

# Micro-Source의 계통 연계용 인덕터 크기 선정에 관한 연구

(A Study on Determining the Size of the Interface Inductor  
for Grid-Connected Micro-Sources)

손광명\* · 김영섭

(Kwang-Myung Son · Young-Seob Kim)

## 요 약

Micro-Grid의 개념은 CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)에 의해 제안된 새로운 분산 전원 망으로서 부하에 열과 수 [KW]~1[MW] 사이의 전력을 함께 제공하는 Micro-Source에 의해 구성되어 있다. Micro-Source는 친환경적인 연료전지나 마이크로터빈등을 에너지원으로 사용하며, 전력품질 제어를 위해 전압형 인버터를 채용하고 독립적인 유무효전력 제어가 가능한 새로운 개념의 분산전원이다. Micro-Source가 효율적으로 유효전력 및 무효전력을 전력시스템에 공급하기 위해서는 계통연계용 인덕터가 필요한데, 본 논문에서는 인버터의 제어 범위와 각 변수의 한계를 함께 고려하고 전달 및 제어하고자 하는 유효 및 무효 전력의 범위에 의해 인덕터 용량을 결정하는 절차를 제안하였다.

## Abstract

The concept of the Micro-Grid comprising Micro-Sources supplying both heat and power ranging from several [KW] to 1[MW] to local customers is proposed by CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions). Micro-Sources adopt environmentally friendly and reliable power sources such as Fuel-Cell and Micro-Turbines. Micro-Sources adopt voltage source inverter with AC grid system in order to provide independent real and reactive power control for premium power quality. Thus Micro-Source needs series inductance for interfacing with AC grid system. With this reason, we propose a technique that can decide the optimal size of the inductor for effective transfer of the power into the grid.

Key Words : Micro-Grid, Micro-Source, Interface inductor

## 1. 서 론

전력공급에 대한 규제가 완화된다고 많은 분산 전원들이 전력계통에 도입되면서 전력시스템의 전반적인 운용과 제어에 새로운 현상들이 발생될 것으로 예상된다. 컴퓨터와 같은 기기들과 반도체등과 같은 정밀 전자설비 산업이 우리 산업의 주축을 이

\* 주저자 : 동의대학교 전기공학과 부교수, 공박

Tel : 051-890-1671, Fax : 051-890-1664

E-mail : kmson@deu.ac.kr

접수일자 : 2005년 5월 17일

1차심사 : 2005년 5월 20일

심사완료 : 2005년 6월 22일

루고 있으므로 양질의 전력 공급이 생산성 향상을 위해 가장 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 분산전원은 다양한 연료를 사용할 수 있고 환경보전 면에서도 우수한 특성을 가지고 있기 때문에, 부하가 밀집된 도시에서도 손쉽게 설치할 수 있으므로 송전설비의 간략화에 따른 송전손실의 저감을 꾀할 수 있다.

최근 부하와 Micro-Source(마이크로소스)의 클러스터(cluster)인 Micro-Grid는 CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)에 의해 제안되고 연구가 시작된 분산전원망의 한 형태이다[1]. Micro-Source는 전기적 부하와 열 부하에 에너지를 공급하며, Micro-Grid 내의 다른 Micro-Source들과 통신하지 않는 독립적으로 제어 가능한 기능을 가지도록 제안되었다. Micro-Source 시스템은 전력원으로서 DC 전원을 생산하고, DC/AC 전압형 인버터(DC/AC Voltage Source Inverter, VSI)를 사용하여 계통에 연계된다.

