

Micro-Source의 운전 범위에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도에 관한 연구

論 文
56-5-4

A Study on the Stability of Micro-Grid System Considering Operating Range of Micro-Sources

孫光明* · 李桂秉*
(Kwang M. Son · Kye B. Lee)

Abstract - This paper deals with the micro-grid consisting of micro-sources which adopt voltage sourced inverters 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. 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 and the stable operating range of the micro-sources.

Key Words : Micro-Grid, Micro-Source, Small signal stability

1. 서 론

Micro-Grid는 소규모 분산 에너지원(Micro-Sources or Distributed Energy Resources : DER)들이 수요지에서 하나의 작은 Grid를 구성하여 전력 및 잉여 열에너지를 생산하여 수요자에게 직접 공급하는 새로운 개념의 소규모 전력시스템으로서 utility-grid에 연계 혹은 분리되어 운전 가능한 시스템이다[1-5].

Micro-Grid를 구성하는 전력원은 기존의 교류 발전기 이외에도 태양광, 연료전지, 마이크로터빈 등이 있으며 이들은 출력이 DC 혹은 고주파 교류이므로 계통 연계를 위해 인버터의 채용이 불가피하고, 전력전자 소자의 빠른 응답특성과 함께 기계적 관성이 거의 없어 빠른 출력변화를 보이는 특성이 있다. 이로 인해 인버터를 채용한 분산전원으로 구성된 Micro-Grid는 기존의 전력시스템과는 다른 동특성을 보일 것으로 예상된다.

본 논문에서는 여러 가지 형태의 전력원 중 Micro-Grid를 구성하는 Micro-Source로서 무효전력 및 유효전력을 독립적으로 제어가능하며, 전압제어 등 전력품질들을 유지할 수 있는 전압원형 인버터를 채용한 시스템이 앞으로 많이 도입될 것으로 예상되어 이들의 동특성에 관하여 연구하였다.

현재 다수의 연구방향은 Micro-Source들이 전압원 인버터를 채용하면서도 계통연계 운전시 전류제어를 통하여 계통과의 간섭을 최소화하면서 안정된 Micro-Grid의 운전을 추구하고 있다. 반면, WEMPEC 그룹 등은 전압제어를 통하여 전력품질 등의 제어를 동시에 추구하고 있다[1,2]. 전압제

어 방식은 계통연계 및 독립운전에서 동일한 제어방식이 적용될 수 있어 계통연계와 독립운전 간의 전환이 보다 원활하다.

최근의 연구동향을 보면, 계통과의 연계가 약한 weak 시스템인 경우 인버터의 운전에 관한 연구가 있으며[6], 인버터 제어시스템을 상세하게 모델링한 상태에서 독립운전시 유효 및 무효전력 분담에 관련된 동특성이 해석된 바 있다[7]. 본 논문은 계통연계 운전 상태에 있는 Micro-Grid 시스템의 전력주파수 영역에서의 소신호 안정도 해석을 위한 Micro-Grid 모델링 및 동특성 해석에 대한 연구를 하였다. 계통과의 연계가 아주 약한 상태에서의 전압원 인버터의 계통연계에 필요한 LCL 필터의 공진 등의 현상[6]을 제외하면 인버터의 동특성이 계통의 동특성에 비해 훨씬 빨라서 안정도 해석에 별다른 영향을 주지 않게 되므로 이의 모델링은 최대한 간략화 하였다.

따라서, Micro-Grid가 3상평형 상태를 유지하며, 계통과의 공진현상이 없는 상태에서는 본 논문에서 제안한 모델링 및 해석 방법이 별 문제없이 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 기존의 전력시스템의 소신호 안정도 해석은 발전기의 기계적 관성과 계통과의 상호작용에 기인한다는 점에서 Micro-Grid의 동특성 해석과는 다른 문제로 볼 수 있다.

본 논문에서는 Micro-Grid 동특성 모델의 선형화 시스템 행렬을 구하고 소신호 안정도 해석을 통하여 Micro-Source의 일반적인 운전범위에서 Micro-Grid 시스템의 안정도를 해석하였다. Micro-Grid 시스템의 안정도에 영향을 미치는 요소들을 판별하였고, 안정도에 영향을 미치는 요소들이 utility-grid와의 연결 상태, Micro-Source의 계통연계용 인버터, Micro-Source들의 운전범위임을 보였다. 다수의 Micro-Source로 구성된 Micro-Grid 시스템은 단일 분산전원이 계통에 연계되었을 경우와 다른 특성을 보임을 확인하였다.

