

신재생에너지가 설치된 수용가의 마이크로그리드 구현을 위한 그리드-인터페이스 에너지 저장장치에 관한 연구

(A Study on the Grid-Interfacing Storage System for Migrating Customers with Renewable Energy Sources into Microgrid)

이계병* · 손광명**

(Kyebyung Lee · Kwang-Myoung Son)

Abstract

This paper introduces a grid-interactive storage system to operate the customers without voltage source inverters as a microgrid. The proposed storage system does not require any modification of the control scheme of the inverters existing within the customers. Novel control scheme of the grid-interfacing storage system according to its new structure ensures the seamless transition between the grid-connected and islanded operation of the microgrid.

Key Words : Renewable Energy Sources, Microgrid, Grid-Interfacing Storage System, GIS

1. 서 론

현재 전력계통에서 태양광 및 풍력 등의 신재생에너지 원을 채용한 분산전원(DERs: Distributed Energy Resources)들을 찾아보는 것이 어렵지 않을 정도로 많은 분산전원들이 계통에 도입되어 운전되고 있는 상태이다.

계통에서 운전되고 있는 기존의 발전기들은 출력 제어가 가능한 반면 신재생에너지 원을 채용한 분산전원들은 자연 환경에 의존되기 때문에 출력의 제어가 불가능하고 예측 또한 쉽지 않다. 이러한 간헐적인 출력 특성을 가진 신재생에너지 원을 채용한 분산전원들은 전력 계통의 안정한 운영을 방해하는 요인이 된다.

분산전원들은 전력계통의 일부를 전체 전력시스템과 독립적(independently)으로 운전할 수 있는 새로운 운전 방법의 잠재적인 가능성을 가지고 있다. 이것은 수용가의 전력 품질(power quality)을 향상시키는 과제 및 노력과 함께 microgrid 라 불리는 새로운 개념을 가져왔다. Microgrid 개념은 CERTS(the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)에서 전력계통의 신뢰도 향상을 위해 소개되었다[1]. Microgrid는 여러 가지 형태의 분산전원,

* 주저자 : 고려대 전자전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 동의대 전기공학과 교수
* Main author : Ph.D. Candidate, School of Electrical Eng., Korea University,
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Eng., Dong-Eui University
Tel : 051-890-1671, Fax : 051-890-1664
E-mail : kmson@deu.ac.kr
접수일자 : 2013년 1월 15일
1차심사 : 2013년 1월 18일
심사완료 : 2013년 3월 19일

수용가, 에너지 저장장치들로 구성되고 단독운전(islanded operation)이 가능한 소규모 전력 계통으로 정의될 수 있다[1-2].

Microgrid 내에서의 잦은 출력 변동 및 부하변동에 대해 상위 계통에서 microgrid가 일정한 부하로 보일 수 있게, microgrid 내 각 분산전원들이 출력을 제어하여 해당 급전선에서의 유효전력을 일정하게 제어할 수 있다[3].

또한 microgrid는 단독 운전모드에서 중요한 부하들에게 계속적으로 전력을 공급하기 위해 자율적으로 운전될 수 있다. 따라서 신재생에너지 원을 채용한 분산전원들의 지속적인 운전을 가능하게 해준다.

Microgrid에 관련된 많은 연구들은 갑작스런 상위 계통의 사고 등에 대비하여 빠른 통신 없이 microgrid를 단독 운전모드로 즉시 전환하기 위해서 [4]에서 연구된 기존의 동기발전기 droop 제어 기법을 인버터 제어에 적용하고 있다[1-3, 5-7].

[2]에서는 microgrid의 단독 운전시 제어 전략을 나타내었고, microgrid의 단독 운전모드로의 전환시 과도현상을 해결하기 위해 부하 절체(load-shedding) 및 에너지 저장장치의 필요성과 이의 관리에 대한 중요성을 나타내었다. [5]에서는 [2]의 결과로부터 microgrid의 black start를 위한 절차가 제공되었다. [3]에서는 유효전력 제어를 분산전원의 출력제어 뿐만 아니라 분산전원이 연결된 급전선(feeder)의 유효전력을 제어함으로써 상위 계통으로부터 microgrid가 일정한 부하로 보이게 할 수 있는 개념적 방법을 제안하였다.

