

## 에너지 기술의 패러다임 전환 : 분산형 전원

김형택 · 신영균 · 천원기\*

아주대학교 에너지학과, \*제주대학교

### Distributed and Dispersed Power Resources : Paradigm Shift of Energy Technology

Hyung-Taek Kim, Young-Kyun Shin and Won-Ki Chon\*

Department of Energy, Ajou University, Suwon, Korea

\*Cheju University, Cheju, Korea

#### 요 약

전력 사업 구조 개편과 전력계통 신뢰도에 대한 우려 증대, 풍부하고 저렴한 천연가스, 새로운 대기 오염 규제, 무정전전원의 가치 증대로 인하여 분산형 발전의 수요가 증가하고 있다. 본고에서는 미국의 사례를 중심으로 분산형 전원의 현황을 개략적으로 살펴보고 핵심기술들인 왕복동엔진, 가스터빈, 마이크로터빈, 연료전지, 태양광발전 기술들의 특징, 장점, 경제성 등을 서술하고 이 기술들의 활용범위 및 분산형 시스템으로서의 적합성에 대하여 논하며 관련 연구개발, 기존 전력망과의 연계, 문제점과 전망에 대해서 살펴보고자 한다.

**Abstract** — The demand for distributed power generation is growing these days because of utility restructuring, concerns on power grid reliability, abundant and cheap natural gas, new emission regulation and increasing role of uninterruptible power supply. The purpose of this article is to provide the recent trend and characteristics of distributed power generation technologies, their interface with existing power system, related R&D programs and future prospects.

#### 1. 서 론

미국 에너지부는 (DOE) 분산형 전원을 “최종 사용자 부근에 위치한 모듈형 발전 또는 전력저장”으로 정의하고 있다. 분산형 발전이란 기존 전력 계통과 연결 또는 독립적인 형태로 최종 소비점에서 소규모, 모듈형 시설로 전력을 생산하는 것이다. 분산형 발전 시설은 특정 고객이나 특정 전력계통의 이익을 위해서 설치되는데 분산형 시스템에는 바이오매스 발전기, 연소터빈, 집광식 태양력, 태양광전지, 연료전지, 풍력터빈, 마이크로터빈, 엔진/발전기세트, 전력저장, 제어장치가 포함된다. 분산형 전원은 전력망과 연결하거나 독립적으로 사용할 수가 있다. 대형 중앙집중식 발전소와는 대조적으로 분산형 발전 시스템은 kW 미반에서 수십 MW의 출력 범위를 지닌다.

분산형 전력공급시스템은 새로운 개념이 아니다. 최초

로 전기가 상용화될 때에는 대부분의 발전 시스템이 분산형이었다. 즉 3~4 MW급 규모로 한 지역의 에너지 공급을 목표로 했으므로 지금의 개념으로는 분산형이었다. 그러나 경제가 발전하며 규모의 경제를 추구하여 발전소는 중앙 집중 대형화되었고 요금 규제 체제 내에서 전력회사는 그들의 투자회수를 보장받을 수가 있었다. 당연히 소규모 발전의 효율은 보잘 것 없었다. 그러나 현재는 전력요금 구조개편과 전력계통 신뢰도에 대한 우려 증대, 풍부하고 저렴한 천연가스, 새로운 대기 오염 규제, 무정전전원의 가치 증대로 인하여 분산형 발전의 수요가 증가하고 있다.

미국의 경우 규제당국과 정책입안자들은 여러 지역에서 발전시설 용량 부족이 예상됨에 따라 심각한 도전에 직면해 있다. 이는 현재 전력 산업 구조개편이 중앙 규제식이 아닌 시장주도의 발전 시설 투자를 염두에 두었기 때문이다. 그래서 지금과 같이 시장이 완전히 자율

화되지 아니한 과도기에는 대부분의 사업주들이 대형 건설 프로젝트 투자를 이미 연기해버렸다. 따라서 많은 산업계의 전문가들은 불원간에 발전 시설 용량이 부족할 것이며 신규 발전설비 투입이 지연될 것이라고 예상하고 있다.

이러한 환경에서 분산형 발전은 정책입안자, 규제당국 그리고 전력시장으로서는 계통용량 부족을 신속성 있게 해결할 수 있는 선택이다. 미국의 경우는 현재 계획 용량의 증설이 연기되는 가운데 장기 수요는 더욱 급히 증가할 전망이다. 이 문제를 더욱 악화시키는 것은 송전망의 대량 증설이 기대되지 않고 있으며 전력산업 구조가 개편되면서 발전 계획과 송배전 계획간의 연계성이 현저히 줄고 있다는 점이다. 즉, 전력산업계의 구조 조정, 계통용량수요의 증대, 기술의 발전이라는 현 전력산업계의 추세가 분산형 발전의 부상과 확대를 유도한 것이다. 이러한 발전운영 모델은 전력시장 구조 개편 목표를 시장주도고객지향형-만족시키며 전력계통 용량을 비용효과적으로 증설할 수 있다는 잠재력으로 인해 큰 관심을 모으고 있는 것이다.

우리나라는 경제개발이 진행됨에 따라 대량의 전력에너지가 필요하게 되자 필연적이었지만 충분한 검토 여유가 없이 중앙 집중형 발전소들을 시급히 도입하여 현재는 국가 대부분의 전력 에너지 수요를 대형 발전소들이 담당하고 있다. 물론 공단의 열병합 발전시스템, 대규모 주거단지의 지역난방 발전시스템 등이 에너지 사용의 효율적 측면에서 도입되어 가동 중이나 수십 MW급 이상의 용량으로 엄밀한 의미에서 최근 선진국에서 새로운 페러다임의 에너지 기술로 각광받는 분산형 에너지원은 아니다. 향후, 전세계 에너지시장에서 중요한 위치를 차지하게 될 분산형 전원시스템은 단순한 페러다임 전환에 의한 새로운 기술이 아니라 인구밀집 지역에서는 필수 선택하여야 할 에너지원으로 인식되고 있다. 특히 전력공급망이 제대로 갖추어 있지 않은 개발도상국에서는 분산형 전원시스템 채택이 유력시된다.

