ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 3, pp. 375~383, 2015
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.3.375

스마트그리드 하에서 가상발전소의 전력시장 참여를 위한 제도적 선결요건에 관한 제언

A Proposal of Institutional Prerequisites to the Participation of Virtual Power Plant in Electricity Market under the Smart Grid Paradigm

정 구 형* · 박 만 근** · 허 돈†
(Koo-Hyung Chung · Man-Geun Park · Don Hur)

Abstract - The virtual power plant (VPP) is a new technology to achieve flexibility as well as controllability, like traditional centralized power plants, by integrating and operating different types of distributed energy resources (DER) with the information communication technology (ICT). Though small-sized DERs may not be controlled in a centralized manner, these are more likely to be utilized as power plants for centralized dispatch and participate in the energy trade given that these are integrated into a unified generation profile and certain technical properties such as dispatch schedules, ramp rates, voltage control, and reserves are explicitly implemented. Unfortunately, the VPP has been in a conceptual stage thus far and its common definition has not yet been established. Such a lack of obvious guidelines for VPP may lead to a further challenge of coming up with the business model and reinforcing the investment and technical support for VPP. In this context, this paper would aim to identify the definition of VPP as a critical factor in smart grid and, at the same time, discuss the details required for VPP to actively take part in the electricity market under the smart grid paradigm.

Key Words : Distributed energy resources (DER), Electricity market, Information communication technology (ICT), Smart grid, Virtual power plant (VPP)

1. 서 론

스마트그리드는 기존의 전력망에 정보통신기술 (information communication technology, ICT)을 접목해 전력공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화하는 차세대 전력망으로, 중앙집중적이고 단방향성인 기존 전력계통의 비효율성을 극복하기 위해 분산형 에너지원 (distributed energy resource, DER) 시스템을 핵심 요소로 적용하고 있다[1]. 따라서 스마트그리드 하에서의 전력계통은 수요반응 (demand response, DR)과 신재생전원 (renewable energy source, RES)을 중심으로 하는 다양한 분산형 에너지원이 도입되어 규모에 따라 분산적이고 독립적으로 운영할 수 있는 유연한 형태를 갖추게 되며, 소비자 측의 모든 전기기기와 네트워크로 연결되어 전력 공급자와 소비자 간의 상호작용이 가능해진다.

분산형 에너지원은 미래의 스마트그리드 시장을 구성하는 기본 단위지만 그 자체만으로는 계통연계와 전력거래를 수행하기에는 한계가 있다. 특히, 신재생전원 출력 제어의 어려움으로 인해 필요한 시점에 전력을 생산하는 것이 불가능할 수 있으며, 이는 결과적으로 전압 및 주파수 이상에 따른 전력품질의 저하를 야기할 수 있다. 더불어 신재생전원의 불확실한 발전량은 적정 규모의 전력망 투자와 효율적인 운영에 있어서 어려움을 초래할 수도 있다[2]. 또한 분산형 에너지원은 그 규모가 작고 설치대수가 매우 많아 이를 개별적으로 감시하거나 관리할 수 없기 때문에, 전력거래와 계통운영을 위한 가시성이 부족하여 개별 분산형 에너지원이 단독으로 현행 전력시장에 참여하는 것은 현실적으로 불가능하다[3].

가상발전소 (virtual power plant, VPP)는 이러한 문제를 해결하기 위한 대표적인 방법으로, 다양한 유형의 분산형 에너지원을 정보통신기술을 이용하여 통합 운영함으로써 중앙급전발전기와 유사한 운영상의 유연성과 제어가능성을 실현하기 위한 기술이다[4]. 실제로 소규모 분산형 에너지원은 중앙에서 관리가 불가능하지만, 이들을 하나의 발전 프로파일로 통합하여 계획발전량, 증·감발률, 전압제어 능력, 예비력 등을 가시화하면 중앙급전발전기로의 활용뿐만 아니라 전력시장에서의 전력거래 또한 가능하게 된다.

미국과 유럽연합 (European Union, EU)을 중심으로 가상발전소에 대한 연구가 활발하게 추진되고 있기는 하지만, 미국과 EU의 가상발전소 개념은 도입 목적 및 주요 구성요소에서 미묘한

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Korea.
E-mail: dhur@kw.ac.kr
* Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Korea.
** Korea Power Exchange (KPX), Korea.
Received : October 08, 2014; Accepted : December 25, 2014

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

표 1 EU 내 가상발전소 실증 프로젝트 개요

Table 1 Review of virtual power plant (VPP) demonstration projects in European Union

