

마이크로그리드 시스템 해석

손 광 명, 이 계 병
동의대학교 전기공학과

Micro-Grid System Analysis

Kwang M. Son, Kye B. Lee
Dept. of Electrical Eng., Dong-Eui Univ.

Abstract - Micro-source units having power ratings in thousands of watts can provide even higher reliability and fuel efficiency than the conventional large scale units. These units are also clustered with loads creating micro-grid services to customer sites such as office buildings, industrial parks and homes. Micro-sources adopt voltage source inverter to ensure the power quality of sensitive loads. This paper deals with the connection of micro-sources into the system grid. Modeling and simulation of the grid connected micro-sources at the power frequency range are investigated. Simulation results show that the micro-grid system with two micro-sources has good dynamic characteristics.

Keywords : Micro-Source, Micro-Grid, VSI(voltage source Inverter), Utility Interface

1. 서 론

Micro-Grid는 소형 분산 에너지원(Micro-Source or Distributed Energy Resources : DER)으로 이루어진 분산전원망의 총칭으로, 다수의 수용가들을 위하여 수요지에서 전력을 생산 및 공급 하는 기술로 기본적으로 여러 수용가의 부하 및 분산발전기들이 하나의 덩어리(Cluster)를 형성하게 되는 새로운 개념의 배전망이다.

Micro-Grid는 외부 계통에서 보았을 때는 독립적으로 제어 가능한 하나의 전원 시스템으로 동작하게 되며, 이 시스템은 전력뿐만 아니라 일반적으로 열도 함께 공급할 수 있으므로 새로운 개념의 에너지 생산 및 공급 기술로 분류할 수 있다. 여기에 사용되는 분산발전 기술의 대부분이 전력전자 기술을 적용하고 있어, 시스템에 유연성을 제공한다. 또한 일부 발전기들의 부하 변동에 대한 늦은 응답 특성 및 계통 외란을 일시적으로 보상하기 위해 에너지 저장 장치의 채용을 권장하기도 한다[1,2].

기존의 분산전원은 화력복합발전 방식으로 많이 이루어져 있으며 발전기의 규모와 기계적 관성이 비교적 크고 별다른 전력변환 장치 없이 계통에 연계되어 운전되고 있다. 또한 최근의 신재생에너지 발전 등에 의한 기존의 분산전원용 전력변환장치는 일반적으로 전류형 인버터를 사용 하며 전류추종형 제어 방식을 채택하여 부하측 전압은 계통측전압에 의해 종속적으로 제어되는 형태였다. 그러나 최근 수용가들이 컴퓨터 등의 민감한 부하에 의해 고품질 전력을 요구함에 따라 전압문제(voltage sag, swell) 등 전력품질을 유지할 수 있는 제어 방식으로 전압형 인버터를 채용한 Micro-Grid의 개념이 제안되기에 이르렀다.

Micro-Source는 전력원이 DC 전원을 생산하고, DC/AC 전압형 인버터(DC/AC Voltage Source Inverter, VSI)를 사용하여 교류전원을 발생하는 방식을 채택하고 있으며, 아직 까지 계통연계보다는 단독운전에 대한 연구가 많이

이루어져 왔다. Micro-Source의 계통연계 기술들은 대부분이 전력변환장치들을 필요로 하고, 일반적으로 DC 입력력을 일정한 주파수, 크기, 위상각을 가지는 AC 전압 혹은 전류 형태로 변환하여 출력 하게 된다.

Micro-Source가 계통 연계 분산전원으로 채용되기 위해서는 여러 가지 기술적 문제가 해결되어야 하며, 전력시스템 및 부하에 유효 및 무효전력을 원활히 공급하기 위한 제어시스템에 관한 연구가 필수적이다. 또한, 다수의 Micro-Source가 계통에 연계 되었을 경우의 부하 분담과 주파수 및 전압제어에 관한 여러 가지 특성이 분석되어야 한다. 이에, 본 연구에서는 위에서 언급한 사항들을 중심으로 Micro-Source의 계통 연계를 위한 모델링 및 제어에 관하여 연구하였다.