Droop 유효전력 제어기는 단독 운전 시, microgrid 내 분산전원들의 유효전력 분배가 쉽게 이루어지는 이점이 있고, 계통 연계 운전 시, 유효전력이 설정치로 추종 제어될 수 있다. 그러나 Droop 전압 제어기는 설정치의 무효전력을 추정 제어할 수 없다. 이를 해결하기 위해 [6]에서는 계통 연계 운전시 무효전력을 PI 제어기로 추종 제어하였고, 단독 운전이 되면 droop 전압 제어기로 전환하여 microgrid 내 무효전력을 분담하였다. 그러나 이는 분산전원의 지리적 위치로부터 microgrid의 운전모드 전환을 즉시 알 수 없다는 것에서 현실적으로 적용하기 어렵다.

[8]에서는 여러 가지 상위 계통의 사고로부터 microgrid가 단독운전모드로 전환하는 것이 논의되었지만, 높은 전압의 계통이 이용되었고 microgrid 내에 동기발전기가 포함되어 있는 경우이며, 상위 계통과의 재접속에서 기존의 계통에서 사고 후 재투입하는 방법이 시도되어 재접속 시 과도현상이 크게 나타났다. [6]에서는 단독 운전 중 상위 계통과 재접속하기 위해서, microgrid 내 모든 분산전원들은 STS(Static Transfer Switch) 양단 전압의 위상 및 크기 차로부터 정격 기준 주파수 및 전압을 같은 비율로 재동기화 제어 하였다. 그러나 분산전원의 지리적 위치를 고려하지 않고 시도된 것으로 STS와 멀리 떨어진 경우 빠른 통신이 요구될 것이다. [7]에서는 단독 운전에서의 주파수 감소에 의한 상위 계통과의 주파수 차로부터 STS 양단 전압차가 최소가 되었을 때 재접속하는 방법을 이용하였다. 그러나 단독 운전에서 전압 크기가 많이 감소된 경우 또는 부하가 감소되어 상위 계통의 전압 크기가 높은 경우 상위 계통과의 전압 크기차가 커지게 되고, 이때 재접속을 시도하게 되면 큰 과도현상이 나타날 것이다.

[5]에서는 에너지 저장장치만을 가진 분산전원을 상위 계통과 연결되는 변압기의 저압측에 위치시키고 이를 주 저장장치(main storage device)로 정의하였다. 주 저장장치를 이용하여, black start 과정에서 상위 계통과의 재접속이 제공되었다. 재접속 과정에서, MGCC(MicroGrid Central Controller)는 상위 계통과의 재접속을 위해 동기화 조건을 확인한다. MGCC는 microgrid를 최적의 운전 상태로 유지하기 위해 microgrid 내 분산전원 및 부하들을 통합제어 및 관리하는 상위 제어기이다[2, 5]. 또한 MGCC는 상위 계통과의 동기화를 위해 주 저장장치에게 주파수 및 전압을 변화시킬 것을 요구한다. 이, 주 저장장치를 제외한 나머지 분산전원들을 모두 전류제어 방식인 PQ 인버터 제어(PQ inverter control)[2] 방식으로 전환함으로써, MGCC는 주 저장장치만이 microgrid 내 기준 주파수 및 전압을 형성하게 하였다. 그러나 이러한 방식은 microgrid 내에 존재하는 분산전원들이 모두 전류제어 방식으로 전환하는 기능을 지원해야하는 문제가 있다. 또한 [5]의 사례연구 결과에서 전류제어 방식으

로 전환될 때 과도현상이 나타났고, 재접속 시에도 과도현상이 상당히 나타났다.

