

# 마이크로그리드 시스템의 안정도에 관한 기초 연구

(A Study on the Stability of Micro-Grid System)

손광명\* · 이계병

(Kwang-Myoung Son · Kye-Byung Lee)

## 요 약

Micro-Grid는 높은 전력품질을 제공하기 위해 독립적으로 유효 및 무효전력 제어가 가능한 연료전지와 마이크 로터빈과 같이 친환경적이고 신뢰할 수 있는 전력원을 채용하는 Micro-Source들로 구성된다. 본 논문은 Micro-Grid 시스템의 동특성 모델링과 안정도 해석의 기본적 해석 방법에 관하여 연구하였다. Micro-Source 인버 터의 기본주파수 모델을 이용하여 Micro-Grid 시스템의 동특성 모델을 구성하였다. Micro-Grid 시스템의 선형화된 동특성 모델을 기초로 하여 안정도 해석을 수행하였다. 사례연구 결과로부터 Micro-Grid 시스템의 안정도에 영향을 미치는 파라미터를 식별하였다.

## Abstract

Micro-grid consists of micro-sources which adopt environmentally friendly and reliable power sources such as Fuel-Cell and Micro-Turbines with independent real and reactive power control capability for providing premium power quality. This paper deals with the basic aspect of dynamic modeling and the stability analysis of the micro-grid system. The fundamental frequency model of the micro-source inverters are considered to form a dynamic model of the micro-grid system. Stability analysis is performed based on the linearized dynamic model of the micro-grid system. Case study results show the parameters affecting the stability of the micro-grid.

Key Words : Micro-Grid, Micro-Source, Stability, Utility interface

## 1. 서 론

최근 에너지 문제에 대처하기 위해 신·재생에너 지를 이용한 소규모 분산 에너지원(Micro-Source

or Distributed Energy Resources : DER)들의 계통 도입이 활발해지고 있다. 다수의 소규모 분산 에너 지원들이 하나의 작은 Grid를 구성할 수 있으며, 이 들은 Micro-Grid의 범주에 포함될 수 있다. 이와 같 이 Micro-Grid는 모듈화된 소규모 분산 에너지원들 이 수요지에서 전력 및 잉여 열에너지를 생산하여 공급하는 새로운 개념의 소규모 전력시스템으로 utility-grid에 연계 혹은 분리되어 운전 가능한 전원

\* 주저자 : 동의대학교 전기공학과 부교수, 박사  
Tel : 051-890-1671, Fax : 051-890-1664

E-mail : kmson@deu.ac.kr  
접수일자 : 2007년 3월 23일  
1차심사 : 2007년 3월 28일  
심사완료 : 2007년 4월 19일

시스템이다[1-2].

[1-2]에서는 Micro-Grid에 관한 개념적인 설계부터 전력 품질 향상 효과 등의 중요한 초기 연구 결과를 제시하였다. 이들은 DTC(Direct Torque Control) 제어방식[3]을 채용하여 Micro-Source의 제어모델로 수립하였고, 이들의 연구결과는 [4]에서 하드웨어 결과로 검증되었다. [5]에서는 PCS와 기존 동기발전기의 병렬 운전을 상정하여 이들의 협조 제어방식을 제안하였다. [6]에서는 Micro-Source 모델을 공간벡터 PWM 방식을 채용한 모델과 60Hz의 전력주파수 영역 모델을 제시하였고, 이들을 비교하여 전력관련 동특성 해석에 있어 전력주파수 모델의 장점을 제시하였다.

본 논문에서는 유효 및 무효전력을 독립적으로 제어하는 Micro-Source의 일반적인 운전범위에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다. 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 기본파 성분을 토대로 한 전력주파수 영역 모델을 이용하여 Micro-Grid 동특성 모델의 선형화 시스템행렬을 구하고, 소신호 안정도 해석을 통하여 Micro-Source의 일반적인 운전범위에서 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다. 이를 통해 Micro-Grid 시스템의 안정도에 영향을 미치는 요소들을 판별하였다.

