tel : 032-860-7404

E-mail : djwon@inha.ac.kr