대용량 전력공급설비들은 발전효율이 높은 반면, 시설비가 많이 소요되므로 그 비용이 그대로 사용자의 전력요금에 부가된다. 대용량 전력공급설비를 근간으로 한 일원화된 국가 전력 공급망을 운영하자면 첩두부하에 따른 불필요한 시설비 및 기저부하 시 잉여전력의 판매 문제가 대두된다. 또한, 최근의 전 국민의 환경문제에 대한 인식 및 NIMBY 현상으로 인하여 계속 증가하는 전력수요를 감당할 석탄화력 및 원자력 발전소 건설은 매우 어려운 것이 현실이다. 반면에, 점진적으로 소규모, 모듈형 발전시스템들에 대한 요소 및 시스템 기술 개발이 실현됨에 따른 경제성 검토가 이루어져 선진국에서는 분산형 전원시스템의 전력시장 도입이 시도되고 있다.

## 2. 분산형 발전의 활용 현황과 이점

시장이 계통용량 부족 해결책을 강구하면서 분산형 발전 옹호자들은 분산형이 가장 비용효과적이라고 주장하고 있다. 그 이유는 소규모로 전략적으로 설치한 분산형 발전 시설들은 송배전 인프라 투자가 필요 없는 가운데 최종 사용자에게 기존 전력망만 사용하는 것보다 고품질, 고신뢰도의 전력을 제공할 수 있다는 것이다. 분산형 발전은 시설용량이 부족한 전력회사들로서는 부하증가와 송전망 부족을 동시에 해결할 혁신적 기회인 것이다. 분산형 발전은 규제당국과 입법기관에도 시장주도형 전력산업 구조 개편을 위한 중요한 방법을 제시한다.

분산형 발전은 전력수용가, 에너지 서비스 회사, 배전망 운영사업자들에게 다양한 부가가치를 제공한다. 분산형 발전은 자체적으로는 열병합 발전을 할 경우 고효율 열 에너지원이 되며, 비상 전원 또는 예비 전원의 독자적인 확보가 가능하고 예비 설비에 대한 고신뢰도 전력공급이(무정전전원장치와 결합하여) 가능하다. 분산형 발전기가 기존 전력망과 상호 연결되면 신규 송배전망에 대한 자본투자 연기, 송배전 손실 방지, 첩두수요에 대한 비용효과적 대처, 전력 품질 및 신뢰도 개선, 전기요금 및 수요량별 가산금 인하 효과가 있다. 또한 패키지 형태로 주문 생산이 가능하여 설치기간이 짧으며, 주로 청정 가스연료를 사용하기 때문에 대기오염 배출물질을 현저히 줄이는 장점이 있다.

특히 시설용량이 부족한 일부 오래된 인구과밀 도시의 경우에는 개선 작업이 필요한데 이에 소요되는 kW당 투자는 일반적인 발송배전 개선보다 훨씬 높은 수준이다. 이러한 상황에서 중앙집중식 모델을 사용하는 전통적인 엔지니어링 방식은 지극히 비쌀 수가 있다. 더구나 기존의 건설 방식으로는 설계, 승인, 시공에 수년이 소요된다.

Arthur D. Little사의 추산에 의하면 북미지역에 설치된 20 MW 미만의 왕복동 엔진과 가스 터빈은 모두 60,000 MW가 넘으며 이는 캘리포니아 전체의 발전시설 용량보다 많은 것이다. 그러나 현재 이들 중 기존 전력 인프라와 연계되어 있는 것은 별로 없다.

분산형 전력시스템의 에너지시장에서의 활용 정도는 전력공급 서비스의 수준에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 전력공급 서비스 구성 요소는 다음과 같다.

- 에너지(Energy) : 수요자가 요구하는 kW-hr 총량
- 용량(Capacity) : 첩두 부하시 요구되는 전력량
- 예비량(Reserve) : 부하 변동이나 긴급시 요구되는 추가 용량
- 신뢰성(Reliability) : 투자에 대한 결과물의 확실성
- 전력의 질(Power quality) : 전압 및 주파수 안정성
- 비상발전(Back-up and standby service) : 수용자의

표 1. 분산형 전원의 활용 분야와 그에 따른 특징 .

Table 2  
Distributed Generation Applications and Services Provided

Services Provided	Combined Heat and Power	Standby Power	Peak-Shaving	Grid Support	Stand Alone
Energy	Simultaneous production of electricity and useful heat provide low cost energy to customers	Energy production is minimal and a small part of overall value	Provides alternative to high cost peak period energy	Reduces line losses, can be important in remote or congested parts of the T&D system	Must provide customer full requirements
Capacity	Provides capacity when running	Customer reserve capacity	Avoids high peak period system capacity costs	Can help to avoid T&D capacity constraints	Must provide customer full requirements
System Reserve	If the system is running at full load, by definition there is no reserve	Possible extension of current applications, but not part of most current standby systems	Could provide spinning and standby reserve during off-peak periods	Could provide spinning and standby reserve during off-peak periods	Must provide customer full requirements
Reliability	Systems are generally as reliable or more so than individual utility generators. Synchronous generators increase customer reliability by 90+% but don't contribute materially to system reliability	The primary purpose of these systems is to approach 100% reliability for health and safety reasons and to avoid economic losses from grid power outages	Increases customer reliability and can be part of a utility program to reduce shortage based outages	Increases reliability due to supply shortages, T&D constraints, and storm related outages	Must provide customer full requirements
Power Quality	Provides customer some protection from grid problems; can be part of a premium quality customer system	Not a primary issue but can be part of a premium quality customer system	May help customer to avoid voltage sags and brownouts that occur during system emergencies	Can be used for power factor correction and voltage support	Must provide customer full requirements
Back-up Service	For every 1% drop in generator availability, the system requires 87 hours of back-up service. Back-up for maintenance during off-peak periods, but forced outages can occur anytime	The system is the back-up service so separate back-up service is not required	Peak-shaving can be an extension of back-up service	Grid support enhances T&D system in general, not specific to back-up service	Must provide customer full requirements

자료출처 : GRI, The Role of Distributed Generation in Competitive Energy Markets, 1999.