## 2. Micro-Grid 시스템

### 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 선로손실 및 왜란에 의한 영향을 줄일 수 있다[1-2]. Micro-Grid 시스템을 유효 및 무효전력의 관점에서

나타내면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1에서  $X_{\mu}$ 와  $E_{n+1}$ 은 각각 Micro-Grid 시스템에 대한 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스와 등가 전압원이다.  $X_{\mu}$ 는 utility-grid 측의 단락용량에 따라 결정되며 배전선로 길이가 길어지거나 연계된 변압기의 용량이 작으면 커지게 된다. 즉  $X_{\mu}$ 가 크다는 것은 utility-grid 측과의 연결 상태가 약하고, 단락 용량이 적음을 의미한다. 그림 1에서  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 은 각 Micro-Source의 계통연계 인덕터의 리액턴스이고,  $E_1, E_2, \dots, E_n$ 은 각 Micro-Source의 인버터 출력전압이다.

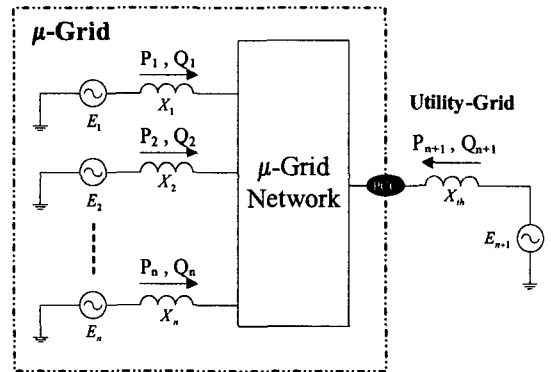


그림 1. Micro-Grid 시스템의 모델  
Fig. 1. Model of Micro-Grid system

### 2.2 Micro-Source 개요

Micro-Grid에 채택되는 Micro-Source는 소형 분산 에너지원의 한 형태로 유효전력 및 부하전압과 무효전력을 독립적으로 제어하여 수용가에게 최선의 전력품질(premium power quality) 제공을 목적으로 하고 있다. 따라서 Micro-Source는 전압원형 인버터를 기본 전력변환장치로서 채용하고 있다 [1-2].

그림 2에 Micro-Source의 제어 구조를 나타내었다. Micro-Source는 전압원으로 작동하므로 utility-grid에 연결되기 위해서는 그림 2에서  $X$ 로 표현된 연계용 인덕터가 필요하다[1, 3, 7]. Micro-Source가 효율적으로 유효 및 무효전력을 전

## 마이크로그리드 시스템의 안정도에 관한 기초 연구

력시스템에 공급하기 위해서는 인버터의 제어 범위와 각 변수의 한계를 함께 고려하여 전달 및 제어하고자 하는 유효 및 무효 전력의 범위에 따라 인덕터 용량이 결정되어야 한다[7].

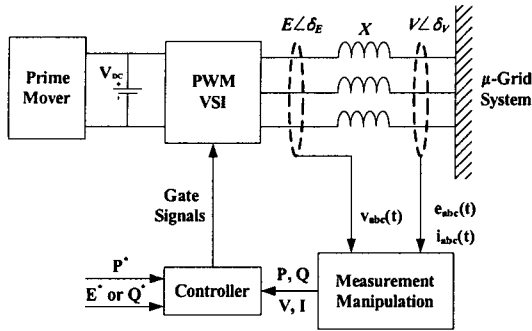


그림 2. Micro-Source의 구조  
Fig. 2. Schematic of Micro-Source

그림 2에서 Micro-Source 측 전압의 크기와 위상은 제어시스템의 PWM 제어를 통해 제어되며, 인버터측 전압  $E$ ,  $\delta_E$  및 계통측 전압  $V$ ,  $\delta_V$ 를 측정하여 유효·무효전력 및 전압을 제어하는 피드백 제어 시스템으로 구성되어 있으며 수 [ms]의 응답특성을 가진다. 마이크로터빈과 연료전지 등이 채용된 시스템에서는 순간적인 부하변화에 효과적으로 응답하고 전압을 유지하기 위해 통상 DC 링크가 배터리와 함께 연결된다.