본 논문에서는 간헐적인 분산전원이 운전되고 있는 수용가의 높은 전력 품질 유지 및 해당 수용가의 신뢰도와 에너지 이용률 향상을 위해 해당 수용가의 microgrid 운전을 시도하였다. Microgrid 운전을 위해 요구되는 조건으로부터 해당 수용가를 microgrid로 운전하는데 있어서 발생하는 문제점을 해결할 수 있는 새로운 기능의 에너지 저장장치인 그리드-인터페이스 스토리지 시스템(Grid-Interfacing Storage System, GIS)을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 GIS는 microgrid를 상위 계통에 연결시키고 안정한 운전을 위해 중요한 창구(interface)역할을 한다. GIS는 상위 계통과 microgrid 사이인 PCC(Point of Common Coupling)에 위치되고 물리적으로 STS를 포함하여 직접 STS를 제어할 수 있는 구조를 가진다. 이로부터 GIS가 microgrid의 운전모드를 즉시 판단할 수 있기 때문에, GIS는 특정 목적을 이루기 위한 여러 가지 제어모드를 가질 수 있다. GIS의 각 제어모드는 microgrid의 운전모드에 따라 적절히 선택되거나, 필요에 따라 특정 제어모드가 선택될 수 있다. 또한 제어모드들 사이에서의 전환이 부드럽게 전환될 수 있다.

2. 제안된 그리드-인터페이스 시스템

2.1 그리드-인터페이스 시스템의 구조

GIS는 특정 수용가를 microgrid로 운전 가능하게 해준다. Microgrid가 상위 계통과 연계되어 운전될 때는 상위계통과 microgrid 사이에서 창구역할을 하고, 필요시 microgrid를 단독 운전 모드로 전환한다. Microgrid가 단독으로 운전될 때는 전력수급 균형을 맞추고, 상위 계통이 회복되면 상위 계통과 재동기화 후 재접속한다. 그림 1은 GIS의 구성을 나타낸 것이다. 이전에 설명된 것과 같이 GIS는 PCC에 위치되고, 에너지 저장장치인 전지, 전력변환 장치인 인버터, STS, GCS(Grid-Connecting Switch)를 포함한다. 그림 1에서와 같이 GIS는 각 버스의 전압과 STS 및

GCS로 흐르는 전류 정보를 통신 없이 직접 측정한다. 그림 1에서 GIS를 제외한 microgrid의 나머지는 또 다른 분산전원 및 부하들로 구성될 수 있다. 이들은 GIS의 상위제어인 MGCC[2, 5]에 의해 감시 및 통합 제어된다.

GIS는 기준 주파수 및 전압을 제공하는 분산전원으로 grid-forming[9] 역할을 하기 때문에, GIS가 초기에 그림 1에서 microgrid main bus 인 bus 2에 투입되기 위해서는 동기화가 만족된 후 투입되어야 한다. 따라서 GIS의 초기 투입용 스위치인 GCS(Grid-Connecting Switch)가 필요하다.

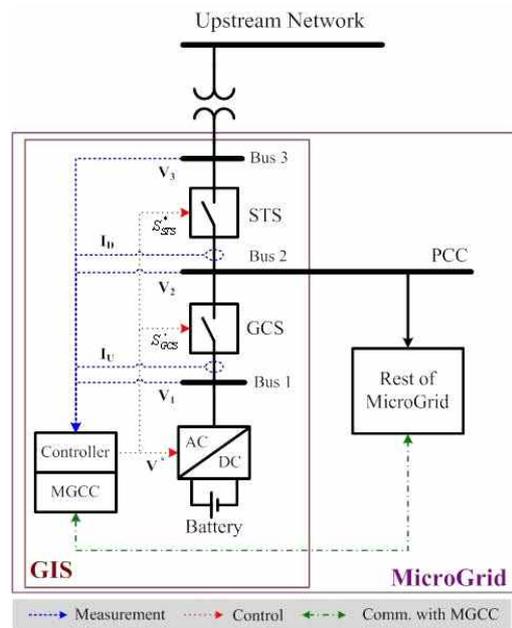


그림 1. GIS의 구조
Fig. 1. Structure of GIS

표 1. GIS의 제어모드
Table 1. Control Modes of GIS

Operation mode of microgrid	Real power control	Reactive power control
Grid connected operation mode	MDC	MDC
	UDC	UDC
		VC
Islanded operation mode	Droop control	
	Re-synchronization control	

2.2 GIS의 제어모드

그림 1에서와 같이 GIS는 PCC에 위치되기 때문에 상위계통의 전력품질을 통신 없이 감시할 수 있고, 이로부터 microgrid의 운전모드를 즉시 판단하여 대응할 수 있다. 이것은 microgrid 운전모드에 따라 GIS가 여러 가지 제어모드를 가질 수 있게 해준다. GIS의 각 제어모드는 microgrid의 운전모드에 따라 적절히 선택되거나, 필요에 따라 특정 제어모드가 선택될 수 있다. 또한 제어모드들 사이에서의 전환은 부드럽게 전환될 수 있다.