### 예비 전력 확보

상기의 서비스들을 개별적으로 요금을 부과해서, 전력 공급자와 수요자가 별도의 계약에 의해 각각의 서비스를 공급받게 되면 분산형 전원을 채택함으로써 에너지를 더욱 효율적으로 이용할 수 있고 또한 전력서비스를 최적화할 수 있다. 분산형 전원은 전력 공급자/수요자의 입장에 따라 여러 형태의 서비스를 제공할 수 있다. 표 1에 분산형 전원의 활용 분야와 그에 따른 특징을 설명하였다.

#### 2-1. 열병합발전(Combined Heat and Power)

연소열을 이용하여 전기를 만드는 과정에서 상당량의

폐열이 배출된다. 대부분의 발전소는 유입 연료의 에너지 중 2/3 정도가 열로 변환된다. 만약 열에너지 사용처가 발전소에 근접해 있으면 폐열을 이용할 수 있다. 이러한 열병합 발전으로 인하여 에너지 이용 효율이 현저히 증가되고, 지구온난가스 배출이 저감되며 초기투자비가 절감된다. 열병합은 열에너지 사용량이 전력사용량 보다 많은 공정산업, 병원, 체육시설, 세탁시설 등에 적합하며 우리 나라에서도 반월, 구미 등 일부 공단이나 업체조합들에서 열병합발전으로 증기와 전력을 공급하고 있다.

미국의 경우 열병합발전의 이용은 에너지관련법이 제

정된 후 활발히 진행되고 있으나 자체 전력생산/소비에 국한되고 있다. 에너지 관련법에 의하면, 에너지 시장에서 발전사의 송배전망을 열병합전원과 연결시켜 전력을 회피비용(Avoided Cost)으로 구매함으로써 화석연료의 이용효율을 증가시키게 되어 있으므로 현재 전력사로부터 수직적으로 구성된, 경제적이지 않은 유통구조를 개선시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 경쟁적인 전력시장에서는 수요자, 개발자, 전력사들이 각각 열병합시스템으로 이익이 극대화하도록 좀 더 유연성 있는 계약이 이루어져야 한다는 문제가 있다.

## 2-2. 예비발전(Standby Power)

일반적으로 전력시스템은 상당히 신뢰성을 갖는다고 인식되고 있다. 수요자들은 하루 24시간 일주일 내내 안정적인 전력이 공급될 것을 기대한다. 물론 예기치 않은 사고나 태풍 등에 의해 송배전 시스템에 과부하가 발생했을 때는 정전이 된다. 대부분 이러한 정전사고는 잠시이며 금방 복구된다. 하지만, 전력 수요자들 중 정전에 민감하게 반응하여 자체적으로 정전에 대비하여 예비발전 설비를 갖춘 곳이 있다. 국민 건강과 안전을 위하여 병원, 승강기, 수도 설비 등은 법으로 예비발전 시설을 갖추게 되어 있다. 또한 통신회사, 공정산업, 백화점 등에서도 정전시 발생하는 막대한 경제적 손실을 이유로 예비발전설비를 갖추고 있다.

예비발전설비는 분명히 비효율적인 발전원이다. 이 것들은 거의 운영되고 있지 않기 때문에 총전력 시설 용량 계산에서 빠져 있으며 전력망과 연결되어 있지도 않다. 전력회사에서는 침두부하 시 필요한 예비 용량 확보 차원에서 사용자에게 인센티브를 주어 설치를 권장하고 있다. 이렇게 되면 예비발전설비가 에너지 시장에서 경쟁력을 갖추게 되고 또한 운전시간이 길어지게 된다. 따라서 예비발전설비를 이용하면 전력망을 통한 전기공급과 자체발전설비를 통하여 항상 전력 공급이 가능한 시스템을 구성할 수 있음은 물론 전력 단가를 저감시키고 신뢰성을 극대화할 수 있을 것이다. 무정전전원을 필요로 하는 병원이나 예민한 전자기기를 사용하는 산업설비들의 경우에는 분산형 발전기가 예비 발전기로서 큰 장점을 지니며 또한 전력회사와의 협의로 침두부하시 예비전력으로 사용하여 전력요금을 낮출 수가 있다.

## 2-3. 침두부하 절감(Peak Shaving)

전력원기는 발전 시설의 유용도 및 전력 수요에 따라 시간 시간 변화게 된다. 전력공급자는 이런 사실을 알지만 수요자는 전혀 알 수 없다. 대규모 수요자는 시간 별로 침두부하, 심야전력, 중간 시간대로 나누어 전기요금을 지불하고 있다. 경쟁력 있는 에너지 시장을 구축

하려면 시간대에 따른 가격 변화가 전기요금에 탄력성 있게 반영되어야 한다. 대형 수용가들은 침두부하시 더 많은 요금을 내는 대신에 분산형 전력을 사용하여 총전력요금을 절감할 수가 있고 전력회사는 외부전력 구입 비용을 절감할 수 있다. 수요자의 분산형 전력생산 능력으로 인하여 전력회사는 고가의 발전설비, 송배전 설비가 필요치 않게 되고 외부전력 구입 비용이 감소하여 경제적 이득을 얻을 수 있다. 수요자는 시간대별 요금 체계로 인하여 3~4년 후 분산형 전원설비의 초기투자비에 해당되는 전력요금의 이익을 갖게 된다. 시간대에 따른 전력요금을 수요자의 전력시설 구축을 극대화 할 수 있게 유도하면, 침두부하 절감을 위한 분산형 전원시설이 극대화되어 막대한 발전소 시설 투자비를 절감할 수 있게 된다.