### 3. Micro-Grid의 모델링

#### 3.1 Micro-Grid의 조류방정식

그림 1에서 Micro-Source가 2개인 경우 ( $n=2$ ), Micro-Grid 시스템의 단선도를 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3에서 Micro-Source의 유효 및 무효전력 조류 방정식은 식 (1)~(4)와 같다.

$$P_1 = \frac{E_1}{X_T} (X_{th} E_2 \sin \delta_{12} + X_2 E_3 \sin \delta_{13}) \quad (1)$$

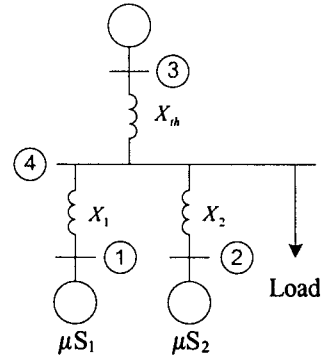


그림 3. 2개의 Micro-Source를 고려한 Micro-Grid 시스템의 단선도  
Fig. 3. One line diagram of Micro-Grid system considering dual Micro-Sources

$$P_2 = \frac{E_2}{X_T} (X_{th} E_1 \sin \delta_{21} + X_1 E_3 \sin \delta_{23}) \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{E_1}{X_T} [(X_2 + X_{th}) E_1 - X_{th} E_2 \cos \delta_{12} - X_2 E_3 \cos \delta_{13}] \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{E_2}{X_T} [-X_{th} E_1 \cos \delta_{21} + (X_1 + X_{th}) E_2 - X_1 E_3 \cos \delta_{23}] \quad (4)$$

여기서  $\delta_{nm} = \delta_n - \delta_m$  ( $n=1, 2, 3$ ,  $m=1, 2, 3$ ,  $n \neq m$ ),  $X_T = X_1 X_2 + X_1 X_{th} + X_2 X_{th}$ 이다.

#### 3.2 Micro-Source의 제어시스템 모델링

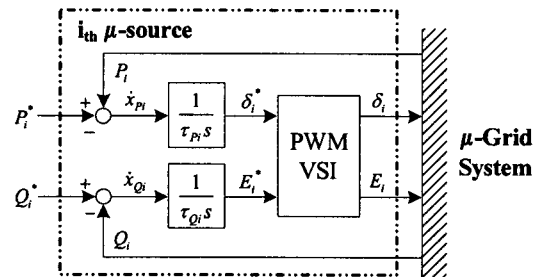


그림 4.  $i_{th}$  Micro-Source의 제어기  
Fig. 4. Controller of  $i_{th}$  Micro-Source

Micro-Source의 유효 및 무효전력 제어는 PI 제어를 통해 제어 가능하며, 해석을 간단히 하기 위해 적분기만 사용하는 것으로 가정하면 그림 4와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

그림 4에서 Micro-Source 인버터의 동특성 부분은 무시할 수 있다[6]. 그림 4에서  $i$ 번째 Micro-Source에 대한 적분제어의 상태방정식은 식 (5), (6)과 같은 관계를 가진다.

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

$$\dot{\bar{x}}_{Q_i} = Q_i^* - Q_i \quad (6)$$

여기서,  $i = 1, 2, \dots, n$ 이다.

식 (8), (9)에 선형화 기법을 적용하면 선형화된 상태방정식을 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\bar{x}}_{P_i} \\ \Delta \dot{\bar{x}}_{Q_i} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $i = 1, 2, \dots, n$ 이다.