* 교신저자, 正會員 : 東義大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
E-mail : kmson@deu.ac.kr

* 學生會員 : 東義大 工大 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2007年 1月 29日
最終完了 : 2007年 4月 2日

2. Micro-Grid의 모델링

2.1 Micro-Grid Network 모델링

n 개의 Micro-Source가 존재하는 Micro-Grid 시스템은 그림 1과 같다.

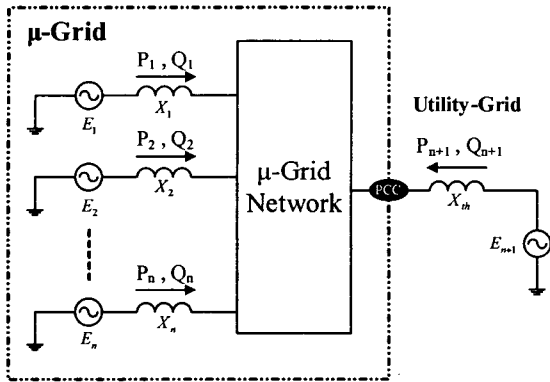


그림 1 Micro-Grid 시스템의 모델
Fig. 1 Model of Micro-Grid system

그림 1에서 X_{th} 와 E_{n+1} 는 각각 Micro-Grid 시스템에 대한 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스와 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 리액턴스이다. 그림 1에서 E_1, E_2, \dots, E_n 은 각 Micro-Source의 인버터 출력전압이다.

그림 1에서 i 번째 Micro-Source의 유효 및 무효전력 조류 방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (2)$$

Micro-Grid 내 부하를 임피던스 부하로 가정하면, 부하 모델은 버스 어드미턴스 행렬에서 고려될 수 있고 이는 축약된 버스 어드미턴스 행렬로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Y_R = Y_{11} - Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{21} \quad (3)$$

2.2 Micro-Source의 제어시스템 모델링

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

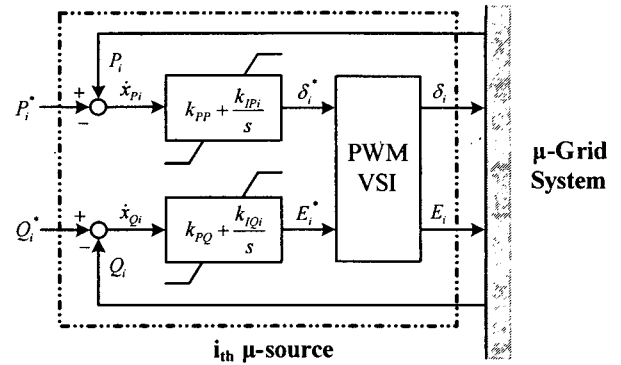


그림 2 Micro-Source의 제어기
Fig. 2 Controller of Micro-Source

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 2의 PI 제어기 상태방정식은 식 (4), (5)와 같은 관계를 가지며, 제어기의 출력은 식 (6), (7)과 같다.

$$\dot{x}_{P_i} = P_i^* - P_i \quad (4)$$

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

$$\dot{\delta}_i = k_{IP_i} x_{P_i} + k_{PP_i} (P_i^* - P_i) \quad (6)$$

$$\dot{E}_i^* = k_{IQ_i} x_{Q_i} + k_{PQ_i} (Q_i^* - Q_i) \quad (7)$$

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 는 각각 i 번째 Micro-Source의 유효전력 지령치와 측정치, Q_i^* , Q_i 는 각각 i 번째 Micro-Source의 무효전력 지령치와 측정치이다.

2.3 Micro-Grid 시스템의 선형화 모델

인버터의 동특성 부분을 무시하므로 $\delta_i = \delta_i^*$, $E_i = E_i^*$ 가 되고 PI 제어기 출력 식 (6), (7)을 벡터로 나타내면 식 (8)과 같으며, 이를 선형화하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{E} \end{bmatrix} = K_I \begin{bmatrix} x_P \\ x_Q \end{bmatrix} + K_P \begin{bmatrix} P^* - P \\ Q^* - Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \delta &= [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n]^T, \ E = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n]^T, \\ P &= [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T, \ Q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_n]^T, \\ x_P &= [x_{P1} \ x_{P2} \ \dots \ x_{Pn}]^T, \ x_Q = [x_{Q1} \ x_{Q2} \ \dots \ x_{Qn}]^T, \\ K_I &= \begin{bmatrix} \text{diag}(k_{IP_i}) & 0 \\ 0 & \text{diag}(k_{IQ_i}) \end{bmatrix}, \ K_P = \begin{bmatrix} \text{diag}(k_{PP_i}) & 0 \\ 0 & \text{diag}(k_{PQ_i}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} = K_I \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta x_Q \end{bmatrix} - K_P \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