## 2-4. 전력공급망 무하 분산(Grid Support)

전력공급망은 전력생산, 고전압 송전, 변전설비, 수송가 송전을 총망라한 복합설비이다. 분산형 전원을 사용하므로 전력공급망의 신뢰성이 향상되고 시설투자를 감소시킬 수 있다. 분산형 전원에 의한 이점은 다음과 같다.

- 안정적 전압과 주파수
- 송배전망 설비 보완 필요성 저하로 인한 비용, 시간 이익
- 송배전 손실 감소
- 적극적인 전력 조절
- 재생에너지 이용 및 고효율 분산형 전원으로 인한 연료 사용량 감소
- 재생에너지 이용 및 청정 분산형 전원으로 인한 공해 배출물 감소

현재 이러한 장점으로 인하여 분산형 전원의 전력공급망 투입이 점점 증가되는 추세이며 전력시장 및 요금 체계에 대한 구조조정으로 인하여 확산될 전망이다.

## 2-5. 독립 전원(Stand Alone, Grid Isolated)

도시지방이나 전력공급망에서 멀리 떨어진 지역의 경우에는 전력망과 연계되지 아니한 독립적 분산형 전원이 전력망에 연결된 경우보다 훨씬 경제적이다. 예를 들어서 열병합시스템 소유주는 전력회사와 예비전력 가격 협상이 불가능한 경우 기존 전력을 사용하지 않을 수도 있다. 우리 나라의 대규모 공장에서는 대부분 자체 열병합설비에서 생산되는 전력으로 공장 내 전력수요를 충당하고 있다.

## 2-6. 성공 사례

미국 네브라스카주의 한 은행은 연료전지 발전시스템을 설치하여 정전으로 인한 컴퓨터 정지를 방지하게 되

었는데 그 투자비용은 1시간 정전시의 손해액에 불과했다. 포틀랜드의 대형 식품체인점은 정전 중에도 경쟁사는 문을 닫은 가운데 영업을 계속하여 매일 50000불에서 80000불을 절감할 수 있었다. 시카고의 맥도널드 햄버거 레스토랑은 천연가스 마이크로터빈 발전으로 매일 전력요금을 1500불 절감했다. 뉴욕 센트랄파크의 파출소는 최근 전자방범시스템 개선에 연료전지를 이용하여 타 개선안 대비 200,000불을 절감했다.

### 3. 분산형 전원 기술

전력회사 같은 에너지 공급자나 병원, 호텔 형태의 에너지 사용자는 여러 형태의 분산형 기술을 선택할 수 있다. 왕복동엔진이나 소형 가스터빈은 비상용이나 복합/병합형 에너지원으로 이미 널리 사용되어 왔으며, 최근에 개발된 연료전지, 마이크로터빈, 태양광전지기술 등도 분산형 에너지기술 범주에 속한다.

#### 3-1. 왕복동엔진(Reciprocating Engines)

천연가스, 휘발유, 경유를 연료로 사용하는 내연왕복동엔진은 자동차, 선박, 건설장비 등에 이용되는 잘 알려진 기술이다. 왕복동엔진은 주로 완전연소 및 연료회박 영역에서 운전된다. 완전연소 운전 시는 특수 촉매를 사용하여 NO<sub>x</sub>, CO 및 불완전연소 탄화수소 배출을 동시에 저감시킨다. 연료회박 운전시는 과잉공기의 유입으로 인하여 효율 및 출력이 증가되고 NO<sub>x</sub>는 감소된다. 또한 연료회박 운전시는 완전연소에 비하여 20~25% 정도의 연료가 절약된다.

우리나라에서는 분산형 발전기에 주로 디젤 엔진을 사용한다. 왕복동엔진의 장점은 초기 투자비용이 적으며, 가동이 쉽고, 신뢰성이 있고, 부하변동에 따른 운전이 용이하고, 열재생이 가능하다는 것이다. 또한, 최근 몇 년 동안 연소공정의 적절한 제어 및 촉매 개발로 인하여 왕복동엔진에서 배출되는 오염물질은 현저하게 줄어들었다. 이런 왕복동엔진은 10 MW 이하의 상업 및 공업용 에너지원으로 주로 비상용, 침투부하 및 열병합용으로 널리 이용되고 있다.

#### 3-2. 가스터빈(Gas Turbines)

가스터빈은 항공용, 선박용, 가스압축기 구동용, 발전용 등 그 사용도가 다양하며 수백 kW급부터 수백 MW급에 이르기까지 다양한 용량이 상용화되어 있다. 가스터빈은 사이클 구성에 따라 단순형(Simple Cycle), 재열형(Recuperated Cycle), 복합형(Combined Cycle)으로 구분될 수 있다. 단순형 가스터빈은 공기압축기, 연소기, 동력터빈으로 구성되어 있다. 재열형 가스터빈은 단순형

과 비슷하나 열교환기(Recuperator)가 첨가되어 배가스의 폐열로 유입되는 공기를 예열하므로 단순형에 비하여 효율이 증대된다. 반면에, 복합형 가스터빈은 폐열회수 증기발생기(Heat Recovery Steam Generator)가 첨가되어 가스터빈의 폐열로 증기를 발생시켜 증기터빈에서 동력을 얻으므로 발전효율이 단순형에 비하여 현저히 증가한다. 이 경우, 스팀 요구용량을 충족시키기 위하여 별도의 열원을 공급하기도 한다.

분산형 에너지원으로는 주로 1~30 MW급의 가스터빈이 이용되며, 미국의 경우 1999년에 500여기 구매되었고 그 중 3,500 MW가 전력생산용이다. 우리 나라에서는 가스터빈 운전 시 발생하는 고온의 배가스를 이용하여 스팀터빈으로 복합발전, 또는 폐열을 열병합이나 지역난방에 이용하고 있다. 연료로는 대부분 천연가스를 사용하며 다른 액체연료도 사용할 수 있다. 청정연료를 사용하므로 주된 공해물질은 NO<sub>x</sub>이며, 공기나 증기를 첨가하여 온도를 낮추거나 SNCR, SCR 등의 배가스 후처리 방법으로 NO<sub>x</sub>를 저감시킬 수 있다. 또한 유지비가 적게 들고, 폐열회수가 용이하다는 장점 때문에 열병합 및 복합발전용으로 많이 보급되고 있다.