2. 마이크로소스의 개요

소형 분산 에너지원의 한 형태인 Micro-Source는 두 가지 특징을 가진다. 첫 번째는 Micro-Source는 전력원으로 직류를 사용한다. 연료전지, 태양전지, 마이크로터빈이 대표적인 Micro-Source의 전력원이며, 마이크로터빈의 경우 고주파의 교류 장치이나 정류기를 고려하여 직류를 사용할 것이다. 또한 각 소스들의 응답속도는 10초~200초 정도로 느린 응답 특성을 가지나, 부하변동에 빠르게 응답하기 위하여 각 소스에 적절한 저장장치를 사용한 것을 가정한다. 두 번째로 전력전자시스템을 이용하여 계통에 연계되어 전력시스템과 Micro-Source 사이의 유효전력과 무효전력 흐름을 관성 없이 제어한다. 본 논문에서는 Micro-Source의 에너지원으로 최근 주목 받고 있는 연료전지 와 마이크로터빈을 중심으로 모델을 한정한다. 그림 1,2 는 이들의 개념도를 나타내고 있다.

Micro-Source의 기능은 다음과 같다.

- Micro-Grid 내에서 전압을 공급하고, 안정도를 증가시킨다.
- 수KW~100MW 급 소형에너지원 과 전력전자인터페이스로 구성된다.
- 일반적으로 작은 크기로 모듈화가 가능하므로, 건설기간의 단축, 설비 용량의 증감이 가능하고 입지선정이 용이하다.
- 잉여 열에너지를 공급할 수 있다.
- 중요부하에 대하여 계통사고로 인한 전력공급 중단을 막을 수 있다. 즉, UPS 기능을 가진다.

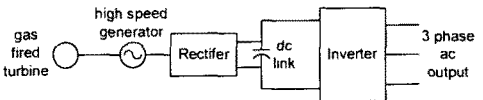


그림 1. 마이크로터빈을 채용한 Micro-Source 시스템 개념도

Fig. 1. Block diagram of the Micro-Source system adopting micro-turbine

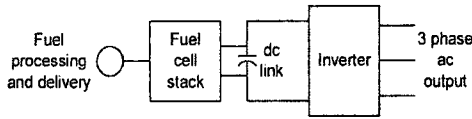


그림 2. 연료전지를 채용한 Micro-Source 시스템 개념도
Fig. 2. Block diagram of the Micro-Source system adopting fuel cell

3. 마이크로소스 제어시스템

3.1 제어시스템 구조

인버터 동작의 가장 기본적인 요구사항은 요구되는 유효전력을 Grid에 공급 할 수 있는 능력과 교류시스템에 연결될 때 요구되는 전압크기를 유지 할 수 있어야 한다. 그림 3은 전력전자 제어시스템의 측정량과 제어 블록을 나타내었다. 인버터 단자는 계통 연계용 인덕턴스를 통해 Grid와 연결된다. 이 인덕터는 Grid로 전달되는 유효 전력 및 무효 전력을 적정하게 제어 할 수 있도록 해준다. 마이크로터빈과 연료전지 등이 채용된 시스템에서는 순간적인 부하의 변화에 효과적으로 응답하고 전압을 유지하기 위해 통상 DC 링크가 배터리와 함께 연결된다. 충전된 배터리 의해서 과도응답을 보상함으로써 DC 링크 전압은 상대적으로 경직된(stiff) 직류전압으로 볼 수 있으므로, 인버터에 배터리가 연결된 시스템은 전력전자 제어 시스템을 설계하고 해석하는 것을 용이하게 해준다.

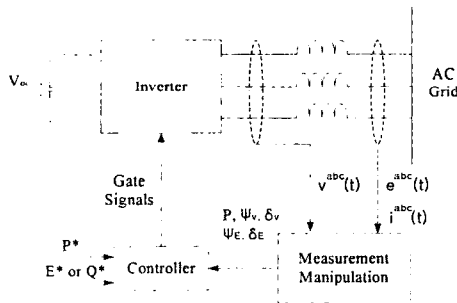


그림 3. 마이크로소스의 인버터 제어 방식
Fig. 3. Inverter control scheme

이 제어시스템에서 측정량은 AC 그리드 측의 전압, 전류($e_{abc}(t), i_{abc}(t)$)와 인버터 단자 전압($v_{abc}(t)$), 등이다. 이들을 이용하여 Park's 변환 등을 통하여 유효 및 무효전력, 그리고 각종 전압 자속(voltage flux) 등을 계산한다. 이들 변수를 이용하여 Controller 블록은 전압자속제어 방법이나 SVPWM (Space Vector PWM) 방식 등을 이용하여 게이트 신호를 발생시킨다. 외부에서 주어지야 되는 두 가지 지령치는 다음과 같다.