Microgrid에 관련된 대부분의 기존연구에서는, microgrid가 상위 계통의 전력품질 문제에 대응하기 위해 단독 운전모드로 전환할 때 통신 없이 운전모드를 전환하기 위해서, microgrid 내 기준 주파수 및 전압을 제공하는 분산전원들은 대부분 droop 제어만 채택하고 있다[1-2]. 계통 연계 운전모드에서 droop 제어는 유효전력을 제어할 수 있지만 무효전력은 제어할 수 없다. 기존의 분산전원들은 droop 제어 방식을 이용하여 분산전원 출력 제어(unit power flow control) 또는 급전선의 전력 제어(feeder power flow control)[3] 중 한 가지만이 선택되어 운전될 수 있었다. [6]에서는 계통 연계시 무효전력 제어를 위해서 분산전원의 무효전력 제어모드를 microgrid의 운전모드에 따라 구분하지만, 분산전원의 지리적 위치 및 통신이 고려되지 않아서 실제적인 경우 제어모드의 전환시점을 정확히 파악하기 어렵다.

GIS의 제어모드는 microgrid의 각 운전모드와 유효 및 무효전력 제어에 따라 표 1과 같이 구분된다. 표 1에서 MDC(Microgrid Dispatch Control), UDC(Unit Dispatch Control), VC(Voltage Control)는 microgrid가 계통 연계 운전모드일 때 GIS의 제어모드이고, Droop control과 Re-synchronization control은 microgrid가 단독 운전모드일 때 GIS의 제어모드이다.

표 1에서 MDC는 microgrid 내의 간헐적인 전원장치의 출력 및 부하들의 잦은 변동에서도, microgrid와 상위 계통사이에서 일정한 유효 및 무효 전력을 주고받을 수 있게 GIS의 유효 및 무효전력 출력을 각각 제어하는 제어모드이다. [3]에서 “feeder power flow

control”이라는 제어방식을 제안하였지만, 이는 급전선의 전력조류 제어로써, microgrid 내 여러 급전선들 중 하나의 급전선을 특정 분산전원이 담당하여 급전선의 전력조류를 제어하는 것이다. 그러나 GIS의 MDC 제어모드는 상위 계통과 microgrid가 주고받는 전력조류를 제어한다.

UDC는 GIS의 유효 및 무효 전력 설정치를 각각 일정하게 제어하는 제어모드이다. VC(Voltage Control)는 무효전력 제어에만 해당되는 제어모드으로써, GIS의 출력 전압을 droop 방식을 통해 GIS의 단자전압을 제어하는 제어모드이다.

Droop control은 droop 방식을 이용하여 단독 운전시 기준 전압 및 주파수를 제공하는 제어모드이다. “Re-synchronization”은 microgrid가 단독 운전에 있을 때 상위 계통과 재접속하기 위해서 상위계통의 전압과 microgrid의 전압을 동기화시키는 제어모드이며, droop 제어 방식 기반으로 구성된다.

GIS의 제어모드 중 microgrid의 운전모드에 따라 전환되는 제어모드들의 전환에서 과도현상을 최소화하기 위해 제어모드의 전환 동작과 STS의 스위칭 동작이 동기화되어 운전되어야 한다. 따라서 그림 1과 같이 GIS는 물리적으로 STS를 포함하여 직접 STS를 제어할 수 있는 구조를 가져야 한다. 만약 GIS가 STS를 포함하지 않는다면, 가까이 위치하여 이들 사이에서 매우 빠른 통신이 요구된다.

2.3 GIS의 유효전력 및 무효전력 제어기

그림 2는 GIS의 유효전력 제어기를 나타낸 것이다. GIS의 유효전력 제어기는 계통 연계 운전에서 MDC와 UDC 제어모드 중 하나가 선택될 수 있고, 단독 운전에서 droop control과 droop 제어 방식 기반인 re-synchronization control 제어모드 중 하나가 선택될 수 있다.