#### 3-3. 마이크로터빈(Microturbines)

마이크로터빈은 소형 연소형 터빈으로 출력이 30~200 kW이나, 용량에 따라 직렬로 연결하여 대규모 요구를 충족할 수 있다. 현재 Honeywell(Allied Signal을 흡수), Capstone, Elliott, NREC(Northern Research and Engineering Corp.) 등에서 분산형 에너지시장에 대비하여 마이크로터빈이 생산되고 있다. 마이크로터빈 기술은 자동차나 트럭의 배기터빈 과급기(Turbocharger), 비행기의 보조동력용으로 개발되었으며, 최근에는 하이브리드 전기 자동차나 분산형 전력분야 응용이 시도되고 있다. 대부분의 마이크로터빈은 터빈 축이 100,000 rpm 정도로 회전하므로 발전기가 고속으로 회전하게 된다. 고주파 전력은 정류된 후 60 Hz로 변환되어 사용자에게 공급된다. 재열기를 이용하여 배가스의 폐열로 유입공기를 예열시키면 전력효율이 25~30% 정도 되는 것으로 알려져 있다.

마이크로터빈은 공기냉각 방식이고, 고속회전을 공기 베어링을 이용하여 해결할 수 있기 때문에 내부에 물이나 오일 순환장치가 필요하지 않다. 마이크로터빈은 소형이고 가벼우며 기존 엔진이나 터빈에 비하여 진동이나 소음이 적다. 또, 표 2와 같이 화석연료를 사용하는 전력생산 기술 중 NO<sub>x</sub> 배출이 가장 적어 규제가 점점 심화되는 미래에 적합한 기술이다. 표 2는 여러 기술들의 NO<sub>x</sub> 배출을 비교한 것이다.

대기오염 배출이 획기적으로 저감된 예로서, 도시운행

표 2. 에너지 기술별 NO<sub>x</sub> 배출 비교.

기술	NO <sub>x</sub> 배출량 (ppm)
왕복동엔진 (500 kW)	2,100
가스 터빈 (4.5 MW)	25
석탄화력 (500 MW)	200
마이크로터빈 (천연가스)	< 9

버스를 마이크로터빈을 장착한 하이브리드 전기자동차로 교체한 경우, 디젤버스에 비하여 대기오염물질이 4%만 배출된다고 알려져 있다. 이러한 환경 우수성으로 인하여, 이 기술은 상업용 전물이나 소규모 공장의 분산형 동력원 및 전원에 적합하다. 연료로는 대부분 천연가스를 사용하나 매립지 가스, 바이오 가스, 정유공장 부생가스 등 황 함유량이 많은 연료도 사용 가능한 것으로 알려져 있다.

### 3-4. 연료전지(Fuel Cell)

연료전지는 연료로부터 열에너지를 얻은 후 동력을 발생시켜 전기를 생산하는 기존 방식이 아닌 전기화학적 방법으로 직접 전기를 생산한다. 저장된 화학에너지로부터 동력을 생산하는 전지와는 달리, 연료전지는 음극에서 수소, 양극에서 공기 중의 산소가 전하 반응하여 전기가 생산된다. 수소연료는 여러 방법으로 얻을 수 있으나 천연가스의 개질 반응으로 공급하는 것이 가장 경제적이다. 전기화학 반응 매체로 쓰이는 전해질 종류에 따라 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell), 양자교환 멤브레인(Proton Exchange Membrane)으로 구별된다. 각각의 연료전지에 따라 개발되어야 할 기술들이 달라지고 또한 성능도 다르다. 인산형은 200 kW급의 상용화기술이 완결되어 이미 미국에서는 120 여기가 보급되었다. 용융탄산염과 고체산화물 연료전지는 현재 상용화 연구단계에 있으며 멤브레인형 연료전지는 초기 실증 단계에 있다.

연료전지는 화학반응에 의한 발전방식을 채택하므로 열기관에 비해 발전 효율이 높아 인산형은 35~40%, 용융탄산염과 고체산화물형은 60% 정도까지 가능하다. 연료전지는 원칙적으로 소음이 없으며 대기오염물질을 전혀 배출하지 않는다. 연료전지에서는 직류전원이 생산되므로 교류로 변환시켜 사용하여야 한다. 하지만 컴퓨터, 음성녹음기, 라디오 등 대부분의 기기들이 직류전원을 사용하므로 분산형 전원으로 연료전지를 이용할 경우 교류변환장치 없이 사용 가능하다. 현재는 연료전지 생산 가격이 높기 때문에 특정 대기오염 관리 지역이나 양질의 전력이 필요한 공장 등에 선별적으로 설치되고 있다.

인산형 연료전지를 모듈형태로 구성하면 원하는 용량

으로 상업용이나 주거용 전원으로 사용할 수 있다. 고온 적용이 가능한 용융탄산염과 고체산화물형은 대용량 열병합용으로 개발되고 있다. 미국에서는 에너지부 Vision 21 프로그램의 일환으로 SECA(Solid State Energy Conversion Alliance)라는 컨소시엄을 구성하여 고체연료 전지시스템의 개발에 박차를 가하고 있다. 연료전지 생산가격이 \$400/kW 이하로 주로 발전용 수요에 중점을 두고 있으며 발전효율이 높기 때문에 CO<sub>2</sub> 배출을 현저하게 감소시킬 수 있고 그 이외의 공해물질은 거의 배출되지 않는다. 이 개발사업의 중점은 5 kW급 연료전지 모듈 개발로 대량 생산이 가능하여 가정용이나 보조동력용으로 이용도 가능하다. 이 모듈은 전지와 같이 손쉽게 연결되어 용량에 따라 요구되는 연료전지 스택이 필요 없다. SECA의 최종 개발목표는 상업용/공업용 또는 발전소급 MW 규모의 연료전지 시스템 개발을 획득하는 것이다.