- 투입 요구 유효전력(P^*)
- 버스 요구 전압(E^*) 혹은 투입 요구 무효전력(Q^*)

3.2 이상적인 인버터 모델 (Ideal inverter model)

위와 같은 인버터 제어기에 의해 발생하는 제어 신호는 인버터에서 대응되는 점오차 신호로 변환된다. 이 응답 시간은 수 ms 정도의 아주 빠른 특성을 가지기 때문에 전력주파수 영역의 해석에서는 순간적으로 응동한다고 가정하여도 큰 오차가 없다. 그리고 고조파가 통상 수 % 이내의 값이므로 고조파를 무시하면 인버터의 출력은 이상 전압원의 형태로 가정할 수 있다. 그림 4는 인버터 이상모델이다. 동작 점에서 전압자속의 크기는 전압크기와 ω_0 곱으로 변환되고, 인버터 전압의 위상각은 δ_E 가 더해져서 변환된다.

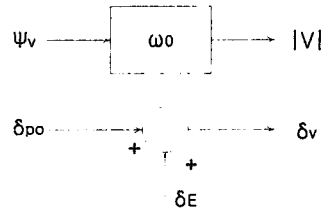


그림 4. 이상 인버터 모델
Fig. 4. Ideal inverter model

삼상평형인 동작을 가정할 때, 인버터의 출력 값은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 V_a, V_b, V_c 는 인버터 출력단의 상전압 기본과 성분을 나타낸다. 이때 영상전류는 존재하지 않고 각 값은 단위값으로 표현된다.

$$\begin{aligned} V_a(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v) \\ V_b(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v - \frac{2}{3}\pi) \\ V_c(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (1)$$

실제의 인버터 출력단은 그림 5와 같이 델타 결선으로 연결되어 있다.

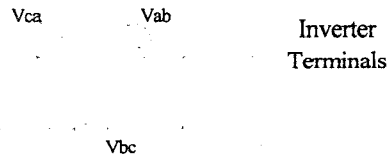


그림 5. 3상 전압원 이상 인버터 모델
Fig. 5. Three phase ideal voltage source model

3.3 Ideal Inverter Model을 이용한 상세 제어구성

3.3.1. P 와 E 제어방식의 제어기

그림 6은 시스템에 주입하는 유효전력과 모션 전압 E의 크기를 제어하는 방식의 제어기를 보여준다. 전압 제어 부분과 유효 전력 제어 부분은 서로 독립되어 있으며 각각 P-I 제어블록을 가지고 있다.

두 지령치 P^* 와 E^* 는 외부에서 주어진다. 전압의 조정은 지령치 E^* 를 측정치 E 와 비교하고, P-I 제어블록에서 적당한 전압 크기 V 를 발생시킨다. P-I 블록은 비례 및 적분 이득과 함께 다음 식으로 표현된다.

$$P-I: K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

제어기의 출력 전압 V 는 최소, 최대 한계를 가지며, 이 출력 전압은 필요로 하는 무효전력 지령치로부터 제어기의 동작에 의해 정하여 진다. 제어하고자 하는 모션 전압 E 에 순간 전압 강하(voltage dip)가 발생할 경우 인버터는 전압 V 를 상승시킴으로써 투입 무효전력을 증가시켜야 한다. 전압 V 의 최대치는 Q_{max} 이고 $P=0$ 일 때 발생한다. $P=0$ 조건일 때 Q_{max} 에 관한 식에서 $\delta_p=0^\circ$, $\cos\delta_p=1$ 임을 의미한다. 최대 전압 V_{max} 는 인버터 정격 최대 전압보다 작거나 같아야 한다.

$$Q_{max} = \frac{V_{max}^2 - V_{max} E^*}{X} \quad (3)$$

$$V_{\max} = \frac{E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{\max}X}}{2} \quad (4)$$

유사하게 V_{\min} 을 구할 수 있다.

$$V_{\min} = \frac{E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{\min}X}}{2} \quad (5)$$

Q_{\min} 은 Micro-Source가 무효전력을 소모함으로써 전압을 감소시키는 운전을 할 경우 고려해야 하는 한계치이다. 예를 들어 전압 순간 상승(voltage swell)이 발생할 경우 전압 E 를 지령치로 감소시키기 위해서는 이러한 최소값으로 운전할 수도 있다.