Microgrid가 상위 계통에 연계되어 운전될 때, 그림 2의 유효전력 제어기는 상위 계통에 의해 결정되는 정격의 운전 주파수에서 GIS가 원하는 유효전력을 출력하기 위해서 GIS의 적절한 전압 위상이 결정한다[1-2, 6]. Microgrid가 단독으로 운전될 때, 그림 2의 유효전

력 제어기는 기준 전압 및 주파수를 제공하는 다수의 분산전원들 사이에서 미리 결정된 유효전력과 주파수에 대한 droop 특성에 따라 통신 없이 유효전력을 분배할 수 있는 것으로 잘 알려져 있다[1-2, 4, 6-7, 10].

그림 2에서 “Sel. 1”의 선택 스위치는 microgrid의 계통 연계 운전에서 GIS의 제어모드 중 MDC 제어모드와 UDC 제어모드 중 하나를 선택하기 위해 추가되었다. Microgrid가 단독 운전되는 경우, 상위계통 사이의 유효전력 제어는 더 이상 필요 없다. 따라서 단독 운전에서 “Sel. 1”의 선택 스위치는 UDC 모드로 선택된다.

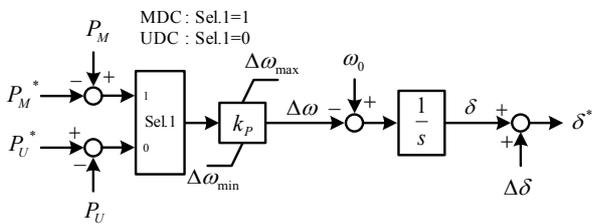


그림 2. GIS의 유효전력 제어기
Fig. 2. Real power controller of GIS

그림 2의 유효전력 제어기와 유사한 방법으로 GIS의 무효전력 제어기는 그림 3과 같이 구성될 수 있다. 무효전력 제어기가 유효전력 제어기와 다른 점은 상위 계통과 연계되어 운전될 때와 단독 운전될 때 각각에 대해서 다른 제어 블록을 가진다는 것이다.

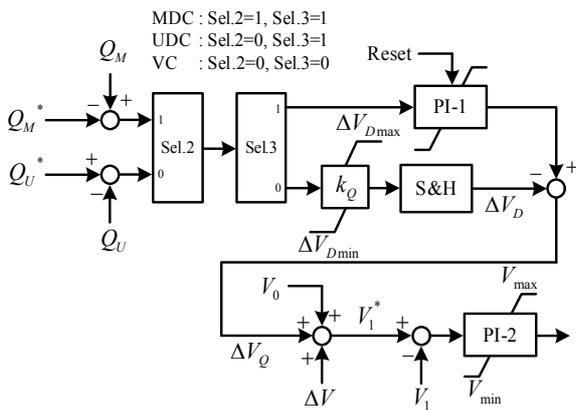


그림 3. GIS의 무효전력 제어기 및 전압 제어기
Fig. 3. Reactive power & voltage controller of GIS

Microgrid가 단독 운전되는 경우는 droop 제어가 요구되는 것에 반해 microgrid가 상위 계통과 연계되어 운전되는 경우, MDC 및 UDC 제어모드를 위해 GIS의 무효전력을 설정치로 추종 제어하기 위해서 PI 제어기가 요구된다[6]. 그림 3의 무효전력 제어기의 출력은 그림 1에서 bus 1의 전압인 V_1^* 을 출력하고, 이는 bus 1의 전압 크기 제어기로 입력된다.

3. 사례연구

3.1 테스트 시스템

본 논문에서 소개된 GIS와 이의 제어 시스템을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션에서 이용되는 microgrid 테스트 시스템의 단선도는 그림 4와 같고, 이의 전기적 파라미터는 표 2와 같다. 그림 4의 테스트 시스템은 평균 160kW의 순시전력을 소비하는 실제 빌딩 시스템을 기반으로 작성된 것이다.