프로젝트명	통합 목적	가상발전소 역할	제어방법	통신
VFCPP (Virtual Fuel Cell Power Plant): 29기의 분산형 연료전지 기반 마이크로 열병합발전기를 통합한 VPP 실증 프로젝트	기술적 목적 첨두부하 감축 사전에 지정한 부하 프로파일 추종 운전	중앙제어관리자	중앙제어	양방향 통신: 인터넷 VPN (Virtual Private Network) 채널 단방향 통신: RRC (Radio Ripple Control)
PowerMatcher 기반 VPP: multi-agent 기반 분산형 에너지원 제어기술 적용	기술적 목적 첨두부하 감축 등	전력가격 공지 agent	분산형 시장 기반 제어	양방향 통신: UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) 무선 네트워크
	상업적 목적 현물시장에 입찰	내부시장 운영자; 외부 전력시장의 시장참여자		
FENIX (Flexible Electricity Network to Integrate the eXpected 'energy evolution') VPP: 유럽 내 대규모 VPP 실증 프로젝트	기술적 목적 대기 예비력 제공 전압제어 서비스 제공 혼잡 해결	중앙제어관리자	중앙제어	양방향 통신: GPRS (General Packer Radio Service) 및 IEC (International Electro-technical Commission)-104 프로토콜
	상업적 목적 1일전 전력시장 참여 보조서비스 시장 참여	내부시장 운영자; 외부 전력시장의 시장참여자	분산형 시장 기반 제어	
EDISON VPP: 전기자동차 통합을 고려한 VPP 실증 프로젝트	기술적 목적 수급균형 서비스 제공 전기자동차 집단에 대한 비용효과적인 제어 기능 제공	중앙제어관리자	중앙형 시장 기반 제어	IEC 61850 기반 양방향 통신
ProVipp (Professional Virtual Power Plant): 총 8.6 MW의 9기 수력발전소를 통합한 Siemens의 DEMS (Decentralized Energy Management System)에 대한 실증 프로젝트	상업적 목적 전력시장 참여 예비력 시장 참여	중앙제어관리자	중앙형 시장 기반 제어	양방향 무선통신

차이를 보이고 있다. 미국에서의 가상발전소 개념은 전적으로 수요반응을 기반으로 하고 있다. 이는 미국이 전 세계에서 가장 성숙한 수요반응 시장을 보유하고 있기 때문이다. 따라서 미국의 가상발전소 개념은 다양한 유형의 수요반응 자원을 통합하여 기존의 발전기 속성을 복제함으로써 비상시 첨두용량, 유효전력 및 순동예비력과 같은 계통보조서비스를 제공하는 것을 목적으로 한다. 이미 미국 내에는 EnerNOC과 Comverge 등의 민간 기업을 중심으로 통신망을 이용하여 수요반응 자원을 원격 제어하는 NOC(Network Operation Center) 형태의 부하관리사업 모델이 활성화되어 있는 상황에서, 가상발전소를 통해 가격신호에 반응하여 사전에 계획된 운영전략에 따라 자동으로 수행되는 실시간 수요반응 (DR 3.0) 형태로의 변화를 도모하고 있다[4]. 한편, Portland General Electric (PGE)는 수요반응이 아닌 소비자 소유의 비상발전기를 통합하여 첨두부하 감축에 이용하는 Dispatchable Standby Generation (DSG) 프로그램을 통해 자체적인 가상발전소 모델을 운영하고 있다. 현재 PGE는 미국 Oregon 주의 21개 소비자 구역 내 32개 발전기로 구성된 45 MW 규모의 DSG 시스템을 운영하고 있는데, 이는 연료전지, 폐수처리장 내 마이크로 터빈, 태양광 및 가스터빈을 연계하여 구성한 가상발전소로, 도매전력시장가격이 매우 높게 상승하는 경우 PGE에 전력을 공급함으로써 첨두부하 시 전력구매비용을 절감하는데 기여하고 있다[5]. 반면 EU에서는 특히, 독일과 덴마크를 중심으로 다양한 가상발전소 실증 프로젝트를 수행함으로써, 관련 기술 분야를 주도하고 있다. 표 1은 EU에서 수행한 대표적인 가상발전소 실증 프로젝트에 대한 개요를 제시하고 있다[6].

한편, 유럽연합에는 또 다른 형태의 가상발전소가 존재하는데, 경매를 통해 발전사업자의 용량 일부에 대한 권한을 다른 시장참여자에게 이전하는 것이다. 즉, 기존의 발전사업자는 발전소에 대한 소유권은 계속 유지하지만, 경매로 이전된 발전용량에 대한

운영 권한은 이를 구매한 시장참여자가 보유하는 것을 의미한다. 이러한 유형의 가상발전소는 2005년 DONG Energy가 덴마크 전력공급업체인 Elsam과 Energi E2를 인수 합병할 당시, DONG Energy의 시장지배력을 억제하기 위해 규제기관이 2006년에 250 MW의 발전용량에 대한 이용권한을 경매로 처분하도록 명령한 것을 그 기원으로 한다. 이후, 2007년에는 500 MW의 발전용량에 대한 이용권한을 경매하였으며, 2008년부터는 600 MW로 증가하였으며[7], 2014년 5월에 종료되었다. 이러한 유형의 가상발전소는 일반적으로 화석연료를 기반으로 하는 기존의 대규모 중앙급전발전기로 구성된다는 점에서 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다.