### 3.3 Micro-Grid 시스템의 선형화 모델

Micro-Grid 내 2개의 Micro-Source가 존재하는 Micro-Grid 시스템의 경우 조류방정식은 식 (1)~(4)와 같고, 이를 다음 식 (8)을 이용하여 선형화하면 선형화된 조류방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial E_1} & \frac{\partial P_1}{\partial E_2} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial E_1} & \frac{\partial P_2}{\partial E_2} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial E_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial E_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial E_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} = \frac{E_1}{X_T} (X_{th} E_2 \cos \delta_{12} + X_2 E_3 \cos \delta_{13}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} = - \frac{E_1}{X_T} X_{th} E_2 \cos \delta_{12} \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial E_1} = \frac{1}{X_T} (X_{th} E_2 \sin \delta_{12} + X_2 E_3 \sin \delta_{13}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial E_2} = \frac{1}{X_T} X_{th} E_1 \sin \delta_{12} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} = - \frac{E_2}{X_T} X_{th} E_1 \cos \delta_{21} \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = \frac{E_2}{X_T} (X_{th} E_1 \cos \delta_{21} + X_1 E_3 \cos \delta_{23}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial E_1} = \frac{1}{X_T} X_{th} E_2 \sin \delta_{21} \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial E_2} = \frac{1}{X_T} (X_{th} E_1 \sin \delta_{21} + X_1 E_3 \sin \delta_{23}) \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} = \frac{E_1}{X_T} (X_{th} E_2 \sin \delta_{12} + X_2 E_3 \sin \delta_{13}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} = - \frac{E_1}{X_T} X_{th} E_2 \sin \delta_{12} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_1}{\partial E_1} = & \frac{1}{X_T} [2E_1(X_2 + X_{th}) - X_{th} E_2 \cos \delta_{12} \\ & - X_2 E_3 \cos \delta_{13}] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial E_2} = - \frac{1}{X_T} X_{th} E_1 \cos \delta_{12} \quad (20)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} = - \frac{E_2}{X_T} X_{th} E_1 \sin \delta_{21} \quad (21)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = \frac{E_2}{X_T} (X_{th} E_1 \sin \delta_{21} + X_1 E_3 \sin \delta_{23}) \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial E_1} = - \frac{1}{X_T} X_{th} E_2 \cos \delta_{21} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} = & \frac{1}{X_T} [-X_{th} E_1 \cos \delta_{21} + 2E_2(X_1 + X_{th}) \\ & - X_1 E_3 \cos \delta_{23}] \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $\Delta\delta_i$ 과  $\Delta E_i$ 은 각각  $\Delta\delta_i = \frac{1}{\tau_{P_i}} \Delta x_{P_i}$ ,

$\Delta E_i = \frac{1}{\tau_{Q_i}} \Delta x_{Q_i}$ 이고,  $i = 1, 2$ 이다.

제어시스템의 상태방정식인 식 (7)을 Micro-Source가 2대인 경우로 고려하면 4개의 상태변수,  $\Delta x_{P_1}$ ,  $\Delta x_{P_2}$ ,  $\Delta x_{Q_1}$ ,  $\Delta x_{Q_2}$ 에 대한 상태방정식으로 나타낼 수 있다. 4개의 상태변수로 구성된 상태방정식에 식 (8)~(24)를 대입하면, 식 (25)~(41)과 같은 Micro-Grid 시스템의 상태방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\Delta \mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} = -\frac{1}{X_T} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \quad (25)$$

$$a_{11} = E_1(X_{th}E_2\cos\delta_{12} + X_2E_3\cos\delta_{13})/\tau_{P_1} \quad (26)$$

$$a_{12} = -X_{th}E_1E_2\cos\delta_{12}/\tau_{P_2} \quad (27)$$

$$a_{13} = (X_{th}E_2\sin\delta_{12} + X_2E_3\sin\delta_{13})/\tau_{Q_1} \quad (28)$$

$$a_{14} = X_{th}E_1\sin\delta_{12}/\tau_{Q_2} \quad (29)$$

$$a_{21} = -X_{th}E_1E_2\cos\delta_{21}/\tau_{P_1} \quad (30)$$

$$a_{22} = E_2(X_{th}E_1\cos\delta_{21} + X_1E_3\cos\delta_{23})/\tau_{P_2} \quad (31)$$

$$a_{23} = X_{th}E_2\sin\delta_{21}/\tau_{Q_1} \quad (32)$$

$$a_{24} = (X_{th}E_1\sin\delta_{21} + X_1E_3\sin\delta_{23})/\tau_{Q_2} \quad (33)$$

$$a_{31} = E_1(X_{th}E_2\sin\delta_{12} + X_2E_3\sin\delta_{13})/\tau_{P_1} \quad (34)$$

$$a_{32} = -X_{th}E_1E_2\sin\delta_{12}/\tau_{P_2} \quad (35)$$

$$a_{33} = [2E_1(X_2 + X_{th}) - X_{th}E_2\cos\delta_{12} - X_2E_3\cos\delta_{13}]/\tau_{Q_1} \quad (36)$$

$$a_{34} = -X_{th}E_1\cos\delta_{12}/\tau_{Q_2} \quad (37)$$

$$a_{41} = -X_{th}E_1E_2\sin\delta_{21}/\tau_{P_1} \quad (38)$$

$$a_{42} = E_2(X_{th}E_1\sin\delta_{21} + X_1E_3\sin\delta_{23})/\tau_{P_2} \quad (39)$$

$$a_{43} = -X_{th}E_2\cos\delta_{21}/\tau_{Q_1} \quad (40)$$

$$a_{44} = [-X_{th}E_1\cos\delta_{21} + 2E_2(X_1 + X_{th}) - X_1E_3\cos\delta_{23}]/\tau_{Q_2} \quad (41)$$

여기서  $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_{P_1} \Delta x_{P_2} \Delta x_{Q_1} \Delta x_{Q_2}]^T$ 이다.

