

Micro-Grid 시스템의 동특성 해석에 관한 기초 연구

*손 광 명, *이 계 병, **전 인 수
 동의대학교 전기공학과*, 한국전력공사**

A Study on the Dynamic Analysis of Micro-Grid System

*Kwang M. Son, *Kye B. Lee, **In-Soo Jeon
 Dept. of Electrical Eng., Dong-Eui Univ.* , KEPCO**

Abstract - Micro-grid consists of micro-sources which adopt environmentally friendly and reliable power sources with independent real and reactive power control capability for providing premium power quality. This paper presents dynamic modeling and the stable operating range of the micro-grid system varying the parameters of the micro-sources. Case study results show the parameters affecting the stability of the micro-grid and the stable operating range of the micro-sources.

1. 서 론

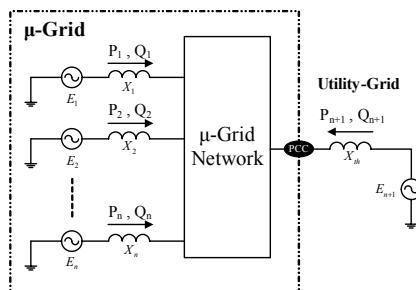
Micro-Grid는 모듈화된 소규모 분산 에너지원(Micro-Source or Distributed Energy Resources : DER)들이 수요지에서 전력 및 잉여 열 에너지를 생산하여 공급하는 새로운 개념의 소규모 전력시스템으로 utility-grid에 연계 혹은 분리되어 운전 가능한 전원시스템이다[1,2].

본 논문에서는 유효 및 무효전력을 독립적으로 제어하는 Micro-Source의 일반적인 운전범위에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다. Micro-Source의 제어시스템은 고정 PQ 제어와 Droop 특성을 고려한 전압 및 주파수제어로 구분된다. 다수의 Micro-Source가 포함된 Micro-Grid 시스템은 기존에 연구되어 오던 가장 간단한 형태의 계통 연계형 분산전원과 달리 다른 특성을 보일 수 있다. 2개의 Micro-Source를 포함하는 샘플 Micro-Grid 시스템을 상정하였고, 해석함에 있어 Micro-Source 모델은 인버터의 기본과 성분을 토대로 한 전력주파수 영역 모델을 이용하여 Micro-Grid 시스템의 동특성을 해석하였다. Micro-Grid 동특성 모델의 선형화 시스템행렬을 구하고 소신호 안정도 해석을 통하여 Micro-Source의 일반적인 운전범위에서 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다.

2. Micro-Grid의 모델링

2.1 Micro-Grid의 개요

Micro-Grid는 n 개의 Micro-Source들이 존재할 수 있다. 이들은 부하 및 utility-grid 측으로 전력을 전송하여 Micro-Grid 내 부하로 높은 품질의 전력을 제공하고 안정한 전압을 유지시켜준다. 또한 utility-grid로부터 전력전송을 감소시켜 선로손실을 줄이고, 왜란에 의한 영향을 줄일 수 있다[1,2]. 그림 1은 Micro-Grid 시스템을 유효 및 무효전력의 관점에서 나타낸 것이다.



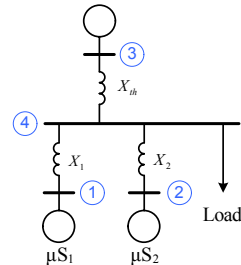
<그림 1> Micro-Grid 시스템의 모델

그림 1에서 X_{th} 와 E_{n+1} 는 각각 Micro-Grid 시스템에 대한 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스와 기존의 동기발전기들의 등가 전압원이다. X_{th} 는 utility-grid 측의 단락용량에 따라 결정되며 배전선로 길이가 길어지거나 연계된 변압기의 용량이 작아지면 커지게 된다. 그림 1에서 X_1, X_2, \dots, X_n 은 각 Micro-Source의 계통연계 인덕터의

리액턴스이며, E_1, E_2, \dots, E_n 은 각 Micro-Source의 인버터 출력전압이다.

2.2 Micro-Grid의 조류방정식

그림 1에서 Micro-Source가 2개인 경우, Micro-Grid 시스템의 단선도를 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 Micro-Source의 유효 및 무효 전력 조류 방정식은 식 (1)~(4)와 같다.