그러나 전 세계적으로 가상발전소에 대한 공통된 정의 및 DER 통합과 관련된 명확한 규정이 수립되어 있지 않기 때문에 가상발전소에 대한 기술지원, 투자 및 사업 모형 구축에 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 논문에서는 스마트그리드 핵심기술 중의 하나인 가상발전소에 대한 정의를 제안하고 스마트그리드에서 가상발전소의 전력시장 참여에 필요한 선결요건에 대한 분석을 논의함으로써 향후 가상발전소 개발전략과 상용화를 위한 기초를 마련하고자 한다.

2. 가상발전소의 정의 제안

2.1 가상발전소 도입 배경

전통적인 전력계통 체계에서는 주로 고압 송전망에 연결된 대규모 중앙급전발전기로부터 생산된 전력을 저압 배전망을 통해 최종소비자에게 공급한다. 수십 년 간 변하지 않은 이러한 형태의 중앙집중적이고 일방적인 전력공급 구조는 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

- 상대적으로 낮은 에너지 효율: 발전, 송전 및 배전계통을 통해 최종소비자에게 전력을 공급하는 동안 1차 에너지의 약 60%가 폐열의 형태로 손실된다[8].
- 과도한 탄소배출 수준: 아직까지는 화석연료 발전소가 대부분의 전력수요를 감당하고 있기 때문에, 전 세계 탄소배출량의 많은 부분이 전력을 공급하는 과정에서 발생하고 있다[9].
- 발전입지의 제약: 대규모 발전소를 건설할 수 있는 입지는 제한적이며, 이에 따라 발전소가 특정 지역에 집중됨으로써 발생할 수 있는 송전혼잡 문제에 대비하여 상당 규모의 예비 공급능력을 확보해야 한다.
- 수동적인 배전망 운영: 현재의 수동적인 배전망 운영체계에서는 배전단에 연결된 수요측 자원을 계통 운영에 반영하기에는 한계가 있다.

최근에는 기존의 전력공급 방식을 보완하기 위해 분산전원(distributed generation, DG)을 적극적으로 전력계통에 도입하고 있다. 분산전원은 수요지 인근에 중·소규모로 설치되기 때문에, 필요한 지역에 필요한 규모로 단기간에 설치가 가능하다. 또한 분산전원은 수요지 근처에서 직접 전력을 공급하기 때문에, 송전손실로 인한 전반적인 에너지 손실을 크게 감소시킬 수 있으며, 이로 인해 송전계통의 부하를 완화함으로써 전력설비 보강 및 확장에 필요한 투자를 지연 또는 회피할 수 있게 한다. 일반적으로 분산전원은 짧은 시간 내에 발전기 기동이 가능하기 때문에 배전망의 단기간 안정화에 기여할 수 있으며, 전력 부족 시에는 추가 발전으로 최대수요에 유연하고 효과적으로 대처함으로써 계통신뢰도와 전력품질을 향상시키는 데 활용될 수도 있다[10]. 한편, 대부분의 분산전원은 풍력발전과 같은 신재생전원이나 열병합발전 (combined heat and power, CHP)과 같은 고효율 발전기로 구성되기 때문에, 분산전원은 탄소배출 저감 및 에너지 효율 향상을 통한 지속가능한 발전을 가능하게 하는 요소기술로 인정받고 있다[11].

분산전원 기술은 계속 소형화되고 있으며, 그 결과 주택용 및 소규모 상업용으로 이용이 가능한 수준까지 확대되었다. 이러한 소규모 분산전원 기술을 보다 큰 규모 (수백 kW에서 수백 MW)의 분산전원 기술과 구분하기 위해, 소규모 분산전원, 제어가능부하 (controllable load) 및 에너지저장장치 (energy storage system, ESS)를 하나로 묶어 분산형 에너지원이라고 한다. 일반적으로 250 kW 이하의 분산형 자원들을 분산형 에너지원으로 분류한다[12]. 마이크로 열병합발전 (μ-CHP), 태양광 (photovoltaic, PV) 패널 및 전기자동차 (electric vehicle, EV) 등의 다양한 분산형 에너지원 기술은 아직까지는 대부분의 소비자에게는 고가의 설비이지만, 정부의 정책지원과 기술혁신으로 인해 분산형 에너지원의 보급은 지속적으로 확대되고 있다[13-14].