기존의 계통 연계형 인버터 시스템은 전류원형 인버터 (Current Source Inverter, CSI)를 채용하여 계통에 연계되는 구조를 가지고 있으나, Micro-Grid에 채택되는 Micro-Source는 독립적인 유효전력 및 부하전압과 무효전력을 독립적으로 제어함으로써 수용가에게 최선의 전력품질(Premium Power Quality)를 제공하는 것을 목적으로 하기 때문에 전압형인버터(Voltage Source Inverter, VSI)를 기본 전력변환장치로서 채용하고 있다[1,2]. 이 경우 전압형 인버터가 계통에 연계되어 전력을 수수하기 위하여는 인버터와 계통의 중간에 연결용 인덕터(interface inductor)가 필요하게 된다. 인덕터의 용량은 제어목적과 전력전달 용량 및 제어 범위에 따라서 달라지며 최적의 인덕터 용량을 결정하는 문제가 중요하게 된다.

따라서 본 논문에서는 Micro-Source의 전압형 인버터를 통한 계통연계시 유효전력 과 무효전력 흐름에 영향을 주는 직렬 인덕턴스의 크기 결정에 관하여 연구하였다. 인버터의 제어 범위와 각 변수의 한계를 함께 고려하고 전달 및 제어하고자 하는 유효 및 무효 전력의 범위에 의해 인덕터 용량을 결정하는 절차를 제안하였다.

## 2. Micro-Source의 모델

Micro-Grid에 채용되는 Micro-Source는 일반적으로 수백 [KW] 이하의 용량을 가지는 연료전지(Fuel-Cell), 태양전지(PV panel), 마이크로터빈(Micro-Turbine)등을 전력원으로 하고 있다[3,4]. 이들의 특징은 이들 전력원이 내는 전력이 직류 형태라는 것이다. 마이크로 터빈의 경우 고주파 교류를 정류기를 이용하여 직류로 변환된다. 이들은 직류이기 때문에 전력전자 인터페이스 등을 통하여 교류로 변환되며, DC 링크 커패시터를 통하여 인버터로 60Hz 교류로 변환되는 구조를 가지고 있다. 이러한 전력변환은 전압원인버터에 의해 이루어진다. 인버터는 직류전압을 지정된 크기와 위상각을 가지는 교류전압으로 변환 시켜준다. 그림 1은 Micro-Source의 구조를 간단하게 보여준다. 그림1과 같은 Micro-Source가 전력시스템 그리드에 연결되었을 때의 전력주파수 영역 동특성은 시스템을 3상평형으로 가정하면, 단상 등가 모델(per phase equivalent)로 해석할 수 있다.

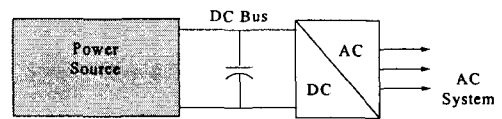


그림 1. Micro-Source의 구조  
Fig. 1. The structure of Micro-Sources

그림 2는 Micro-Source가 전력시스템에 연결된 경우의 단상 모델을 나타낸다. Micro-Source측 단상 전압의 크기와 위상각은 제어시스템에 의해 PWM 제어를 통해 제어되며, 인버터 제어 시스템은 인버터측 전압  $V_v$ ,  $\delta_v$  및 계통측 전압  $E$ ,  $\delta_E$ 를 측정하여 원하고자 하는 유효·무효 전력 및 전압을 제어하는 피드백 제어시스템으로 구성되어 있으며 수 ms의 응답특성을 가진다. Micro-Source는 전력주파수 영역에서 고조파 성분을 무시하면 이상전압원으로 모델링 할 수 있다. Micro-Source는 전압원으로 작동하므로 AC 그리드에 연결되기 위해서는 그림 2에서와 같이 X로서 표현된 연계용 인덕터가 필요하다[5,6]. 이때 Micro-Source로부터 전력시스템

으로 전달되는 유효 및 무효전력은 식 (1)~(3)으로 표현된다[7].