### 3-5. 태양광전지(Photovoltaics)

태양광전지는 태양에너지를 직접 전력으로 변환시키는 장치로서 태양이 비치는 곳은 어디에나 모듈 형태로 설치할 수 있다. 태양광전지 시스템은 소음 및 공해물질 배출이 전혀 없고 재생 가능한 태양에너지를 이용하기 때문에 연료비가 전혀 들지 않는다는 점이다. 그러나 설치비가 많이 들기 때문에, 대기오염 특별관리 지역이나 도서지방같이 전력공급망이 없는 지역에 국한하여 설치되고 있다.

전술한 분산형 에너지기술들은 넓은 의미의 에너지/수요 공급시장에서는 서로 경쟁적인 역할을 하지만 기술에 따라 구별되는 서로 다른 에너지시장을 확보하고 있다고 할 수 있다. 발전기술 경제성 평가는 초기투자비, 발전효율, 연료비, 유지보수비, 가동률 등에 의존된다. 또한 발전소 부지 선정은 용량, 크기, 오염물 배출, 소음 등에 의해 결정된다. 분산형 기술들의 경제성 및 개발 현황을 표 3에 비교하였다.

### 3-6. 하이브리드 시스템(Hybrid System)

상기 분산형 기술들을 조합하면 효율이 우수한 분산형 전원을 구성할 수 있는데, 그 중에서 연료전지-터빈 하이브리드 시스템이 가장 유망한 기술로 알려져 있다. 미국 에너지성에서는 앞으로 전세계 에너지시장에서 채택될 기술인 220 kW급 고체산화물-마이크로터빈 하이브리드 시스템을 구축하여 연구개발하고 있다. 이 시스템은 Siemens Westinghouse 기술진에 의하여 만들어져서, 실수요자인 Southern California Edison에 의해 앞으로 1년 동안 상용화 적합성 시험을 수행할 예정이다. 현재 발전효율 (천연가스 발열량 대비 전력 변환율)은 55%로

표 3. 분산형 발전 기술들의 경제성 및 개발 현황.

Table 1  
Economic Comparison of Distributed Generation Technologies

Technology Comparison	Diesel Engine	Gas Engine	Simple Cycle Gas Turbine	Microturbine	Fuel Cell	Photovoltaics
Product Rollout	Commercial	Commercial	Commercial	1989-2000	1996-2010	Commercial
Size Range (kW)	20-10,000+	50-5,000+	1,000+	30-200	50-1000+	1+
Efficiency (HHV)	36-43%	28-42%	21-40%	25-30%	35-54%	n.a.
Generator Package Cost (\$/kW)	125-300	250-600	300-600	350-750*	1500-3000	n.a.
Turnkey Cost - no heat recovery (\$/kW)	350-500	600-1000	650-900	600-1100	1900-3500	5000-10000
Heat Recovery Added Costs (\$/kW)	n.a.	\$75-150	\$100-200	\$75-350	incl.	n.a.
L3M Cost (\$/kWh)	0.005-0.010	0.007-0.015	0.003-0.008	0.005-0.010	0.005-0.010	0.001-0.004

\*Commercial target price

자료출처 : GRI, The Role of Distributed Generation in Competitive Energy Markets, 1999.

기존 석탄화력의 35%, 천연가스 복합화력의 50%에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다. 하이브리드 시스템의 핵심기술은 세라믹 튜브 집합체로 구성된 고체산화물 연료전지로서 220 kW급 시스템은 1152개의 튜브로 구성되어 200 kW의 전력을 충당한다. 가압 상태에서 시험할 예정인데 고온 고압의 배기가스를 이용하여 마이크로터빈에서 20 kW의 전력을 얻게 된다.

하이브리드 시스템에 사용되는 천연가스는 황 성분이 거의 없으므로 SO<sub>x</sub> 배출이 거의 없고, 배가스 중 NO<sub>x</sub> 농도는 0.5 ppm으로 최신 가스터빈에 비해 50배 적게 배출된다. 이러한 하이브리드 시스템의 고정정 배출 특성으로 인해 앞으로 대기오염 특별관리 구역에서 이 시스템의 설치가 활발할 것으로 예상된다. 전력생산 시스템의 수명은 수십년 정도이므로 약간의 효율 증대도 경제적 및 환경적으로 상당한 영향을 미친다. 이 시스템은 하이브리드 기술개발로 인하여 효율이 70%까지 도달할 것으로 예상되고 있다. 발전효율 증가는 CO<sub>2</sub> 저감과 직결되므로, 천연가스 하이브리드 시스템의 70% 효율은 기존 석탄화력발전과 비교하면 CO<sub>2</sub> 배출을 3/4, 천연가스 터빈 발전과 비교하면 1/3 저감시키는 것에 해당된다. 220 kW 하이브리드 시스템 외에도 캐나다에서는 열병합용으로 250 kW급을 개발 중이고, 미국 에너지성에서는 2002년부터 1 MW급 연료전지 마이크로터빈 시스템의 연구를 착수할 계획이다.

### 3-7. 미국의 연구개발 정책

현재는 국립재생가능에너지연구소가 (NREL) DOE의

연구개발 활동들을 주도하고 있다. 태양광, 풍력, 연료 전지, 마이크로터빈 등의 분산형 발전, 전력 저장, 부하 제어 전력계통의 통합에 필요한 기술과 정책 개발을 지원하며 국립연구소와 산업계 파트너의 협동으로 전략연구, 시스템통합, 규제/제제 장벽 완화의 3개 분야의 활동이 추진되고 있다. 전략연구 분야에서는 분산형 발전을 최적 통합시키기 위한 새로운 운전개념, 전력저장 기술, 기존 전력망과 연계된 부하 제어를 연구하고 있다. 시스템통합 분야에서는 분산형 발전과 전력저장을 전력계통으로 통합시키며 개재되는 안전성, 신뢰성, 품질 문제를 연구하고 있다. 또한 많은 분산형 발전기들이 천연가스를 사용하므로 천연가스 공급계통과 전력공급계통의 통합 관련 문제점들을 연구하고 있고, 규제/제제 장벽 완화 분야에서는 산업계, 주정부, 연방정부 조직과의 협력으로 기존의 정책, 규제와 비즈니스 관행이 분산형 발전에 미치는 불필요한 장벽들을 제거하기 위한 연구를 하고 있다.