## 4. 사례연구

### 4.1 샘플 Micro-Grid 시스템

Micro-Grid 시스템은 다수의 Micro-Source로 구성되며, 이들은 유효 및 무효전력 제어를 위해 전압의 크기 및 위상을 제어한다.

표 1. 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터  
Table 1. Parameter of sample Micro-Grid system

utility grid	$E_{n+1}$ [p.u.]	1
	$\delta_{n+1}$ [°]	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

통상 전압의 크기는  $E_i = 0.9\sim 1.1$ [p.u.], 전압의 위상은  $\delta_i = 0\sim 30$ [°]정도의 범위에 존재하게 된다. Micro-Source가  $P_i = 1\sim 3$ [p.u.] 정도를 부하 및 utility-grid 측으로 공급하기 위해서는 계통 연계 인덕터의 리액턴스가  $X_i = 0.2$ [p.u.] 정도 필요하다[6, 7]. 이때 utility-grid 측을 slack 모션으로 가정하면  $E_{n+1} = 1$ [p.u.],  $\delta_{n+1} = 0$ [°]가 된다. Micro-Grid와 utility-grid 사이에 존재하며 전기적 거리에 따라 달라질 수 있는 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스는  $X_{th} = 0.2\sim 2.0$ [p.u.]로 한다. 해석을 간단히 하기 위해 Micro-Grid 시스템의 상태

방정식 시스템행렬에서 적분제어기 이득을  $\tau = \tau_{P1} = \tau_{P2} = \tau_{Q1} = \tau_{Q2} = 0.1[s]$ 로 가정한다. 이러한 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터를 요약하면 표 1과 같다.

### 4.2 $E_1, E_2$ 에 따른 우세근의 궤적

표 1과 같은 운전조건에서 상태방정식의 시스템행렬인 식 (25)~(41)을 이용하여 각 Micro-Source의 출력전압 크기  $E_1, E_2$ 에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세근을 나타내면 그림 5와 같다.

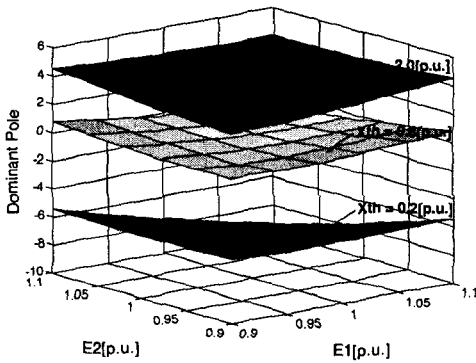


그림 5.  $E_1, E_2$ 에 따른 우세근의 궤적  
Fig. 5. Loci of dominant pole by  $E_1, E_2$

그림 5의 결과에서는  $X_{th}$ 가 적은 경우 ( $X_{th} = 0.2$ ), 전압의 운전범위에 따라 우세근의 위치 변화가 크고 전압의 모든 운전범위에서 안정하다.  $X_{th}$ 가 큰 경우 ( $X_{th} = 2.0$ ), 전압 운전범위에 따른 우세근의 위치 변화가 매우 적으며 모든 운전범위에서 불안정하다. 이로부터 전압의 운전범위는 우세근의 위치에 많은 영향을 미치지 못하고  $X_{th}$ 에 따라 우세근의 위치가 결정됨을 알 수 있으며,  $X_{th}$ 가 커질수록 Micro-Grid 시스템은 불안정해진다.

### 4.3 $\delta_1, \delta_2$ 에 따른 우세근의 궤적

각 Micro-Source의 출력전압 위상  $\delta_1, \delta_2$ 에 따

른 Micro-Grid 시스템의 우세근은 그림 6과 같다. 이 경우 각 Micro-Source 전압의 크기 및 위상, 계통연계 인덕터는 표 1과 같다.