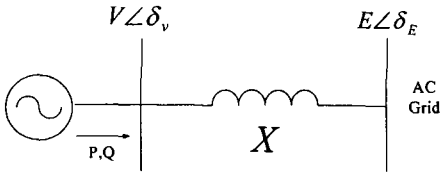


그림 2. 계통에 연계된 Micro-Source 모델  
Fig. 2. Model of the grid-connected Micro-Source

$$\delta_p = \delta_v - \delta_E \quad (1)$$

$$P = \frac{VE}{X} \sin \delta_p \quad (2)$$

$$Q = \frac{V^2}{X} - \frac{VE}{X} \cos \delta_p \quad (3)$$

식 (1)은 인버터측 전압과 계통측 전압과의 전력각을 나타내며, 식 (2), (3)은 Micro-Source에 의해 계통측에 전달되는 유효전력을 의미한다. 식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이 연계용 인덕터의 값에 따라 전력각의 변화에 따른 유효전력과 무효 전력의 흐름에 대한 민감도가 달라짐을 알 수 있다.

### 3. 인덕터의 크기 선정

Micrо-Source 모델의 계통연계시 직렬 인덕터는 인버터 과전압 없이 전 범위에서의 유효전력과 무효전력을 전송하기 위해 중요하다. 이러한 직렬 인덕터의 크기  $X$ 는 다음과 같이 Micro-Source에 포함되어 있는 인버터의 운전범위와 AC Grid 모션 전압 등을 고려해서 결정되어야 한다.

계통 전압  $E=1.0$  p.u. 기준으로 인버터 제어 한계는 다음과 같이 결정한다.

- $V$ 의 한계 ( $V_{max} \leq 1.2$  p.u.)
- $\delta_p$ 의 한계 ( $\delta_{max} \leq 30^\circ$ )

위에서  $V$ 의 한계는 DC 링크 버스 전압과 전력전 소자의 전압 내압을 고려한 것으로서, 정격치의

20[%] 정도를 설계기준으로서 가정하였으며,  $\delta_p$ 의 한계는 선형 전력제어를 가능하게 하는 한계이다.

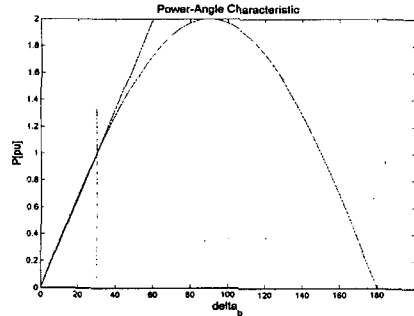


그림 3. 전력각의 변화에 따른 유효전력변화 특성  
Fig. 3. Real power angle characteristics

그림 3에서  $\delta_p=0\sim 180[^\circ]$  동안 유효전력 출력변화를 나타내었다.  $\delta_p=0\sim 90[^\circ]$  구간은 계통 연계시 이론적 안전운전 (Stable Operation) 영역이며, 통상 운전되는  $\delta_p=0\sim 30[^\circ]$  구간은 그림에서 보듯이 유효전력이 선형적으로 변화하는 영역이다.

### 3.1 인버터 동작 영역(Inverter Operation Area, IOA)

일반적으로 인버터 출력한계는 전력전자소자의 정격에 의해 결정되며, 인버터가 안정적으로 공급할 수 있는 최대 전압과 최대 전류의 형태로 표현되는 인버터 동작 영역(Inverter Operation Area, IOA)으로 정의된다. 공급 가능 유효전력은 prime-mover가 낼 수 있는 출력 정격을 넘을 수 없으며, 공급 가능 무효 전력은 인버터의 정격에 의해 제한된다. 이들 제한은 역률에 의한 한계, 전압전류(volt-ampere) 한계, 전류 크기 한계(current magnitude limit)등의 형태로 나타나며 이들은 인버터와 prime-mover 및 운전 범위에 의해 결정된다.