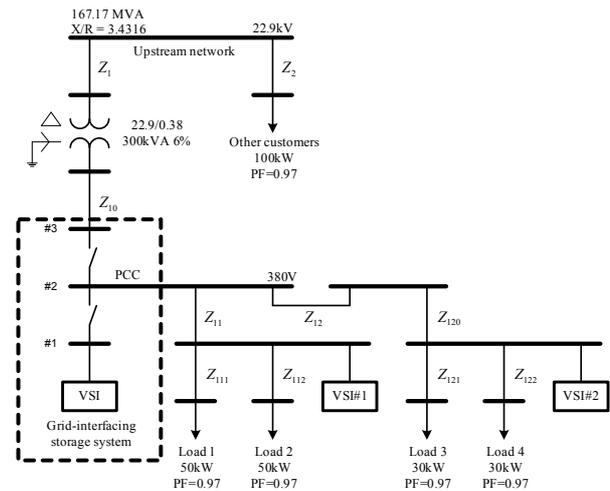


그림 4. 빌딩 시스템 기반의 Microgrid 테스트 시스템
Fig. 4. Test system of the microgrid based on the building system

GIS의 인버터 시스템과 제어기의 파라미터는 표 3에 나타내었다. GIS의 PI 제어기 파라미터는 PnP(plug and play) 방식을 고려하여, 직관적으로 선

표 2. 테스트 시스템의 파라미터
Table 2. Parameters of the test system

Symbol	Impedance in p.u.	Length	X/R ratio	Conductor size
Z_1	$0.000059 + j0.000018$	500m	0.3061	38mm ²
Z_2	$0.000117 + j0.000036$	1000m		
Z_{10}	$0.004446 + j0.004141$	50m	0.9318	185mm ²
Z_{11}	$0.004072 + j0.002526$	30m	0.6204	120mm ²
Z_{111}	$0.003421 + j0.000917$	10m	0.2680	50mm ²
Z_{112}	$0.006842 + j0.001834$	20m		
Z_{12}	$0.011080 + j0.008083$	100m	0.7295	150mm ²
Z_{120}	$0.006787 + j0.004211$	50m	0.6204	120mm ²
Z_{121}	$0.003421 + j0.000917$	10m	0.2680	50mm ²
Z_{122}	$0.010263 + j0.002752$	30m		

표 3. GIS의 파라미터
Table 3. Parameters of the GIS

Parameter		Symbol	Value
Rated capacity of inverter		P_{max}	200.0kW
Nominal frequency		ω_0	60Hz
Permissible range of frequency difference		$\Delta\omega$	± 0.5 Hz
Nominal voltage(L-L)		V_0	380V
Switching frequency		f_{sw}	10kHz
DC-link capacitor		C_{Vdc}	470,000 μ F
Nominal DC-link voltage		V_{dc}	690.9V
Series resistance		R_{dc}	1.0m Ω
Filter inductor	Inductance	L_f	0.1mH
	ESR	R_{L_f}	1.0m Ω
Filter capacitor	Cap.	C_f	50.0 μ F
	ESR	R_{C_f}	5.0m Ω
Coupling inductor	Inductance	L_c	0.7mH
	ESR	R_{L_c}	7.0m Ω
Droop gain	$P-\omega$	k_P	-0.05
	$Q-V$	k_Q	-0.04
Q PI controller	P gain	K_{p1}	0.08
	I gain	K_{i1}	1.0
V PI controller	P gain	K_{p2}	0.5
	I gain	K_{i2}	100.0

정할 수 있는 값으로 선정되었다. GIS의 에너지 저장 장치는 전지를 채용하기 때문에 매우 빠른 응답의 출력이 가능하다. 따라서 시뮬레이션 모델에서 GIS의 전지 모델은 이상 전압원과 직렬 내부저항만을 고려하였다. 시뮬레이션 모델에서 GIS 및 태양광전원장치의 제어시스템은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 user-defined component(UDC)로 개발되었다.

3.2 시뮬레이션 결과

먼저, 태양광 전원 장치(VSI#2)가 운전되고 있는 수용가가 GIS의 운전에 의해 계통에 연계된 microgrid의 시뮬레이션 결과를 그림 5~7에 나타내었다. 그림 5에서 1.0초 이전에는 microgrid로 운전되는 수용가의 모든 부하가 태양광 전원 장치 및 상위 계통으로부터 전력을 공급받는다.