전력조류 방정식의 선형화는 식 (10)과 같이 잘 알려진 Jacobian 행렬로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (10)$$

Jacobian 행렬의 관계를 이용하기 위해서 식 (10)을 식 (9)에 대입하고, $\Delta\delta$, ΔE 로 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} = [I + K_P J]^{-1} K_I \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta x_Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (9)에서와 같이 PI 제어기의 상태방정식인 식 (4), (5)를 선형화 하면 식 (12)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta x_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

Jacobian 행렬로 표현되는 식 (10)을 식 (12)에 대입하면 식 (13)을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta x_Q \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)에 식 (11)을 대입하여 정리하면 식 (14)를 유도할 수 있다. 여기서, $\Delta x = [\Delta x_p \ \Delta x_Q]^T$ 이다.

$$\Delta \dot{x} = -J[I + K_P J]^{-1} K_I \Delta x = A \Delta x \quad (14)$$

$$A = -J[I + K_P J]^{-1} K_I \quad (15)$$

3. 사례 연구

3.1 샘플 Micro-Grid 시스템

그림 3은 샘플 Micro-Grid 시스템이다. 통상 전압의 크기는 $E_i = 0.9 \sim 1.1$ [p.u.] , 전압의 위상은 $\delta_i = 0 \sim 30^\circ$ 정도의 범위로 가정한다. 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[8,9]. utility-grid 측의 전압은 $1 \angle 0^\circ$ 로 가정하고, $X_{th} = 0.2 \sim 2.0$ [p.u.] 로 한다. 본 사례연구에서는 Micro-Source가 1개 또는 2개인 Micro-Grid를 상정하여 연구한다. 본 사례연구에서는 해석을 간단히 하기 위해 Micro-Source의 비례제어 이득을 0 으로 설정하고 적분제어 이득을 $k_{i1,2} = k_{ip1} = k_{ip2} = k_{iq1} = k_{iq2} = 10$ 으로 가정한다. 이러한 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터를 요약하면 표 1과 같다.

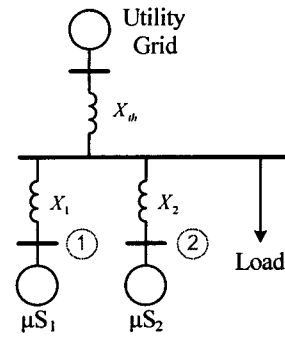


그림 3 샘플 Micro-Grid 시스템의 단선도
Fig. 3 One line diagram of the sample Micro-Grid system

표 1 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터

Table 1 Parameter of sample Micro-Grid system

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
	$k_{p1,2}$	0
	$k_{i1,2}$	10
load	Z_L [p.u.]	0 ~ 5
	P.F.	0.9 ~ 1.0

3.2 부하의 크기 및 역율에 따른 안정도

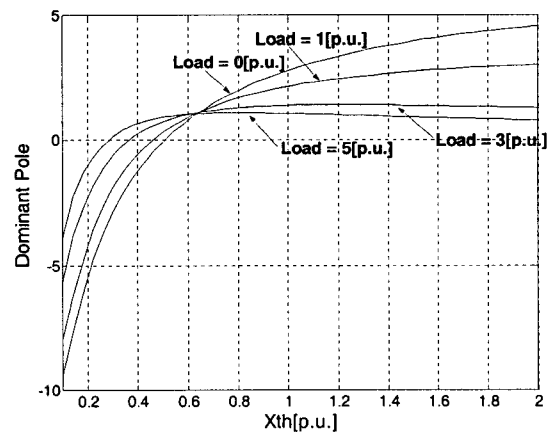


그림 4 2개의 Micro-Source일 때 부하에 따른 우세극의 궤적
Fig. 4 Loci of dominant pole by load in case of dual micro-source

Micro-Grid 내 2개의 Micro-Source가 존재하는 경우로, 표 1과 같은 운전범위에서 Micro-Grid 내 임피던스 부하를 고려한 Micro-Grid 시스템의 상태방정식 (A6)~(A22)를 이용하여 $X_{th} = 0.1 \sim 2$ [p.u.] 에 대한 Micro-Grid 시스템의 우세극을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서 부하의 역율은 0.95 이다.