#### 3.1.1 역률을 고려한 인버터 출력한계

인버터가 prime mover의 최대 출력 점에서 운전되는 경우 즉, 최대의 유효전력을 발생하고 있는 경우 전력전자 소자들의 특성을 고려하여 정하여진 인버터 출력 한계를 말한다. 일반적으로 최대 출력

VA는 역률이 가장 작은 때이고,  $p.f. \geq |p.f. \min|$  이어야 하기 때문이다. 예를 들어  $p.f. \min = 0.75$  이라면 정격 유효전력 출력시에서의 최대 출력 volt-ampere는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\max} = \frac{P_{\max}}{0.75} \quad (4)$$

복소전력 관계식  $S^2 = P^2 + Q^2$  을 이용하면 가능한 최대 무효 전력은 다음 식 (5)로 표현된다.

$$Q_{\max} = \sqrt{\left(\frac{P_{\max}}{0.75}\right)^2 - P_{\text{output}}^2} \quad (5)$$

일반적으로 인버터의 유효전력 출력  $P_{\text{output}}$  이 주어 질 경우  $Q_{\max}$  는 다음 식으로 주어진다. 이때  $P_{\text{output}}$  이 작아짐에 따라 인버터의 최대 가능 무효 전력 출력  $Q_{\max}$  가 커짐을 알 수 있다.

그림 4는 P-Q 평면에 역률 한계에 의한 인버터 동작 가능 영역을 표시한 것이다. prime mover 정격 유효전력 한계 내에서 인버터가 AC 시스템에 공급할 수 있는 P와 Q의 영역을 보여준다. 그림에서 무효전력은  $Q_{\max}$  를 초과할 수 없다.

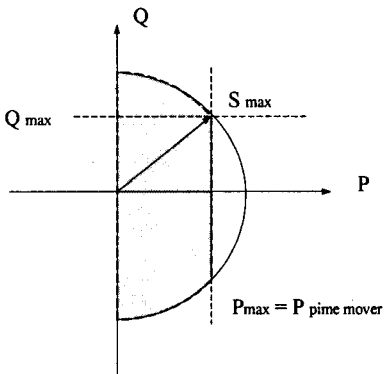


그림 4. 역률에 의한 한계  
Fig. 4. limit on the power factor

### 3.1.2 고정된 Q 의 값을 가진 경우

인버터가 일정한 Q를 출력하는 한계를 가질 경우를 고려한 한계이며, 이때  $Q=0$ 일 필요는 없다. 그림 5에서 이 경우 인버터 동작 영역(IOA)을 보여준다. 그림에서 보듯이 운전영역은 하나의 선의 형태

로 표현된다.

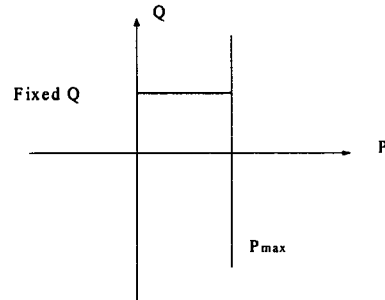


그림 5. 고정된 Q 의 값을 가진 경우의 운전영역  
Fig. 5. Constraint on the P-Q plane for fixed Q setting

### 3.1.3 최대 Volt-Ampere 정격

최대 VA 정격이란 유효전력과 무효전력의 정격이 결합된 형태로 인버터가 견딜 수 있는 최대 Volt-Ampere 한계를 말한다. 인버터가 최대 유효전력을 출력하지 않을 경우 최대 유효전력 출력시에 비해 출력가능한 무효전력은 증가할 수 있다. 이러한 점을 고려한 인버터 운전 영역은 그림 6에서와 같이 P-Q 평면에서 반원의 형태를 띠게 된다.

$$Q_{\max} = \sqrt{S_{\max}^2 - P_{\text{output}}^2} \quad (6)$$

이때 prime-mover의 가능 출력이  $P_{\max}$  라고 하면 이에 의한 제한이 그림 6과 같이 직선 형태로 나타나다. 최종 운전 가능영역은 그림 6의 음영 부분이 되며, 인버터 동작 영역(IOA)을 나타낸다.