그림 6의 결과에서  $X_{th}$ 가 커질수록,  $\delta_1, \delta_2$ 의 차가 커질수록 불안정해지는 경향을 보인다. 즉 Micro-Grid 시스템 내 Micro-Source가 2대 존재하는 경우 2대의 Micro-Source는 서로 비슷한 크기의 유효전력을 주입하여야 안정한 운전을 할 수 있음을 의미한다.

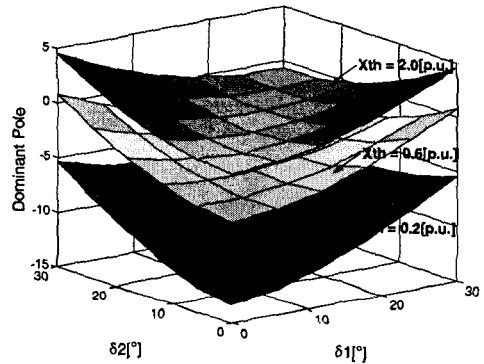


그림 6.  $\delta_1, \delta_2$ 에 따른 우세근의 궤적  
Fig. 6. Loci of dominant pole by  $\delta_1, \delta_2$

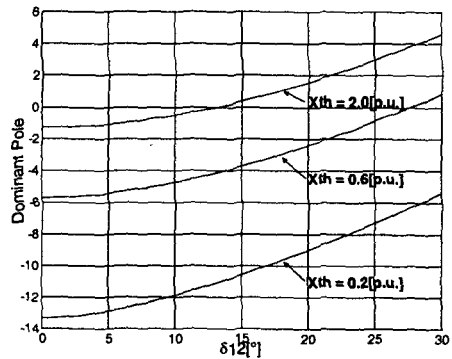


그림 7.  $\delta_{12}(= \delta_1 - \delta_2)$ 에 따른 우세근의 궤적  
Fig. 7. Loci of dominant pole by  $\delta_{12}(= \delta_1 - \delta_2)$

그림 7은 그림 6의 결과에서 2개의 Micro-Source 간의 위상차에 대한 안정도를 명확히 하기 위해 나타낸 것으로, Micro-Grid 내 2번 Micro-Source 출력전압의 위상 운전조건을  $0^\circ$ 로 하여  $\delta_{12}$

## 마이크로그리드 시스템의 안정도에 관한 기초 연구

( $=\delta_1 - \delta_2$ )에 대한 우세근의 궤적을 나타낸 것이다. 나머지 운전범위는 표 1과 동일하다.

그림 7에서  $X_{th} = 2.0$ 일 경우,  $\delta_{12} < 13[^\circ]$  범위에서 안정하고,  $X_{th} = 0.6$ 일 경우,  $\delta_{12} < 27.5[^\circ]$  범위에서 안정하고,  $X_{th} = 0.2$ 일 경우, 즉  $X_i = X_{th}$ 인 경우 모든 범위에서 안정하다. 이와 같은 결과로부터, Micro-Grid 시스템의 안전한 운전을 위해서는  $X_{th}$ 와 각 Micro-Source들의 주입 유효 전력 차이가 고려되어야 함을 알 수 있다. 이는 Micro-Grid와 utility-grid의 전기적 거리가 가까워야 Micro-Grid 내 Micro-Source들의 운전범위가 자유로워질 수 있음을 의미한다.

### 4.4 $X_i, X_{th}$ 에 따른 우세근의 궤적

각 Micro-Source의 운전 조건이 표 1과 같고, 계통연계 인덕터  $X_i$ 가 0.1[p.u.], 0.2[p.u.], 0.5[p.u.] 일 경우  $X_{th}$ 에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세근은 그림 8과 같다. 이때  $X_{th}$ 의 범위는 0.1~2.0[p.u.]이다.