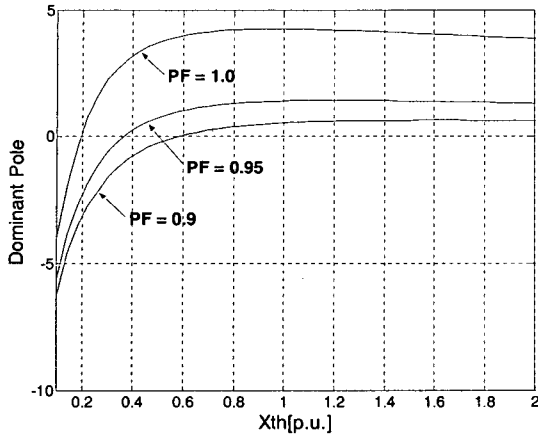


그림 5 2개의 Micro-Source일 때 부하의 역율에 따른 우세극의 궤적
 Fig. 5 Loci of dominant pole by power factor of load in case of dual micro-source

그림 5는 부하가 3[p.u.], 부하의 역율이 0.9, 0.95, 1.0 일 경우 $X_{th} = 0.1 \sim 2$ [p.u.] 에 대한 Micro-Grid 시스템의 우세극을 나타낸 것이다.

그림 4, 5에서와 같은 방법으로 1대의 Micro-Source 를 고려한 Micro-Grid 시스템의 상태방정식 (A1)~(A5)를 이용하여 얻은 결과와 그림 4, 5의 결과로부터, 표 1과 같은 Micro-Source의 운전범위에서 Micro-Grid 내 Micro-Source의 수와 임피던스 부하의 크기 및 역율에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정한 X_{th} 의 범위를 나타내면 표 2와 같다.

표 2 안정한 X_{th} 의 범위

Table 2 Stable ranges of X_{th}

부하의 크기 및 역율	1개의 micro-source	2개의 micro-source
무부하	모두 안정	$X_{th} < 0.5$ [p.u.]
$S_L = 1$ [p.u.], PF = 0.95	$X_{th} < 1.52$ [p.u.]	$X_{th} < 0.46$ [p.u.]
$S_L = 3$ [p.u.], PF = 0.95	$X_{th} < 0.5$ [p.u.]	$X_{th} < 0.36$ [p.u.]
$S_L = 5$ [p.u.], PF = 0.95	$X_{th} < 0.3$ [p.u.]	$X_{th} < 0.28$ [p.u.]
$S_L = 3$ [p.u.], PF = 0.90	$X_{th} < 1.42$ [p.u.]	$X_{th} < 0.58$ [p.u.]
$S_L = 3$ [p.u.], PF = 1.0	$X_{th} < 0.21$ [p.u.]	$X_{th} < 0.19$ [p.u.]

표 2에서와 같이 Micro-Grid 내 Micro-Source 가 2대인 경우 1대의 경우보다 Micro-Grid 시스템의 안정도는 더 나 빠지고, 이것은 통상의 분산전원과는 다른 새로운 문제점을 제시한다. 즉, utility-grid와 어느 정도 거리를 가지고, 다수의 Micro-Source가 Micro-Grid를 구성하는 경우 운전조건에 따라 Micro-Grid 시스템이 불안정해질 수 있음을 의미한다. 이하 모든 사례연구는 2대의 Micro-Source가 Micro-Grid를 구성하는 경우에 해당된다.

3.3 δ_1, δ_2 에 따른 안정도

2개의 Micro-Source가 Micro-Grid 시스템을 구성하는 경우 각 Micro-Source의 출력전압 위상차 $\delta_{12} (= \delta_1 - \delta_2)$ 에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세극은 그림 6과 같다. 이 경우 각 Micro-Source의 운전범위는 표 1과 같고, Micro-Grid 내 임피던스 부하는 무부하이다.

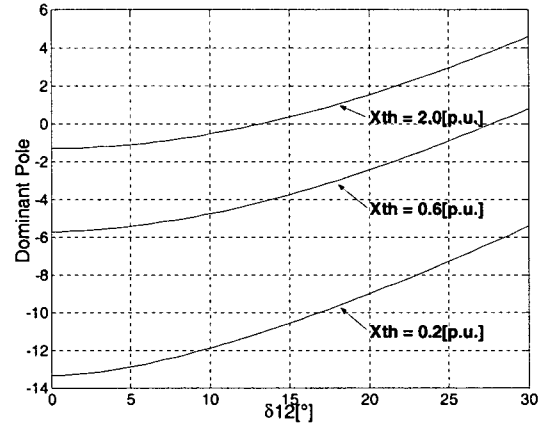


그림 6 무부하일 때 $\delta_{12} (= \delta_1 - \delta_2)$ 에 따른 우세극의 궤적
 Fig. 6 Loci of dominant pole by $\delta_{12} (= \delta_1 - \delta_2)$ in case of no load