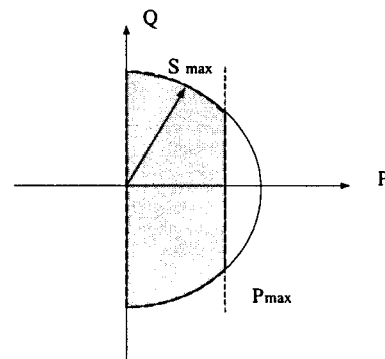


그림 6. 최대 Volt-Ampere 정격에 의한 운전범위 제약  
Fig. 6. Constraint on the P-Q plane for Volt-Ampere rating

3.1.4 최대 전류 크기

인버터의 각 밸브에 의한 전류 제한은 VA 한계와 유사한 것처럼 보이나, VA 한계는 전압과도 관련되어 있다는 점이 다르다. 만약 인버터 단자 전압이 제한되게 되면 동일한 VA 한계라 하더라도 더 많은 전류가 흐르게 된다. 전류제한은 소자 보호를 위해 필수적이므로 이 경우 전류까지 제한되게 될 경우 출력 VA 값은 한계보다 작아지게 된다. 따라서 여기서 알 수 있는 것은 무효 전력 출력 한계는 유효전력뿐만 아니라 전압의 크기에 의해서도 달라진다는 것이다. 전류가 제한치에 이르렀을 때의 최대 무효전력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Q_{max} = \sqrt{V^2 I_{max}^2 - V^2 I_{max}^2 \cos^2 \phi} = VI_{max} \sin \phi \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 인버터의 출력 전압과 전류의 역률각이다. 위의 식에서 알 수 있듯이 전압의 크기가 감소할수록 출력 한계도 작아진다. 더욱 더 중요한 사실은 전류 제한이 걸리게 되면 이로 인해 유효전력 출력도 이에 의해 제한받게 된다는 것이다. 이것은 다음의 식으로부터 명확하다.

$$P_{max} = VI_{max} \cos \phi \quad (8)$$

표 1은 네 가지의 인버터 정격을 보여준다.

표 1. 인버터 출력한계  
Table 1. Output limit of the inverter

고려 대상	Prime Mover 정격	인버터 출력한계
Power Factor	$P_{max}$	$P_{output} \leq P_{max}, Q_{max} = \sqrt{\frac{P_{max}^2}{\text{pf}^2} - P_{output}^2}$
고정된 Q	$P_{max}$	$P_{output} \leq P_{max}, Q_{max} = Q_{fixed}$
Maximum Volt-Ampere	$P_{max}$	$P_{output} \leq P_{max}, Q_{max} = \sqrt{VA_{max}^2 - P_{output}^2}$
Maximum Current	$P_{max}$	$P_{output} \leq P_{max}, Q_{max} = \sqrt{(VI_{max})^2 - P_{output}^2}$

3.2 최대 인덕터 크기 기준

그림 2와 같이 전력시스템 그리드에 연계된 Micro-Source로부터의 유효 및 무효 전력 전달은 식 (1)~(3)으로 표현된다. 식 (1)로부터 계통 연계용 인덕턴스가 커지면 동일한 전력각 변화에 대하여 적은 전력을 공급하고, 인덕턴스가 작아지면 보다 많은 전력을 공급하는 것을 알 수 있다. 이점을 고려하여 최적 인덕터 크기를 찾을 수 있다. 인덕터 크기가 너무 작아지면 유무효 전력 변화 범위가 너무 커져 인버터 운전영역을 벗어나는 경우가 많고, 너무 크면 전력을 제대로 공급할 수 없다. 따라서 최적의 인덕터 크기는 인버터 운전영역을 포함하는 최대값이 된다.