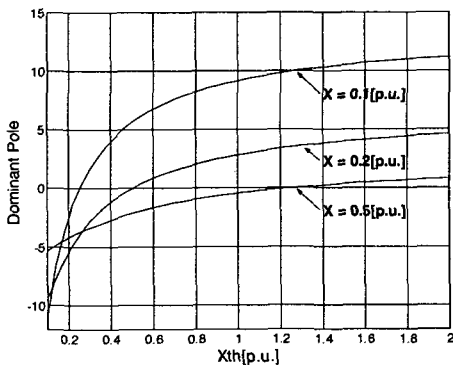


그림 8.  $X_{th}$ 에 따른 우세근의 궤적  
Fig. 8. Loci of dominant pole by  $X_{th}$

그림 8은 Micro-Grid 시스템의 안정도가 절대적인  $X_{th}$ 에 따라 결정되지 않고,  $X_i$ 에 대해 상대적인  $X_{th}$ 에 따라 결정됨을 나타낸다. 이는  $X_{th}$ 에 대해 Micro-Grid 시스템이 안정할 수 있는  $X_i$ 를 결정

할 수 있음을 의미한다.

그림 9는  $X_{th}$ 가 0.2[p.u.], 0.5[p.u.], 2.0[p.u.] 일 경우  $X_i$ 에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세근을 나타낸 것이며, 이때  $X_i$ 의 범위는 0.05~0.5[p.u.]이다. 그림 9에 의하면  $X_{th}$ 가 0.2[p.u.]인 경우 안정하기 위한  $X_i$ 의 범위는 0.08[p.u.] 이상이어야 하고,  $X_{th}$ 가 0.5[p.u.]인 경우 안정하기 위한  $X_i$ 의 범위는 0.2[p.u.] 이상이어야 한다.  $X_{th}$ 가 2.0[p.u.]인 경우, 안정한  $X_i$ 의 범위가 그래프 내에 존재하지 않으며 이 경우 안정한  $X_i$ 의 범위는 0.8[p.u.] 정도가 된다.

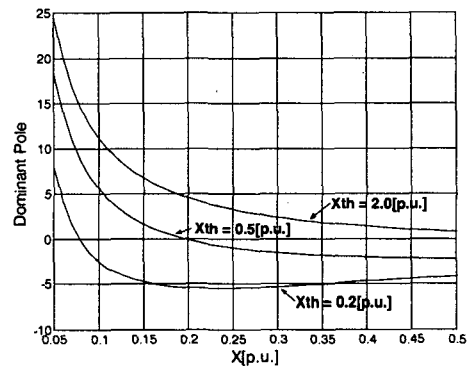


그림 9.  $X_i$ 에 따른 우세근의 궤적  
Fig. 9. Loci of dominant pole by  $X_i$

통상  $X_i$ 는 Micro-Source가 전달하고자 하는 유효 및 무효전력의 크기에 따라 결정되지만, 그림 9와 같은 안정도 여부가 고려되어  $X_i$ 가 결정되어야 한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 2개의 Micro-Source로 구성된 샘플 Micro-Grid 시스템을 상정하고 이의 안정도에 관하여 연구하였다. 유효 및 무효전력을 독립적으로 제어하는 전력주파수 영역의 Micro-Source 모델을 이용하여 Micro-Grid 시스템의 동특성을 모델링하였다.

안정도 해석 결과, 안정도에 미치는 요소들이 다 음과 같음을 얻을 수 있었고, 안정한 운전을 위해 중요한 파라미터의 조건을 제시하였다.

- Micro-Source의 운전범위
- utility-grid와의 연결상태
- 계통연계 인덕터

본 논문은 동의대학교 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 : 2006AA137)

## References

- [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] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-29, pp. 136-143, Jan./Feb. 1993.
- [4] Y. W. Li, D. M. Vithagamuwa, P. C. Loh, "Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for Multibus Microgrid System", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No.5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.
- [5] S. Kusagawa, J. Baba, M. Ohshima, E. Masada, "Supply power quality of a micro grid based on distributed generations in relation with power converter control", Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, Page(s):10 pp., 11-14 Sept. 2005.
- [6] 손광명, 이계병, 홍준희, "PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발", 대한전기학회 논문지, 56권, 3호, pp. 457-464, 2007년 3월.
- [7] 손광명, 김영섭, "Micro-Source의 계통 연계용 인덕터 크기 선정에 관한연구", 한국조명전기설비학회 논문지, 19집, 6호, pp. 52-58, 2005년 9월.

## ◆ 저자소개 ◆

### 손광명 (孫光明)

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

### 이계병 (李桂乘)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대 공대 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.