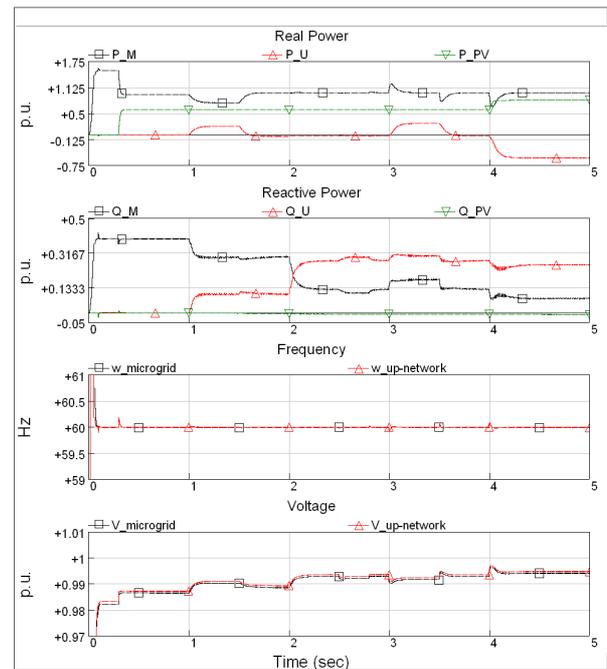


그림 5. Microgrid의 계통연계운전
Fig. 5. Grid-connected operation of the microgrid

그림 5에서 GIS는 출력전압을 microgrid의 전압 크기와 위상과 동기화시킨 후, 1.0초에 UDC 제어모드로 투입된다. 그림 5에서 GIS의 유효전력 제어기의 제어

모드가 1.5초에 MDC 제어모드로 전환되고, 무효전력 제어기의 제어모드가 2.0초에 VC 제어모드로 전환된다.

그림 5에서 2.5초에 상위 계통에서 상당한 유도 부하가 급격히 전력을 소모하는 과도현상이 0.3초간 발생하는 것을 상징하여 모의하였다. 이때 발생한 전압강하가 microgrid에 영향을 미치게 되는데, GIS의 VC 제어모드는 적절히 무효전력을 발생하여 높은 품질의 전압을 유지한다. 상위 계통에서 발생한 전압강하는 microgrid 내 부하 말단에서 더 많은 전압강하를 야기할 것이다.

그림 5에서 3.0초에 microgrid 내 부하가 20% 증가되고, 3.5, 4.0초에 다시 20%씩 감소한다. 여기서 GIS의 MDC 제어모드에 의해 상위 계통으로부터 공급되는 유효전력은 1.0p.u로 유지되는 것이 관찰 된다. GIS의 유효전력 제어기가 MDC 제어모드로 제어되고 있는 중, 태양광 전원장치의 출력 변동에 의한 여분의 전력 또한 GIS가 흡수하여 상위 계통에 영향을 미치지 않을 수 있을 것이다.

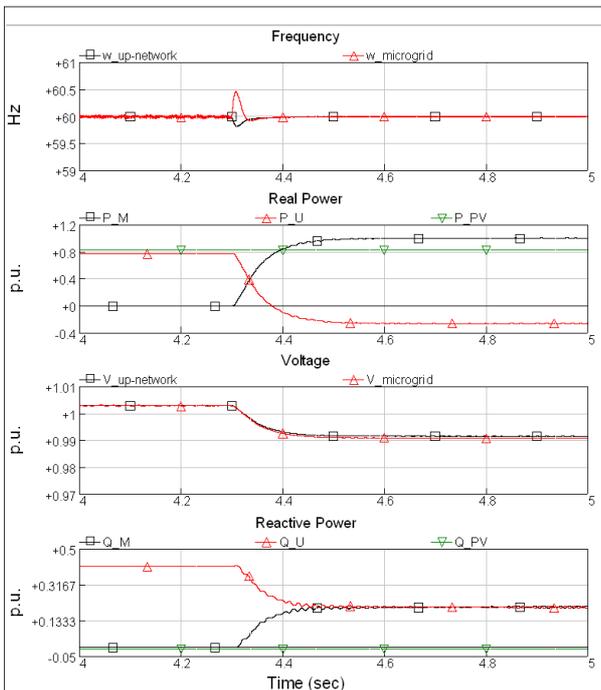


그림 6. Microgrid의 재접속
Fig. 6. Reconnection of the microgrid

그림 6은 microgrid가 상위 계통에 재접속될 때 각 주파수, 유효 전력, 전압, 무효전력을 나타낸 것이다.