분산형 에너지원의 보급이 확대되면 이와 같은 상당 수준의 편익을 달성할 수 있을 것으로 예상되지만, 아직까지는 기존 중앙급전발전기에 비해 분산형 에너지원의 발전비용은 높은 편이며 운영 측면에서도 해결해야 할 다수의 기술적 난제들이 존재한다. 예를 들어, 특정 지역의 분산형 에너지원 발전용량이 해당 지역의 수요를 초과하게 되면 전력망 내 역조류를 야기하게 된다. 이러한 역조류는 전력망 내 혼잡을 초래할 뿐만 아니라 적정 수준의 전압 유지를 어렵게 하며, 사고 발생 시에는 기존의 보호협조 체계로는 해결할 수 없는 상황이 발생할 가능성 또한 존재한다. 이와 같은 기술적 문제로 인해 현재는 분산형 에너지원 연계 시 단순 연계용량제한 (fit & forget) 방식을 적용하고 있다. 이는 과거의 수동적인 배전망 운영 환경에는 적합하지만, 분산형 에너지원의 효율적 이용을 제한할 뿐만 아니라 배전설비에 대한 투자비용 상승과 불충분한 투자유인을 야기하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 분산형 에너지원이 기존의 대규모 중앙급전발전소의 역할을 대체할 수 있도록 현재의 전력 및 정보통신설비를 개선하고 효과적인 연계방안을 수립해야 하며, 안정적인 계통운영을 지원할 수 있는 제어 전략을 수립해야 한다. 이는 수백 기의 중앙급전발전기를 대상으로 하는 중앙제어 개념에서 수십만 기의 발전기와 제어가능부하의 운영에 적합한 새로운 분산제어 패러다임으로의 변화를 의미한다.

이러한 패러다임의 변화를 실현할 수 있는 대표적인 분산형 에너지원 연계 전략이 바로 마이크로그리드와 가상발전소이다. 마이크로그리드는 다수의 분산형 에너지원과 부하의 집합체로서, 기존의 전력망에 연계 또는 분리되어 독립운전 할 수 있는 소규모 전력망이다[15]. 반면, 가상발전소는 아직까지 공통된 정의는

존재하지 않지만, 진보된 정보통신기술을 기반으로 구성된 “에너지 인터넷”으로 표현할 수 있다. 이는 지역적으로 산재한 분산형 에너지원에 대한 협조 운전을 통해 최종소비자와 전력계통 운영자 모두의 편익을 극대화하는 것을 목적으로 한다. 문자 그대로, 마이크로그리드는 내부의 발전, 수요 및 전력망 설비 모두를 관리하는 반면, 가상발전소는 단지 발전원에 대해서만 고려한다. 그러나 두 가지 개념은 배전단에서 분산형 에너지원을 통합한다는 동일한 특성을 가지고 있기 때문에, 가상발전소는 마이크로그리드의 집합체로 간주할 수 있으며, 반대로 사전에 정의된 운영체계에 따라 그 기능을 수행하는 가상발전소와 유사한 개체가 마이크로그리드에 포함될 수도 있다.

2.2 가상발전소의 기술적 특성

가상발전소는 배전단에서 수요반응, 분산전원 및 에너지저장장치를 포함한 다양한 분산형 에너지원을 통합 운영한다는 측면에서 마이크로그리드와 유사한 개념이라고 할 수 있다. 일부에서는 마이크로그리드가 전력회사 또는 계통운영자에게 어떠한 서비스를 판매하게 되면 마이크로그리드가 궁극적으로 가상발전소가 된다고 주장하기도 한다[16]. 일반적으로 가상발전소와 마이크로그리드 사이에는 상당 수준의 공통적인 특성을 공유하는 것으로 추정하고 있다[4]. 그러나 이러한 두 기술 플랫폼 사이에는 다음과 같은 차이점 또한 존재한다.

- 마이크로그리드는 기본적으로 독립운전을 목적으로 하며 연계운전 또한 가능한 반면, 가상발전소는 반드시 계통과 연계되어야 한다.
- 마이크로그리드는 필요시 상위 계통에서 절체할 수 있지만, 가상발전소는 이러한 상황을 고려할 수 없다.
- 마이크로그리드는 일반적으로 적정 수준의 에너지저장장치를 필요로 하지만, 가상발전소에서는 에너지저장장치의 참여 여부가 필수요건은 아니다.
- 마이크로그리드는 좁은 지역 내에 고정된 자원 집단을 대상으로 하는 반면, 가상발전소는 보다 넓은 지역에 산재한 다양한 자원을 통합할 수 있다.
- 마이크로그리드는 일반적으로 소매 배전 수준에서만 분산형 에너지원을 활용하는 반면, 가상발전소는 도매전력시장에서 분산형 에너지원을 활용하는 것을 목적으로 한다.