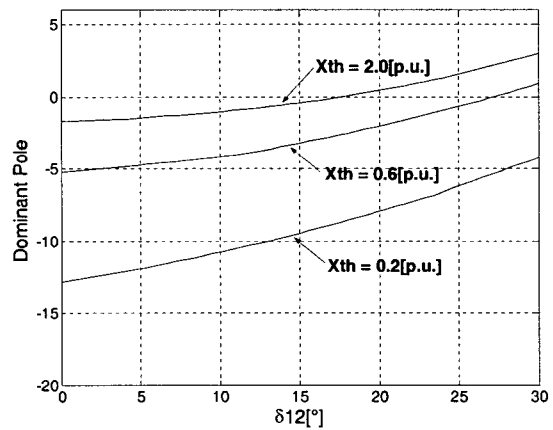


그림 7 1[p.u.] 부하일 때 $\delta_{12} (= \delta_1 - \delta_2)$ 에 따른 우세극의 궤적
 Fig. 7 Loci of dominant pole by $\delta_{12} (= \delta_1 - \delta_2)$ in case of 1[p.u.] load

그림 6에서 $X_{th} = 2.0$ 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 $X = X_{th}$ 인 경우 모든 범위에서 안정하다. 그림 6의 결과에서 X_{th} 가 커질수록, δ_1, δ_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 7, 8은 각각 부하를 1[p.u.], 3[p.u.], 역율을 0.95 로 한 경우 Micro-Source 간의 위상차에 대한 Micro-Grid 시스템 우세근을 나타낸 것이다. 부하를 고려한 경우에서도 무부하인 경우와 유사한 특성을 보이며, 부하와 X_{th} 가 커짐에 따라 전압위상의 운전범위는 우세근의 위치에 많은 영향을 미치지 못한다. $X_{th} = 2.0$ 의 경우 부하가 커지게 되면, Micro-Source 간의 위상차에 대한 안정한 범위가 더 넓어졌지만 $X_{th} = 0.6$ 의 경우는 부하가 커지게 되면, Micro-Source 간의 위상차에 대한 안정한 범위가 더 좁아지는 경향을 보인다.

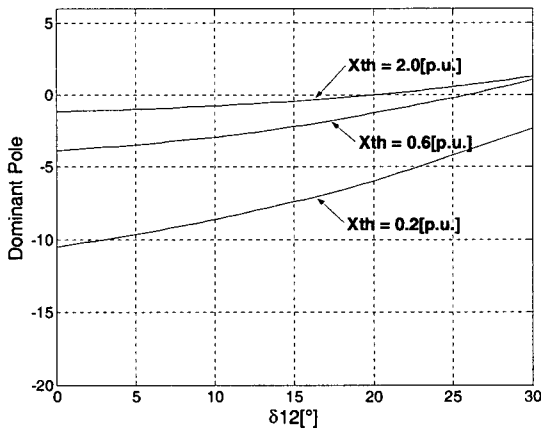


그림 8 3[p.u.] 부하일 때 $\delta_{12}(=\delta_1 - \delta_2)$ 에 따른 우세근의 궤적
Fig. 8 Loci of dominant pole by $\delta_{12}(=\delta_1 - \delta_2)$ in case of 3[p.u.] load

3.4 X_i , X_{th} 에 따른 안정도

지금까지의 결과에서 Micro-Grid 내 다수의 Micro-Source가 존재하는 경우에는 무부하인 경우와 Micro-Grid 내 임피던스 부하를 고려한 경우를 비교했을 때 유사한 결과를 가지며 Micro-Grid 시스템의 안정도는 부하의 유무보다는 오히려 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스 X_{th} 와 Micro-Grid 내 Micro-Source 간 출력 전압위상차 δ_{12} 에 더 많은 영향을 받는다. 따라서 Micro-Grid 시스템이 안정하기 위한 계통연계 인덕터의 리액턴스 X_i 와 utility-grid 측 테브난 등가 리액턴스 X_{th} 를 논의할 때에는 부하가 없는 것으로 하여 해석의 복잡도를 낮추기로 한다.