그림 7은  $\delta_p = \delta_{pmax} = 30[^\circ]$ ,  $E = 1 \text{ p.u.}$  일 때의 계통연계 인덕터의 인덕턴스와 단자전압을 변화시킬 때의 유효 및 무효전력 전송량의 궤적을 나타낸다. 이때  $0.6 \leq V \leq 1.2 \text{ p.u.}$ ,  $1 \leq X \leq 6 \text{ p.u.}$ 의 범위를 가진다. 단자전압과 인덕턴스를 독립적으로 변화시켰을 때 궤적은 하나의 평면을 이루게 되며 이로부터 계통으로의 유무효전력의 전송에 인덕터 크기가 미치는 효과를 명확히 알 수 있다. 여기서 각 변수의 단위는 단위법으로 표현한다. 시스템 전력 기준값은  $S_B = 1 [\text{MVA}]$ , prime mover의 정격전력을 100 [kVA] 라 하면, 그때 인버터에 의해 도달할 수 있는 P와 Q의 양은 0.1 p.u. 주변이어야 된다.

그림 8은  $0.6 \leq V \leq 1.2 \text{ p.u.}$ ,  $0[^\circ] \leq \delta_p \leq 30[^\circ]$

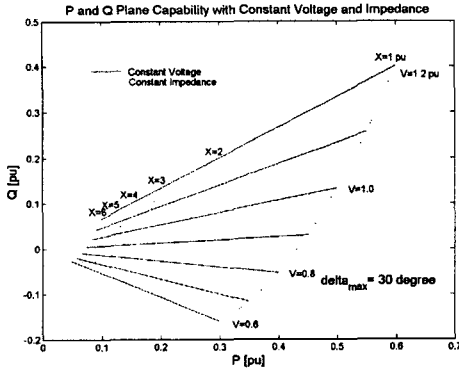


그림 7.  $\delta_p = 30[^\circ]$ 일 때 P와 Q 전송량  
 Fig. 7. Real and reactive power capability for  $\delta_p = 30[^\circ]$

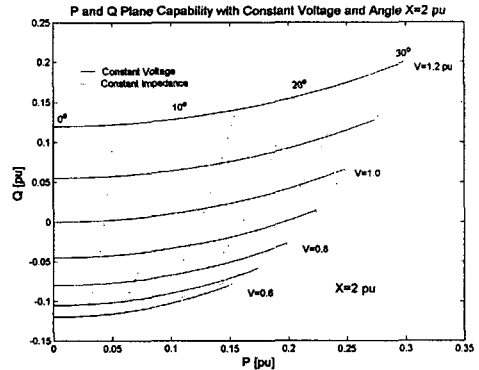


그림 9.  $X = 2$  p.u. 일 때의 P와 Q 전송량  
 Fig. 9. Real and reactive power capability for  $X = 2$  p.u.

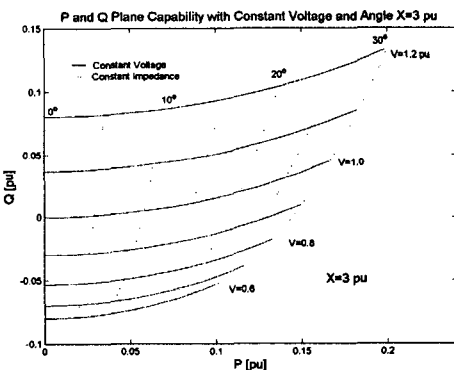


그림 8.  $X = 3$  p.u. 일 때의 P와 Q 전송량  
 Fig. 8. Real and reactive power capability for  $X = 3$  p.u.

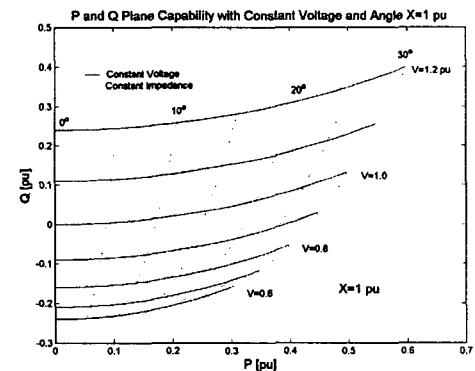


그림 10.  $X = 1$  p.u. 일 때의 P와 Q 전송량  
 Fig. 10. Real and reactive power capability for  $X = 1$  p.u.