그림 7은 microgrid가 상위 계통에 재접속 될 때, 각 순시 전류를 나타낸 것이다. 그림 7에서 전류의 변화로부터 microgrid와 상위 계통의 재접속이 부드럽게 이루어짐을 확인할 수 있다.

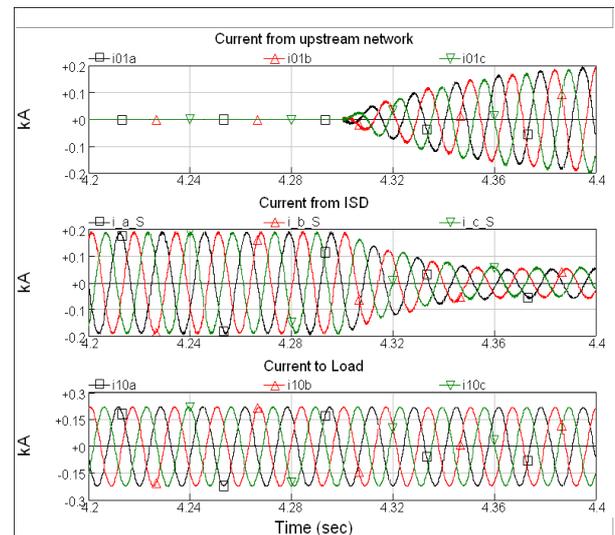


그림 7. Microgrid의 재접속시 각 순시 전류
Fig. 7. Each instantaneous current when the microgrid is reconnected to the upstream network

4. 결론

본 논문에서는 간헐적인 분산전원이 운전되고 있는 수용가를 microgrid로 운전하여, 해당 수용가의 전력 품질을 유지하고 신뢰도 및 에너지 이용율을 향상시킬 수 있는 GIS를 제안하였다. GIS는 기존의 신재생 에너지 발전시스템의 제어구조 등의 변경 없이 수용가를 microgrid로 운전할 수 있게 해준다.

제안된 GIS는 Microgrid가 상위 계통과 연계되어 운전될 때는 상위계통과 microgrid 사이에서 창구 역할을 하고, 필요시 microgrid를 단독 운전모드로 전환하여 microgrid의 전력수급 균형을 맞추고, 상위 계통이 회복되면 상위 계통과 재동기화 후 재접속한다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Robert H. Lasseter and P. Piagi, "Providing Premium Power through Distributed Resources", Proc. of the 33rd Hawaii International Conf. on System Sciences, pp. 1437-1445, Jan. 4-7 2000.
- [2] J. A. Pecas Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [3] Robert H. Lasseter, "Extended CERTS microgrid", IEEE PES General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Jul. 2008.
- [4] Mukul C. Chandorkar, Deepakraj M. Divan, and Rambabu Adapa, "Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply systems", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, Jan./Feb. 1993.
- [5] C. L. Moreira, F. O. Resende, and J. A. Pecas Lopes, "Using Low Voltage MicroGrids for Service Restoration", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 395-403, Feb. 2007.
- [6] Yunwei Li, D. Mahinda Vilathgamuwa, and Poh Chiang Loh, "Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for Multibus Microgrid System", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.
- [7] Robert H. Lasseter and P. Piagi, "Control and Design of MicroGrid Components", PSERC Final Project Report, Jan. 2006.
- [8] F. Katiraei, M. R. Iravani, and Peter W. Lehn, "Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, Jan. 2005.
- [9] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas "Microgrids Management", IEEE power & energy magazine, Vol. 6, No. 3, pp. 54-65, May/June 2008.
- [10] F. Katiraei and M. R. Iravani, "Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1821-1831, Nov. 2006.

◇ 저자소개 ◇



이계병 (洪吉東)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 고려대 대학원 전자전기공학과 박사과정.



손광명 (金李朴)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 동의대 전기공학과 교수.