그림 9는 각 Micro-Source의 운전범위가 표 1과 같고 X_1, X_2 가 0.1[p.u.], 0.2[p.u.], 0.5[p.u.] 일 경우 X_{th} 에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세근을 나타낸 것이다. 이때 X_{th} 의 범위는 0.1~2.0[p.u.]이다.

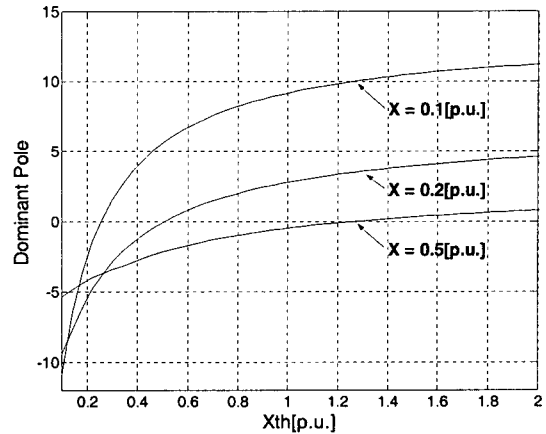


그림 9 X_{th} 에 따른 우세근의 궤적
Fig. 9 Loci of dominant pole by X_{th}

그림 9에서 X_i 의 크기가 증가함에 따라 불안정해지는 X_{th} 크기도 증가함을 알 수 있다. 이로부터 Micro-Grid 시스템의 안정도는 절대적인 X_{th} 크기에 따라 결정되지 않고, X_i 의 크기에 대해 상대적인 X_{th} 크기에 더 관련됨을 알 수 있다. 그림 9에서 부하를 고려할 경우 부하의 크기 및 역율에 따라 그림 4, 5와 같은 추이를 보이게 된다.

또한, 그림 9의 결과는 반대로 X_{th} 크기에 대한 Micro-Grid 시스템이 안정할 수 있는 X_i 의 크기를 결정할 수 있음을 의미한다. 즉, X_{th} 크기에 따른 X_i 의 크기를 결정할 수 있다. 그림 10은 X_{th} 가 0.2[p.u.], 0.5[p.u.], 2.0[p.u.] 일 경우 X_i 의 크기에 따른 Micro-Grid 시스템의 우세근을 나타낸 것이며, 이때 X_i 의 범위는 0.05~0.5[p.u.]이다.

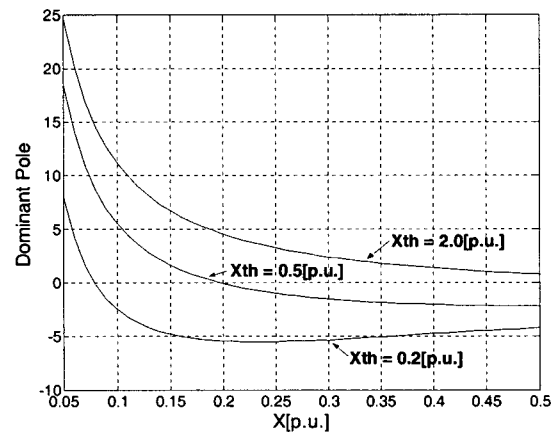


그림 10 X_i 에 따른 우세근의 궤적
Fig. 10 Loci of dominant pole by X_i

그림 10에 의하면 X_{th} 크기가 증가함에 따라 안정하기 위한 X_i 의 크기가 증가함을 알 수 있다. 통상 X_i 의 크기는 Micro-Source가 전달하고자 하는 유효 및 무효전력의 크기에 따라 결정되지만, 그림 10과 같은 안정도 여부가 고려되어 X_i 의 크기가 결정되어야 한다.

그림 9, 10은 Micro-Grid 시스템의 안정도가 절대적인 X_{th} 와 X_i 의 크기에 따라 결정되지 않는다는 것을 알려준다. 따라서 X_{th}/X_i 에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도라는 의미 있는 결과가 될 것이다. 그림 11은 이에 따른 안정도를 나타낸 것이다.