결과적으로, 마이크로그리드와 가상발전소의 근본적인 차이는 마이크로그리드가 최종소비자 수준에서의 수급균형에 초점을 맞추고 있는 반면, 가상발전소는 도매전력시장에서 전력거래를 통해 계통 수준의 수급균형에 기여하는 것을 목적으로 한다는 데 있다. 이러한 가상발전소와 마이크로그리드 개념 사이의 차이에 기초하여 가상발전소의 기술적 특성을 정리하면 다음과 같이 나열할 수 있다.

- 가상발전소는 중앙급전발전기로서 계통운영에 참여한다.
- 가상발전소의 구성요소로서 수요반응 및 에너지저장장치가 필수적인 것은 아니며, 계통운영자 관점에서의 제어가능 여부가 오히려 중요하다.
- 가상발전소 운영자는 시장참여자로서 발전사업자 또는 일종의 부하관리사업자 (curtailment service provider; CSP)의 형태로 사업 모형을 운영한다.

따라서 기술 특성상 가상발전소를 마이크로그리드보다 상위 개념으로 정의할 수 있다.

2.3 가상발전소에 대한 정의 제안

발전 및 수요측 자원의 이용률 향상을 위한 통합 운영기술 자체는 새로운 개념은 아니다. 이미 수년 간 다수의 전력회사들이 (수백 kW에서 수 MW 수준의) 발전원에 대한 통합 운영을 수행하였다. 일반적으로 이러한 통합 운영의 목적은 전력시장 진입에 필요한 용량을 확보함으로써 소규모 발전사업자와 전력공급자에게 이익을 획득할 수 있는 기회를 제공하기 위한 것이다. 또한 개별 에너지 소비자가 보다 경쟁적인 가격을 확보하거나 수요반응 서비스를 제공하기 위해 수요관리도 수행하고 있다. 풍력발전단지가 보다 많은 발전용량을 확보하여 출력 평활화 등을 유도하는 것 또한 추가적인 편익 제공을 목적으로 하는 자원 통합운영의 또 다른 예라고 할 수 있다.

아직까지는 가상발전소에 대한 공통된 정의가 존재하지 않는다. 해외 주요 연구기관에서 발표한 가상발전소에 대한 세부 정의는 다양하지만[4],[17-19], 이를 종합하면 가상발전소는 기존의 통신채널을 통해 지리적으로 산재한 발전원을 연결하여 구성한 가상의 발전소로 의미를 부여할 수 있다. 여기서 “가상”이라는 용어는 고정된 형태가 아닌, 임시적이고 일시적인 의미를 함축하고 있다. 이러한 가상발전소에 대한 해석은 개체/시스템으로서의 발전소, 발전원 집합체의 관리 및 진보된 정보통신기술의 활용이라는 가상발전소의 기본적인 특성을 제공하게 된다. 첫 번째 특성인 개체/시스템으로서의 발전소는 가상발전소가 이행해야 하는 의무 및 계통운영 상에서의 역할을 의미한다. 두 번째 특성인 발전원 집합체의 관리는 가상발전소 제어의 필요성에 관한 것으로, 이는 기존 발전소와의 차이를 나타낸다. 세 번째 특성인 진보된 정보통신기술의 활용은 “가상”이라는 개념과 관련된 것으로, 가상발전소 운영 시 통신의 중요성을 강조한다. 이에 따라, 본 논문에서는 이러한 세 가지 특성을 보유하는 임의의 시스템으로 가상발전소를 다음과 같이 정의하고자 한다.

가상발전소는 도매전력시장 및 계통운영에의 참여를 목적으로 전력망 내에 산재해 있는 다양한 유형의 분산형 에너지원을 진보된 정보통신기술 및 자동제어기술을 활용하여 단일 발전시스템의 형태로 운영하기 위한 통합관리시스템이다.

본 논문에서 제안한 가상발전소에 대한 정의에 따르면, 가상발전소는 개별 분산형 에너지원의 특성 파라미터를 조합하여 하나의 운영 프로파일을 생성하고 이를 바탕으로 중앙급전발전기로서 도매전력시장 및 계통운영에 참여해야 하며, 통합 포트폴리오 단위로 계통운영자의 급전지시에 응동할 수 있어야 한다. 따라서 가상발전소 구성요소는 어떠한 유형의 분산형 에너지원도 참여가 가능하지만, 하나 이상의 제어가능 자원이 반드시 포함되어야 한다. 또한 가상발전소 구성요소는 지리적 제약을 받지 않지만, 가상발전소가 중앙급전발전기의 자격으로 도매전력시장 및 계통운

영에 참여하기 위해서는 가상발전소 내 구성요소들이 동일한 송전단에 연계되어야 할 것이다. 이는 가상발전소가 마이크로그리드와 같은 다른 분산형 에너지원 통합 운영기술과는 차별화되는 요소라고 할 수 있다.