## 4. 분산형 전원과 기존 전력망간의 인터페이스

분산형 발전에서 인터페이스란 분산형 발전기와 기존의 상용 전력망과의 연계를 말하나 근래에 와서는 이러한 일반적이고 물리적 의미 이외에 시장이라는 새 차원의 인터페이스가 포함된다. 물리적 인터페이스에는 분산형 발전기와 연료, 전력 인프라와의 연계가 포함된다. 어떤 분산형 발전 방식은 분산형 발전 시스템을 제어, 감시하는 중앙기관과 통신 인터페이스를 지니기도 한다. 물

리적 인터페이스에서 거론되는 문제점들은 주로 안전성, 프로토콜, 계통 영향, 신뢰도, 규격표준, 검침에 관한 것들이다. 시장 인터페이스는 분산형 발전소나 이의 소유주가 시장에서 다른 전력 공급자들과 상호작용 또는 경쟁하는 가운데 사업과 운전상의 결정을 내리는 것을 포함한다. 인터페이스의 복잡성은 분산형 발전소 또는 그 소유주와 배전회사 사이에 필요한 상호작용의 정도가 클수록 증가한다.

분산형 전원과 기존 전력망간의 인터페이스에서 관심사는 전력망의 고신뢰도를 유지하고 안전성을 유지하며 기존의 요건을 더욱 효율적으로, 투명하게, 표준형으로 개선이 가능한지 여부이다. 규제당국과 입법자들은 이 매우 복잡한 기술적, 상업적인 쟁점들을 모든 이해 당사자들에 공정하게 해결하기 위해서 매우 균형된 절충들을 해야 한다. 비록 전력회사와 분산발전 사업자 모두가 완전히 만족할 명확한 해법은 없겠지만 표준화와 제3자 개입이 주요 해결 경로이다. 기술적 요건, 사업과정, 계약에 대한 국가 표준은 문제 해결에 가치가 있을 것이다. 모두가 만족하기 위해서는 모든 이해당사자들의 참여가 핵심은 의심의 여지가 없다. 고객, 분산 발전사업자, 전력회사도 아닌 제3기관이 문제의 해결책 도출과 이행에 한 역할을 할 수도 있을 것이다.

전력망과의 연계는 가장 복잡한 인터페이스로서 여러 쟁점의 근원이다. 연계라는 용어는 동기화 운영 또는 병렬 운영과 같은 의미로 종종 쓰인다. 이 경우에는 분산형 발전기가 발전을 할 때 전력망에 연결되어 있다. 전력망 연계에 관한 토의와 논쟁들은 기술적인 문제에 집중되어 왔다. 기술적인 문제란 비용효과적인 연계가 전력계통의 안전성과 신뢰성 저해 없이 가능한 표준의 개발 가능성이다. 여기에 추가하여 분산형 발전의 투입, 검침, 통신, 제어에 대한 기술 수요에 대비한 새로운 기술 요건들을 개발해야 한다.

DOE는 IEEE의 표준위원회를 통해서 산업계와 협력하여 P1547 "Standard for Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems" 개발 자금을 지원하고 있다. 이 표준에는 분산형 발전원과 기존 전력망의 연계에 대한 성능, 운영, 시험, 안전, 유지보수 관련 상세 요건이 수록될 것이다. 1999년 IEEE의 표준위원회는 전력망과 분산형 전원의 연계 표준을 개발하기로 결정하였고 IEEE SCC21 위원회가 실무를 담당하고 있다. 개발기간을 통상 개발 기간의 절반 정도인 2년-3년으로 단축 시도하고 있다. 2000년 1월 IEEE 표준위원회는 10 kW 미만 태양광발전의 전력망 연계에 대한 표준인 IEEE std 929-2000 "Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems"을 승인하였다.

## 5. 문제점과 전망

### 5-1. 문제점

미국의 경우를 보면 기존의 방식과의 차이가 주는 잠재적 이득과 위험도에 대해서 이미 주 정부들과 연방정부, 의회에서는 많은 논의가 이루어지고 있다. 특히 경쟁을 유도하고 경제적 효율을 증진하면서 안전성과 전력망 신뢰성을 확보해야한다는 것이 쟁점이다. 이는 분산형 발전이 시장을 경쟁체제로 개편할 수는 있지만 전력망 내로 성공적으로 통합되기 이전에 많은 기술적 문제들을 해결해야 하기 때문이다.

즉, 분산형 발전도 여러 가지 중요한 기술적, 정책적 우려의 대상이며 모든 경우에 최적의 해법은 아니다. 미국의 경우 시장과 인프라의 변동이 극심하며 따라서 분산형 발전은 각 지역의 특성이 고려되어야 한다. 또한 분산형 발전이 전력망의 건전성을 보호하고 기존의 인프라와 투자에도 불구하고 경제성을 유지할 수 있는지가 쟁점으로 부상하였다. 전력산업의 구조개편은 여러 지역에서 전력 시장의 질서가 바뀌는 것인데 분산형 발전이 이러한 개혁을 다소 복잡하게 만든다. 수용가에게 투명하고 분산형 발전 사업자나 배전사업자에게 부당한 부담을 주지 아니하는 연계 과정의 개발이 중요 쟁점인 것이다. 안전성과 신뢰성을 유지하며 효율을 창조하고 기존 과정을 매끄럽게 만드는 것은 소형 발전기일수록 만만치 아니한 과제이다. 전력망 연계 계약에 있어서 주된 쟁점은 표준 계약 요건들의 복잡성과 적합성이다. 분산형 발전기 소유주와 전력회사간의 연계 계약은 대형 집중식 발전사업자와 전력회사간의 계약과 많은 점에서 유사하지만 소형발전기에는 부적합하다.