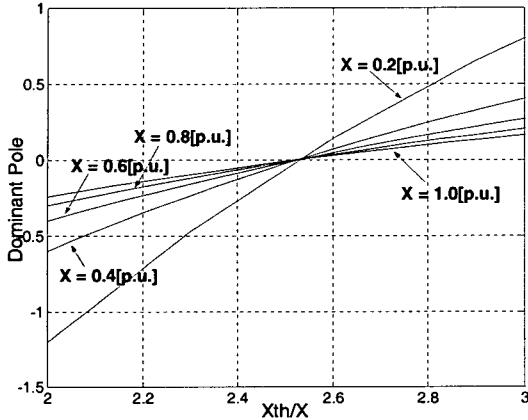


그림 11 X_{th}/X_i 에 따른 우세극의 궤적
Fig. 11 Loci of dominant pole by X_{th}/X_i

그림 11에서 X_i 의 크기는 각각 좌측 아래에서부터 0.2[p.u.], 0.4[p.u.], 0.6[p.u.], 0.8[p.u.], 1.0[p.u.]이다. 모든 X_i 에 대해서 X_{th}/X_i 에 따른 안정한 범위는 $X_{th}/X_i < 2.52$ 로 나타났다. 이것은 Micro-Grid 내 2개의 Micro-Source가 존재하고, 그 운전범위가 표 1과 같을 때 utility-grid 측의 테브난 등가 리액턴스에 대한 계통연계 인덕터의 리액턴스 비가 대략 2.52보다 적을 때 Micro-Grid 시스템은 안정할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 11에서 부하를 고려한 경우 부하의 크기 및 역률에 따라 그림 4, 5와 같은 추이를 보이게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 소형 분산 에너지원인 Micro-Source가 Micro-Grid 시스템을 형성할 때 Micro-Grid 내 Micro-Source들의 운전에 따른 Micro-Grid 시스템의 안정도에 관하여 연구하였다. Micro-Source로 구성된 Micro-Grid 시스템의 동특성을 모델링하였고, 이는 상태방정식으로 표현되었으며, 선형화를 통하여 시스템행렬을 구하였다.

1개의 Micro-Source가 존재하는 경우에 비해 2개의 Micro-Source가 존재하는 경우 시스템의 구성과 운전범위에 따라 Micro-Grid 시스템이 더 불안정해질 수 있음을 정량적으로 비교하였다. Micro-Grid 시스템의 안정한 운전을 위해서 중요한 파라미터를 식별하고 이들의 안정도를 위한 조건을 제시하였다.

본 논문의 결과는 Micro-Grid의 계획 단계에서 네트워크 구성 및 제어시스템 파라미터를 설정하고 Micro-Grid 운전 시 Micro-Source의 운전범위를 결정하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

부 록

1. 1 개의 Micro-Source를 고려한 경우 시스템 행렬

$$A = -\frac{1}{(G_L^2 + B_{T1}^2)} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$a_{11} = -k_{IP1} E_1 E_2 B_1 B_{th} (G_L \sin \delta_{12} + B_{T1} \cos \delta_{12}) \quad (A2)$$

$$a_{12} = k_{IQ1} B_1 [2E_1 G_L B_1 + E_2 B_{th} (G_L \cos \delta_{12} - B_{T1} \sin \delta_{12})] \quad (A3)$$

$$a_{21} = k_{IP1} E_1 E_2 B_1 B_{th} (G_L \cos \delta_{12} - B_{T1} \sin \delta_{12}) \quad (A4)$$

$$a_{22} = k_{IQ1} B_1 [-2E_1 (G_L^2 + B_{T1}^2 - B_1 B_{T1}) + E_2 B_{th} (G_L \sin \delta_{12} + B_{T1} \cos \delta_{12})] \quad (A5)$$

여기서, $\Delta x = [\Delta x_P \ \Delta x_Q]^T$, $B_1 = -1/X_1$, $B_{th} = -1/X_{th}$, $G_L + jB_L$ 은 부하의 어드미턴스이고, $B_{T1} = B_1 + B_{th} + B_L$ 이다.

2. 2 개의 Micro-Source를 고려한 경우 시스템 행렬

$$A = -\frac{1}{(G_L^2 + B_{T2}^2)} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (A6)$$

$$a_{11} = -k_{IP1} E_1 B_1 [E_2 B_2 (G_L \sin \delta_{12} + B_{T2} \cos \delta_{12}) + E_3 B_{th} (G_L \sin \delta_{13} + B_{T2} \cos \delta_{13})] \quad (A7)$$

$$a_{12} = k_{IP2} E_1 E_2 B_1 B_2 (G_L \sin \delta_{12} + B_{T2} \cos \delta_{12}) \quad (A8)$$

$$a_{13} = k_{IQ1} B_1 [2E_1 G_L B_1 + E_2 B_2 (G_L \cos \delta_{12} - B_{T2} \sin \delta_{12}) + E_3 B_{th} (G_L \cos \delta_{13} - B_{T2} \sin \delta_{13})] \quad (A9)$$