<그림 2> Micro-Grid 시스템의 단선도

$$P_1 = E_1(X_{th}E_2\sin\delta_{12} + X_2E_3\sin\delta_{13})/X_T \quad (1)$$

$$P_2 = E_2(X_{th}E_1\sin\delta_{21} + X_1E_3\sin\delta_{23})/X_T \quad (2)$$

$$Q_1 = E_1[(X_2 + X_{th})E_1 - X_{th}E_2\cos\delta_{12} - X_2E_3\cos\delta_{13}]/X_T \quad (3)$$

$$Q_2 = E_2[-X_{th}E_1\cos\delta_{21} + (X_1 + X_{th})E_2 - X_1E_3\cos\delta_{23}]/X_T \quad (4)$$

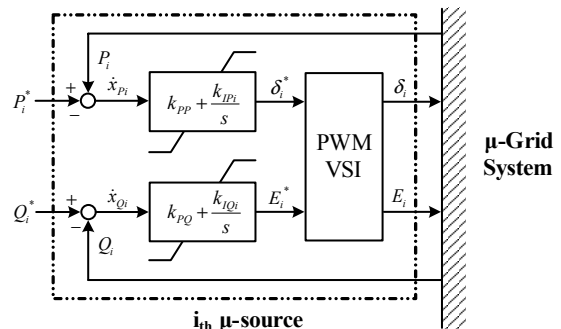
여기서, $\delta_{nm} = \delta_n - \delta_m$ ($n=1, 2, 3, m=1, 2, 3, n \neq m$),
 $X_T = X_1X_2 + X_1X_{th} + X_2X_{th}$ 이다.

2.3 Micro-Source의 제어시스템 모델링

2.3.1 PQ 제어시스템

Micro-Grid 내 i 번째 Micro-Source의 유효 및 무효전력 출력은 PI 제어기를 통해 제어되며, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에서 Micro-Source 인버터의 동특성 부분은 무시할 수 있다[8]. 이는 전력제어의 응답속도가 수백 ms 인데 비해 인버터 부분은 수 ms 이하의 응답속도를 가지므로 유효 및 무효전력 관점의 해석에서는 즉시 응답한다고 가정하여도 무방하다.



<그림 3> PQ 제어기

그림 2의 PI 제어기 상태방정식은 식 (5), (6)와 같은 관계를 가지며, 제어기의 출력은 식 (7), (8)과 같다.

$$\dot{x}_{P_i} = P_i^* - P_i \quad (5)$$

$$x_{Q_i} = Q_i^* - Q_i \quad (6)$$

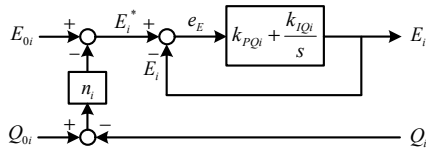
$$\dot{\delta}_i = k_{IP_i} x_{P_i} + k_{PP_i} (P_i^* - P_i) \quad (7)$$

$$E_i^* = k_{IQ_i} x_{Q_i} + k_{PQ_i} (Q_i^* - Q_i) \quad (8)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n$ 이고, δ_i^* , E_i^* 는 각각 i 번째 Micro-Source의 출력전압 크기와 위상, k_{PP_i} , k_{IP_i} 는 각각 i 번째 Micro-Source의 유효전력 비례이득과 적분이득, k_{PQ_i} , k_{IQ_i} 는 각각 i 번째 Micro-Source의 무효전력 비례이득과 적분이득, P_i^* , P_i , Q_i^* , Q_i 는 각각 i 번째 Micro-Source의 유효 및 무효전력 지령치와 측정치이다.

2.2.2 Droop 특성을 고려한 전압 및 각주파수 제어

Droop 특성을 고려한 Micro-Source 무효전력에 대한 전압 제어기는 그림 4와 같다. 제어기는 PI 제어기를 채용하며, PI 제어기에 의한 상태방정식은 식 (9)와 같고, PI 제어기 출력식은 식 (10)과 같다. 식 (9)에 식 (10)을 대입하면, 그림 4에서의 무효전력에 대한 전압 제어기 상태방정식을 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.



<그림 4> Droop 특성을 고려한 무효전력 제어기

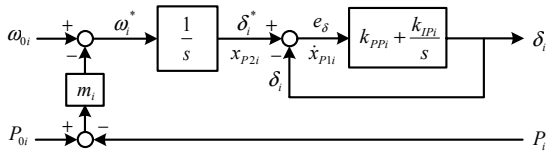
$$\dot{x}_{Q_i} = E_{o_i} - E_i - n_i (Q_{o_i} - Q_i) \quad (9)$$

$$E_i = k_{IQ_i} x_{Q_i} + k_{PQ_i} x_{Q_i} \quad (10)$$

$$\dot{x}_{Q_i} = -\frac{k_{IQ_i}}{(1 + k_{PQ_i})} x_{Q_i} + \frac{1}{1 + k_{PQ_i}} \{E_{o_i} - n_i (Q_{o_i} - Q_i)\} \quad (11)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n$ 이고, E_{o_i} , Q_{o_i} 는 각각 지령 전압, 무효전력이며, n_i 는 droop 특성의 기울기이고, $n_i < 0$ 이다.