### 5-2. 전망

미국의 주정부와 연방정부의 정책 결정자들은 전력산업을 획기적으로 개편하여 소비자 전력요금을 줄이는 방안을 강구하고 있다. 아직은 구조개편의 결과가 명확하지는 않지만 분산형 발전을 긍정적으로 만드는 조짐들이 생기고 있다. 전력 소매 시장을 개방하며 여러 경쟁사들이 분산형 발전이 포함된 신상품과 서비스를 내놓고 있다. 운영 실적에 따라서 전력요금을 규제받고 있는 전력회사로서는 분산형 발전을 활용하면 자산 활용도를 개선할 수가 있다. 전력 관련 서비스들이 분리되고 실시간 전력요금 책정이 보편화된 경쟁체제에서는 분산형 발전이 경제적 인센티브를 지닌다.

분산형 발전의 활용 모습은 전력산업계가 개방화 과정을 거치며 진화할 것이므로 현재와는 다른 모습을 미래에 지니게 될 것이다. 1990년대 초반부터 왕복동 엔진과 가스 터빈들이 급속히 출현하였다. Arthur D. Little



사의 조사에 의하면 1990년대 초부터 지금까지 연 평균 7%로 꾸준히 성장해왔고 이들의 1999년도 시장 규모는 20 MW 미만을 기준으로 5,000 MW에 달했으며 1990년대 초부터 2005년까지의 연 평균 성장률은 기저 부하용의 경우 11%로 첨두부하용의 경우 17%로 예상된다. 또한 당초에는 예비용으로 설치한 것도 첨두부하용으로 재편성할 수가 있다.

Frost & Sullivan사는 왕복동엔진과 가스터빈(500 kW-10 MW), 마이크로터빈(20 kW-500 kW)의 시장규모는 1997년의 11억불에서 2004년에는 22억불에 도달할 것으로 예측하며 전력회사가 투자회수를 더 이상 보장받지 못하게 되었으므로 가격과 서비스로 경쟁하여야 하고 따라서 고객을 유지하려면 고객에게 저렴한 전력을 공급할 수 있는 전략이 필요하며 이러한 전략의 일환이 수요지 발전이라고 주장하였다. 분산형 발전은 기업의 경우 예비 전력으로의 역할이 추가 될 것이다. 그러나 기업의 전력 공급 신뢰도에 대한 우려가 점점 늘어나고 있는 반면 천연가스 터빈이 점점 경량화, 고효율화되면서 기존의 상용전력 대비 경쟁성이 생겼고 또한 환경친화적이기 때문에 더 많은 기업이 기저부하용으로 천연가스 터빈을 사용할 것으로 예상된다. 2004년까지는 시장이 두 배로 커지지만 그 이후 북미에서의 시장규모에 대해서는 이견이 많다. 그 이유는 분산형 발전이 아직은 비싸고 설비 제작자들이 주장하는 비용이득을 달성하지 못할 것이고 시장개방에 따라 기존 전력망의 전력요금이 인하되면 분산형 발전의 매력은 떨어질 것이라는 데 있다. 또한 EPA가 마이크로터빈이 저공해 기술이라고 인정하기 전에는 인허가 비용이 종전의 대형 장치와 마찬가지로이기 때문이다. 그리고 아직은 전력망이 분산될 수 많은 소규모 발전소들을 통제하기에는 동기화 문제, 정보체계 등 운영상의 문제가 있다.

GRI는 소규모 분산형 발전은 장기적으로는 미국 뿐 아니라 전세계적으로 시장 기회가 막대하나 단기적으로는 전력회사 구조조정 같은 쟁점들 때문에 시장 침투가 다소 제한적일 것으로 전망했다. GRI는 또한 미국의 경우 2015년까지 관련 자본재 시장은 100억불이 될 것으로

전망했다.

## 6. 결 언

분산형 전력공급 시스템의 미래는 아직 불확실하나, 이 기술로 인하여 에너지 생산, 발전, 공급 및 사용측면에서 혁신적인 패러다임 전환이 온다는 사실이 확실시되고 있다. 분산형 시스템의 요소기술인 연료전지, 마이크로터빈 등의 고효율 및 환경적 측면에서의 우수성으로 패러다임 전환이 에너지 공급/수요 시장에서 촉진될 것이다.

분산형 발전은 전력 공급 시스템의 설계, 운영과 전력산업계의 특성을 구조적으로 바꿀 잠재성을 지닌다. 반면 미래에는 통신과 시간간의 인터페이스에 가장 급격한 변화가 올 것이다. 분산형 발전이 복잡한 가격신호에 대응하고 전력시장에 참여하기 위해서는 시스템의 개발과 관련 표준, 프로토콜의 개발을 필요로 할 것이다. 분산형 발전이 지니는 잠재력을 심본 실현하고 이득을 극대화하기 위해서는 시장 진입 확대, 배전 시장 창출을 통해서 시장 인터페이스를 개선해야 한다. 이를 위해서는 신뢰성 있고 비용효과적인 분산형 발전 인터페이스를 구축해야 한다. 이 인터페이스 문제가 해결되지 아니하면 분산형 발전은 흥미만 돋우었지 실용적이지는 못한 또 하나의 기술이 되고 말 것이다.

## 참고문헌

1. 정근모, 김영창, 김형택 외: 분산형 전원의 대처방안 수립에 관한 연구. 아주대학교 에너지시스템 연구센터/한국전력공사 (1994. 10).
2. ARTHUR D. LITTLE, Distributed Generation: Policy Framework for Regulators (2000).
3. ARTHUR D. LITTLE, Distributed Generation: System Interfaces (2000).
4. GRI, The Role of Distributed Generation in Competitive Energy Markets (1999).
5. <http://www.eren.doe.gov/distributedpower/>.