$$a_{14} = k_{IQ2} E_1 B_1 B_2 (G_L \cos \delta_{12} - B_{T2} \sin \delta_{12}) \quad (A10)$$

$$a_{21} = k_{IP1} E_1 E_2 B_1 B_2 (G_L \sin \delta_{21} + B_{T2} \cos \delta_{21}) \quad (A11)$$

$$a_{22} = -k_{IP2} E_2 B_2 [E_1 B_1 (G_L \sin \delta_{21} + B_{T2} \cos \delta_{21}) + E_3 B_{th} (E_3 G_L B_{th} \sin \delta_{23} + B_{T2} \cos \delta_{23})] \quad (A12)$$

$$a_{23} = k_{IQ1} E_2 B_1 B_2 (G_L \cos \delta_{21} - B_{T2} \sin \delta_{21}) \quad (A13)$$

$$a_{24} = k_{IQ2} B_2 [E_1 B_1 (G_L \cos \delta_{21} - B_{T2} \sin \delta_{21}) + 2E_2 G_L B_2 + E_3 B_{th} (G_L \cos \delta_{23} - B_{T2} \sin \delta_{23})] \quad (A14)$$

$$a_{31} = k_{IP1} E_1 B_1 [E_2 B_2 (G_L \cos \delta_{12} - B_{T2} \sin \delta_{12}) + E_3 B_{th} (G_L \cos \delta_{13} - B_{T2} \sin \delta_{13})] \quad (A15)$$

$$a_{32} = k_{IP2} E_1 E_2 B_1 B_2 (-G_L \cos \delta_{12} + B_{T2} \sin \delta_{12}) \quad (A16)$$

$$a_{33} = k_{IQ1} B_1 [-2E_1 (G_L^2 + B_{T2}^2 - B_1 B_{T2}) + E_2 B_2 (G_L \sin \delta_{12} + B_{T2} \cos \delta_{12}) + E_3 B_{th} (G_L \sin \delta_{13} + B_{T2} \cos \delta_{13})] \quad (A17)$$

$$a_{34} = k_{IQ2} E_1 B_1 B_2 (G_L \sin \delta_{12} + B_{T2} \cos \delta_{12}) \quad (A18)$$

$$a_{41} = k_{IP1} E_1 E_2 B_1 B_2 (-G_L \cos \delta_{21} + B_{T2} \sin \delta_{21}) \quad (A19)$$

$$a_{42} = k_{IP2} E_2 B_2 [E_1 B_1 (G_L \cos \delta_{21} - B_{T2} \sin \delta_{21}) + E_3 B_{th} (G_L \cos \delta_{23} - B_{T2} \sin \delta_{23})] \quad (A20)$$

$$a_{43} = k_{IQ1} E_2 B_1 B_2 (G_L \sin \delta_{21} + B_{T2} \cos \delta_{21}) \quad (A21)$$

$$a_{44} = k_{rQ2} B_2 [E_1 B_1 (G_L \sin \delta_{21} + B_{T2} \cos \delta_{21}) - 2E_2 (G_L^2 + B_{T2}^2 - B_2 B_{T2}) + E_3 B_{th} (G_L \sin \delta_{23} + B_{T2} \cos \delta_{23})] \quad (A22)$$

여기서, $\Delta x = [\Delta x_{P1} \Delta x_{P2} \Delta x_{Q1} \Delta x_{Q2}]^T$, $B_1 = -1/X_1$, $B_2 = -1/X_2$, $B_{th} = -1/X_{th}$, $G_L + jB_L$ 은 부하의 어드미턴스이고, $B_{T2} = B_1 + B_2 + B_{th} + B_L$ 이다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 지원에 의해 기초전력연구원 주관으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제 번호 : R-2005-7-105)

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] 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. Vilathgamuwa, 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] M. Liserre, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-Connected Inverters for a Large Set of Grid Impedance Values", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, pp. 263-272, Jan. 2006.

[7] 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, pp. 1821-1831, Nov. 2006.

[8] 손광명, 이계병, 홍준희, "PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발", 대한전기학회 논문지, 56권, 3호, pp. 457-464, 2007년 3월.

[9] 손광명, 김영섭, "Micro-Source의 계통 연계용 인덕터 크기 선정에 관한연구", 한국조명전기설비학회 논문지, 19권, 6호, pp. 52-58, 2005년 9월.

저 자 소 개



손 광 명 (孫 光 明)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 동의대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 051-890-1671

E-mail : kmson@deu.ac.kr



이 계 병 (李 桂 秉)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail : kb_@naver.com