이고,  $X=3$  p.u. 일 때의 유무효전력 전송량을 나타내며, 이때에도 해당영역은 하나의 평면을 구성하게 된다.

그림 9와 10은  $0.6 \leq V \leq 1.2$  p.u.,  $0[^\circ] \leq \delta_p \leq 30[^\circ]$  이고,  $X = 1$  p.u. 일 때 각각의 유무효전력 전송량을 나타낸다. 그림 8과 비교해보면, 인덕턴스 값이 감소함에 따라 운전영역이 점점 더 커지는 것을 알 수 있다.

복소전력 전송량 영역을  $\Omega$  영역으로 정의하면, 인덕터 크기가 감소할 때  $\Omega$  영역이 넓어진다. 이상적인 인덕턴스 크기는 다음과 같이 정의할 수 있다.

- $\Omega$  영역은 지정된  $E, V, \delta$ 와  $IX$  조건 하에서

의 P-Q 평면상의 영역이다.

- 인버터 동작 영역(Inverter Operation Area, IOA)은 P-Q 평면상에서 표현되는 인버터의 운전가능 영역이다.
- $X$ 의 이상적인 크기는  $IOA \in \Omega$  를 만족하는 최대 임피던스이다.

### 3.3 최적의 인덕터 크기

그림 11에 Prime Mover 의 출력을 고려한 P-Q 공급 곡선과 인버터 동작영역(IOA)을 함께 그려보았다. 그림 11에서 인버터 동작영역(IOA)를 적절하

계 수용하는 P-Q 공급 곡선은 X의 크기가 2.1 p.u. 인 영역이다.

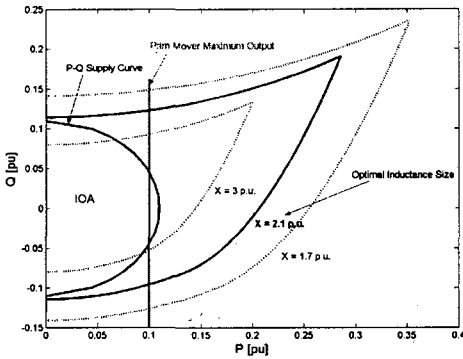


그림 11. 최적 인덕터 크기  
Fig. 11. Optimal inductor size

#### 4. 결 론

Micro-Source는 신재생에너지가 확대 보급되는 현 추세에 비추어 경쟁력 있는 분산 전원으로 판단된다. 본 논문에서는 Micro-Source의 계통 연계시 전압형 인버터의 운전 영역을 고려하면서 유효전력과 무효전력을 전범위에 걸쳐 공급할 수 있는 직렬 인덕턴스의 최적 크기를 구하는 절차를 제안하였다. 인덕턴스의 최적 크기는 Micro-Source의 최대출력 유효전력과 전력전자소자의 정격을 고려하여 인버터의 동작 영역과 지정된  $E, V, \delta, X$  범위내의 P-Q 평면상의 영역을 비교하여 선정하였다. 제안된 방법은 Micro-Source의 계통 연계에 이용될 수 있는 효율적이면서 체계적인 방법이라 사료된다.

본 논문은 산업자원부의 지원에 의해 기초전력연구원 주관으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 : R-2002-B-044)

#### References

- [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(FESC '04, Aachen, Germany, 20-25, June 2004.
- [5] 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.
- [6] Venkataramanan, G. Illindala, M. "Microgrids and sensitive loads", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volume: 1, 27-31 Jan. 2002, Page(s): 315 -322 vol.1.
- [7] A. R. Bergen, Power Systems Analysis. 2nd Ed., Prentice-Hall, 2000.

#### ◇ 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.

##### 김영섭 (金永燮)

1976년 10월 28일생. 2003년 동의대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 신재생에너지그룹 연구원.