3. 가상발전소 도입을 위한 선결요건

3.1 가상발전소 제어권한 체계

가상발전소에 대한 명확한 정의 및 보다 구체적인 운영 모형 정립의 필요성은 결과적으로 계통운영자가 가상발전소를 어떠한 유형의 공급자원으로 고려하여 계통운영에 어떻게 반영할 것인가에 대한 문제와 직결되는 중요한 사안이다. 따라서 본 논문에서 제안한 가상발전소에 대한 정의에 따르면 결과적으로 계통운영 시 가상발전소에 대한 제어권한은 계통운영자에게 귀속되어야 할 것이다. 가상발전소를 구성하는 요소기술 자체는 배전 수준의 전력기술로 분류할 수도 있지만, 통합 발전 포트폴리오 단위로 도매전력시장 및 계통운영에 참여하는 가상발전소 그 자체는 기존의 중앙급전발전기의 역할을 수행하는 송전 수준의 공급자원으로 고려해야 한다. 즉, 계통운영자는 가상발전소 단위로 전력시장 및 계통운영에 대한 제어를 수행해야 하며, 개별 분산형 에너지원에 대한 제어는 도매전력시장 청산결과 및 계통운영자의 급전지시를 바탕으로 가상발전소 운영자가 자체적으로 수행해야 한다. 단, 이를 위해서는 가상발전소 단위의 통합 발전 포트폴리오의 공급능력을 가시화해야 할 필요성이 존재하기 때문에, 이와 관련된 계통운영 기술기준의 수립이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 중앙급전발전기 역할을 수행하는 가상발전소에 대한 제어권한은 계통운영자에게 귀속되어야 하는 것으로 고려하고 있지만, 가상발전소 제어권한과 관련된 가장 해결하기 어려운 문제는 실시간 급전 시 가상발전소가 위치한 배전망 내 제약이 발생하는 경우와 관련된 것이다. 즉, 실시간 급전 시 배전망 내 제약 발생으로 인해 가상발전소를 제어해야 하는 경우, 이를 해결하기 위한 가상발전소 제어명령을 누가 수행할 것인지를 사전에 결정해야 한다. 이는 가상발전소가 근본적으로 배전단에서 구현되는 배전 수준의 전력기술이지만, 이를 송전 수준에서 활용하고자 하기 때문에 발생하는 원천적인 문제라고 할 수 있다.

계통운영자 입장에서는 계통운영 시 배전망 운전 상태까지 고려할 필요가 없고 이에 대한 가시성 또한 확보되어 있지 않기 때문에, 실시간 급전 시 발생하는 배전망 내 제약 문제를 해결하기 위해서는 최소한 배전사업자가 배전제약 발생에 한해서는 해당 지역의 가상발전소에 대한 제약급전 권한을 보유해야 한다. 그러나 계통운영자가 실시간으로 확인하지 못하는 배전 수준에서의 운영 문제로 인해 임의로 배전사업자가 가상발전소 급전을 변경한다면, 이는 오히려 계통운영 상의 불확실성을 야기하는 원인으로 작용할 수도 있다는 점에 유의해야 한다.

이는 수요반응 기반의 가상발전소보다는 신재생전원 및 분산전원 자원을 중심으로 구성되는 공급자원형 가상발전소 또는 혼합형 가상발전소와 관련하여 유발되는 문제이다. 수요반응 기반의 가상발전소는 수요감축을 통해 계통운영에 기여하는 개념이기 때문에, 다른 유형의 가상발전소에 비해 상대적으로 배전 혼잡과 같은 배전망 운전제약을 야기하지 않는다. 반면, 공급자원형 가상발전소 및 혼합형 가상발전소는 배전망 내 다양한 유형의 분산형 에너지원 도입으로 인해 이와 같은 배전망 운전 제약을 유발할 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 주로 공급자원형 가상발전소 기술개발을 추진하는 유럽에서는 지능형 배전망 (active distribution network, ADN)의 도입을 전제로 하고 있으며, 특히 FENIX (Flexible Electricity Network to Integrate the eXpected 'energy evolution') 프로젝트에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 TVPP (technical VPP) 개념을 도입하게 되었다[20].