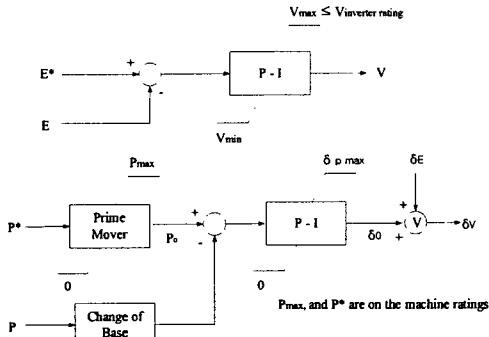


그림 6. P 와 E 제어기 구조도
Fig. 6. Control block for P and E regulation

유효전력 제어의 경우에는 전압 제어와는 달리 지령치 P^* 의 스텝 변경 시 원동기(prime mover)의 응답이 이에 순서적으로 응답할 수 없다는데 다른 점이 있다. 실제로, 마이크로 터빈과 연료전지는 출력 변화 요구 시 각각 다른 방법으로 출력을 상승시킨다. 원동기 정격 블록은 이러한 지연시간을 고려하여야 한다. 원동기 블록을 통과한 새로운 유효전력 지령치 P_0 는 음수가 될 수 없고, P_{\max} 보다 작아야 한다. 왜냐하면, 이 값이 음수가 되면 마이크로소스가 부하로 동작하는 것을 의미하고, 출력 한계를 벗어날 수 없기 때문이다. P_{\max} 는 기기자체의 정격을 토대로 한 기준값에 의한 단위법으로 표현된다. P_0 와 측정치 전력 P 를 비교하여 그 차이가 P-I 블록으로 공급된다. 전력측정치 P 는 식 (3) 을 이용하여 시스템 기준값에서 Micro-Source의 기준값으로 변환된 값이다. P-I 블록의 출력 δ_p 는 두 이웃 모션 전압의 위상 δ_V 와 δ_E 의 차이가 된다. 여기서 δ_p 값은 최소 한계는 마이크로소스가 부하로 운전되지 않도록 0이 되며, 최대 한계는 30° 가 된다.

3.3.2. P 와 Q 제어방식의 제어기

배전시스템에서는 배전시스템에서의 분산전원들이 상호 작용하여 불안정한 운전이 되지 않도록 하기 위해 각 분산전원이 고정된 양의 무효전력만 출력 하도록 요구할 경우가 있다. 그림 7은 이처럼 Micro-Source가 고정된 양의 무효전력을 계통에 투입할 경우의 제어기의 형태를 보여준다. 제어기는 무효전력 지령치와 측정된 무효전력을 비교하여 그 차를 P-I 블록에 입력되는 형태의 구조를 가지고 있다. 제어기의 출력은 무효전력을 발생할 수 있는 적당한 인버터 단자 전압 크기 V 를 발생하도록 되어 있다.

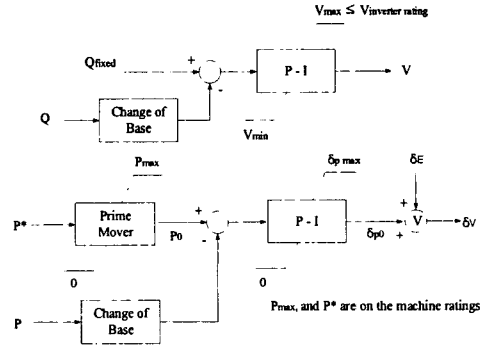


그림 7. P 와 Q 제어기 구성
Fig. 7. Control block for P and Q regulation

다수의 마이크로소스가 계통에 연계되지 않고 병렬로 운전될 경우 각 소스의 유효전력 분담을 위해 전력-주파수 Droop을 사용하기도 한다. Micro-Source는 부하에 전기적으로 가깝게 위치하여, 전압형 인버터로 유효전력과 무효전력을 제어한다. Micro-Source는 병렬운전하며 부하를 공유하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 Micro-Source를 전압형 인버터를 통해 계통에 연계시킴으로써 전력 공급 외의 다양한 기능을 수행할 수 있는 Micro-Grid의 구성과 제어 원리를 제안하였다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 지원에 의해 기초전력연구원 주관으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 : 02340-17)

[참 고 문 헌]

- [1] Lasseter, R.H. et al., "White paper on integration of distributed energy resources. The CERTS MicroGrid Concept", in Consort. Reliability Technology Solutions, 2002, pp. 1-27.
- [2] Lasseter, R.H. Piagi, P., "Providing premium power through distributed resources", Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, Jan 4-7, Page(s): 1437 -1445.
- [3] Lasseter, R.H., "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE , Volume: 1 , 27-31 Jan. 2002, Page(s): 305-308 vol.1
- [4] Lasseter, R.H., Piagi, P., "MicroGrid: A Conceptual Solution", Power Electronics Specialist Conference(PESC) '04, Aachen,Germany,20-25,June 2004.