Droop 특성을 고려한 Micro-Source 유효전력 제어기는 그림 5와 같다. 제어기는 PI 제어기를 채용하며, PI 제어기 및 적분기에 의한 상태방정식은 식 (12), (13)과 같고, PI 제어기 출력식은 식 (14)와 같다. 식 (12)에 식 (14)를 대입하면, 그림 5에서의 유효전력 제어기 상태방정식을 식 (15), (16)과 같이 유도할 수 있다.



<그림 5> Droop 특성을 고려한 유효전력 제어기

$$\dot{x}_{P_{1i}} = x_{P_{2i}} - \delta_i \quad (12)$$

$$\dot{x}_{P_{2i}} = \omega_{o_i} - m_i (P_{o_i} - P_i) \quad (13)$$

$$\delta_i = k_{IP_i} x_{P_{1i}} + k_{PP_i} x_{P_{1i}} \quad (14)$$

$$\dot{x}_{P_{1i}} = -\frac{k_{IP_i}}{1 + k_{PP_i}} x_{P_{1i}} + \frac{1}{1 + k_{PP_i}} x_{P_{2i}} \quad (15)$$

$$\dot{x}_{P_{2i}} = \omega_{o_i} - m_i (P_{o_i} - P_i) \quad (16)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n$ 이고, ω_{o_i} , P_{o_i} 는 각각 지령 각주파수, 유효전력이며, m_i 는 droop 특성의 기울기이고, $m_i < 0$ 이다.

3. 사례연구

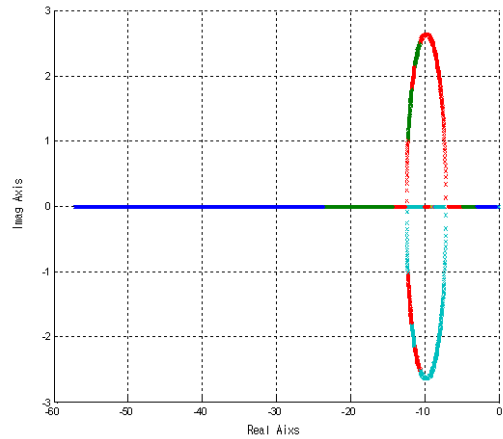
통상 Micro-Source 전압의 크기는 $E_i = 0.9 \sim 1.1$ [p.u.] , 전압의 위상은 $\delta_i = 0 \sim 30^\circ$ 정도의 범위에 존재하게 된다. Micro-Source가

$P_i = 1 \sim 3$ [p.u.] 정도를 부하 및 utility-grid 측으로 공급하기 위해서는 계통연계 인덕터의 리액턴스가 $X_i = 0.2$ [p.u.] 정도 필요하다[3,4].

<표 1> 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터

| | | |
|--------------|--------------------|-----------|
| utility grid | E_{n+1} [p.u.] | 1 |
| | δ_{n+1} [°] | 0 |
| | X_{th} [p.u.] | 0.1 ~ 2.0 |
| micro source | $E_{1,2}$ [p.u.] | 0.9 ~ 1.1 |
| | $\delta_{1,2}$ [°] | 0 ~ 30 |
| | $X_{1,2}$ [p.u.] | 0.2 |
| | $\tau_{1,2}$ [sec] | 0.1 |

샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터를 요약하면 표 1과 같다. 그림 6은 Micro-Source 1번의 Droop 특성 기울기의 변화에 따른 근궤적을 나타낸 것이다.



<그림 6> Droop 특성의 기울기에 따른 근궤적

4. 결 론

본 논문에서는 2개의 Micro-Source로 구성된 샘플 Micro-Grid 시스템의 동특성을 모델링하였고, 이를 이용하여 Micro-Source들의 운전에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다. Micro-Grid 시스템은 Micro-Source들의 운전범위 및 파라미터에 따라 불안정해질 수 있으며, Micro-Grid의 안정한 운전을 위해서는 본 논문과 같은 절차를 통해 파라미터 및 운전범위를 결정하여야 한다.

감사의 글

이 논문은 “산업자원부 전력IT기술개발사업(R-2005-1-396-001)”의 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. H. Lasseter, P. Piagi, “Providing Premium Power through Distributed Resources”, Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1437-1445, Jan 4-7 2000.
- [2] R. H. Lasseter, P. Piagi, “MicroGrid: A Conceptual Solution”, Power Electronics Specialist Conference(PESC) '04, Aachen, Germany, pp. 4285-4290, June 20-25 2004.
- [3] 손광명, 이계병, 홍준희, “PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발”, 대한전기학회 논문지, 56권, 3호, pp. 457-464, 2007년 3월.
- [4] 손광명, 김영섭, “Micro-Source의 계통 연계용 인덕터 크기 선정에 관한연구”, 한국조명전기설비학회 논문지, 19권, 6호, pp. 52-58, 2005년 9월.