결국, 이러한 배전망 제약과 관련된 가상발전소 제어권한 체계는 가상발전소 사업 모형 유형과 직결되는 문제로 볼 수 있다. 만약 가상발전소 사업 모형을 배전회사 소유의 전기판매사업자 (energy service provider, ESP) 형태로 도입한다면, 가상발전소는 자신의 지역 전력망 내 분산형 에너지원 자원을 통한 충분한 수준의 공급유연성을 확보할 수 있기 때문에 어떠한 유형의 가상발전소를 도입하더라도 현재의 전력계통 운영체계를 크게 변경시키지 않고도 이러한 배전망 제약 관련 문제를 상대적으로 쉽게 해결할 수 있다. 이러한 가상발전소의 공급유연성은 단순히 에너지뿐만 아니라 다양한 유형의 계통보조서비스까지 제공할 수 있도록 가상발전소의 공급능력을 향상시키는 동인이라 할 수 있다. 반면, 가상발전소 사업 모형을 제3자 소유의 독립발전사업자 (independent power provider, IPP) 형태로 추진한다면, 분산형 에너지원 및 배전망 운영 권한의 분리로 인해 해당 가상발전소의 공급유연성을 제한하게 되어, 1일전 시장 또는 장기계약을 통해 사전에 결정된 수준의 에너지 공급만을 수행하는 수동적인 시장 참여자로 가상발전소의 역할이 제한될 가능성이 존재한다. 이러한 유형의 가상발전소 사업 모형 도입 시에는 보다 구체적인 가상발전소 기술사양과 전력계통, 특히 배전계통 운영절차에 대한 설계 및 변경이 선행되어야 한다.

현재 국내에서는 수요반응을 통한 수요관리 및 에너지 효율화에 대한 관심이 높은 편이며, 이와 관련된 에너지 정책 또한 매우 적극적으로 도입하고 있다. 이와 함께, 수요반응 기반의 가상발전소의 초기 형태로 간주할 수 있는 수요자원시장을 통한 부하관리사업자 제도를 운영하고 있다. 따라서 현재의 국내 전력산업 환경 하에서는 제3자가 소유하는 독립발전사업자 형태의 수요반응 기반의 가상발전소 즉, 실시간 자동 수요반응 형태의 가상발전소 모형의 도입이 가장 적극적으로 추진될 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 가상발전소에 대한 제어권한은 계통운영자에게 귀속되는 것으로 정의하며, 실시간 급전 시 배전망 제약과 관련된 문제는 발생하지 않을 것으로 예상한다. 단, 향후 분산전원 기술의 보급 확대와 가상발전소 관련 기술의 발전으로 계통보조서비스 공급이 가능한 수준에 이르게 되면, 보다 체계적이고 구체적인 가상발전소 제어권한 및 운영체계에 대한 설계가 진행되어야 한다.

3.2 가상발전소 도입과 전력산업구조 및 전력시장제도와의 연관관계

현 수준에서는 가상발전소 자체를 대상으로 하는 제도적, 정책

적 지원보다는 가상발전소를 구성하는 요소기술 개발 및 보급을 위한 장려금 제도와 지원정책을 통해 가상발전소 도입을 추진하고 있다. 그러나 가상발전소의 도입 목적이 도매전력시장 및 계통운영에의 참여를 통해 기존의 중앙급전발전기와 동일한 역할을 수행하는 것이라고 한다면, 가상발전소 기술의 구현은 전력산업 구조 또는 전력시장제도 수준에서 허용되어야만 한다. 즉, 가상발전소의 도입은 가상발전소를 통한 전기사업을 허용하는 방향으로의 전력시장제도 정비가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

가상발전소 개념 자체가 수직독점구조 하에서는 정립될 수 없고 도매전력시장 구조 하에서도 전력시장운영규칙을 통해 이러한 새로운 유형의 시장참여자를 허용해야만 존재할 수 있는 자원이기 때문에 가상발전소 도입을 위해서는 전력시장운영규칙의 기술중립성을 보장해야만 한다. 즉, 가상발전소 운영자에게 어떠한 유형의 기술을 적용하는지에 상관없이 시장참여 기회를 제공해야만 가상발전소 기술 개발에 대한 장려금을 수여할 수 있다. 한편 가상발전소 운영자는 도매전력시장에 참여하여 사업을 영위할 수 있기 때문에, 최종소비자를 대상으로 하는 소매경쟁의 개방 여부는 가상발전소 기술혁신에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보이나, 배전 수준에서의 도매경쟁 활성화 및 이에 따라 새로운 유형의 시장참여자를 허용하는 전력시장으로의 발전은 가상발전소 도입을 위한 필수요건이라 할 수 있다.

가상발전소를 구성하는 요소기술인 분산형 에너지원은 아직까지 기존의 중앙급전발전기와 경쟁할 수 있는 충분한 수준의 경제성을 확보하고 있지 않기 때문에 현 수준에서는 가상발전소의 수입비중은 전력판매보다는 계통보조서비스 및 용량서비스 판매에 의한 부분이 상대적으로 높을 것으로 예상된다. 따라서 가상발전소 도입을 촉진하기 위해서는 가상발전소의 참여가 허용되는 도매전력시장과 함께 충분한 수준의 용량가격 및 계통보조서비스 가격을 제공하거나 별도의 용량시장 및 계통보조서비스 시장을 도입해야 할 필요성이 존재한다. 이는 단순히 가상발전소 도입만을 목적으로 하는 것이 아니라, 분산전원, 수요반응 및 에너지저장장치와 같은 전력신기술의 도입을 위해서도 반드시 필요한 선결요건이라 할 수 있다. 즉, 가상발전소를 포함한 전력신기술 촉진을 위해서는 우선 도매경쟁 활성화 및 다양한 사업자의 시장참여를 허용해야 한다. 이러한 경쟁적인 도매전력시장은 시장참여자가 금전적인 보상을 얻을 수 있는 기회와 서비스 가치 평가에 대한 투명성을 제공하며, 광범위한 소비자들에게 서비스를 판매하려는 참여자들에게 공정한 경쟁의 장을 구축하고, 가격과 성능으로 승자를 결정하는 구조를 조성하여 혁신을 유도함으로써 전력신기술 시장을 성장시킬 수 있어야 한다. 이와 동시에, 특히 가상발전소의 도입은 기존의 발전사업자나 판매사업자 외에도 일종의 부하관리사업자와 같은 제3의 사업자의 시장참여를 허용해야 할 필요성 또한 존재한다.

가상발전소를 포함한 전력신기술의 도입을 위해서는 도매전력시장에서의 거래상품 및 가격결정방법에 있어서도 변화를 요구한다. 우선 다양한 자원의 시장참여를 수용해야 한다. 현재와 같이 별도의 제한된 예산으로 운영되는 수요자원시장이 아닌 수요측 자원이 기존의 중앙급전발전기와 경쟁할 수 있도록 허용함으로써, 신기술을 활용한 수요측 자원이 경쟁을 통해 수익을 얻을 수 있도록 해야 한다. 즉, 시장의 기술중립성 확보가 절실하다. 미국은 FERC (Federal Energy Regulatory Commission) Order 719, 719-A, 719-B, 2008, 2009를 통해 주 정부나 지방자치단체 법에 의해 금지되지 않는 경우에는 ISO (Independent System Operator)/RTO (Regional Transmission Organization)에게 수요반응 자원이 서비스를 제공할 수 있도록 하고, 부하관리사업자가 소비자들을 대신해 수요반응 자원을 시장에 입찰할 수 있도록 도매전력시장을 개선하도록 요구하고 있다.

다양한 기술을 활용한 수요측 자원이 경쟁에 참여하여 정확한 가치평가를 받기 위해서는 현재의 비용입찰시장을 가격입찰시장으로 전환해야 할 필요성이 존재한다. 그 수가 많고 소규모인 분산형 에너지원에 대한 비용평가, 특히 이를 통합 운영하는 가상발전소에 대한 비용평가는 현실적으로 불가능하기 때문에, 현재의 비용기반 시장은 이러한 새로운 유형의 공급자원을 수용하기 어렵다. 신재생전원을 포함한 소규모 분산형 에너지원의 시장참여를 활성화하기 위해서는 현재의 전국 단일 가격제보다는 지역별 또는 모선별 가격제를 도입함으로써 이들 자원이 갖는 지역적 가치를 극대화할 수 있어야 한다.

한편, 계통보조서비스 시장 개선 및 용량시장 도입 또한 이러한 전력신기술의 도입을 촉진하는 하나의 방안이 될 수 있다. 현재의 규제적인 계통보조서비스 보상을 시장기반의 평가 및 보상체제로 변경하여 이를 통해 관련 시장의 규모를 확대하면, 전력신기술 개발 및 보급 확대를 위한 보다 강한 유인을 유도할 수 있다. 즉, 전력 관련 서비스를 에너지 서비스, 계통보조서비스 및 용량 서비스로 분리하고 각 서비스에 대해 가장 낮은 가격을 갖는 자원들이 시장에서 선택될 수 있게 함으로써, 가상발전소의 요소기술인 에너지저장장치 및 수요반응과 같은 전력신기술들이 시장을 통해 수입을 확대할 수 있는 기회가 마련되어야 한다. 진정한 의미의 경쟁시장은 가격을 통해 자원을 선택하게 되므로 선택된 자원의 가치를 보다 정확하게 평가할 수 있다.

전통적으로 계통보조서비스는 기존의 중앙급전발전기에 의해 제공되었지만, 최근 기술 발전에 따라 다양한 유형의 자원이 계통보조서비스를 제공할 수 있게 되었다. 예를 들어, 주파수조정서비스는 중앙급전발전기의 자동 출력조정 신호에 따라 발전기의 출력을 증·감발시킴으로써 확보하고 있지만, 전력시장운영규칙 개정을 통해 에너지저장장치 및 수요반응과 같은 비전통적인 공급자원이 이들과 경쟁할 수 있도록 해야 한다. 미국의 경우, FERC Order 890을 통해 이러한 새로운 유형의 공급자원이 계통보조서비스 시장에 참여할 수 있도록 전력시장규칙 개정을 요구한 바 있으며, NYISO (New York Independent System Operator), PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland), MISO (Midcontinent ISO), CAISO (California ISO) 시장은 이미 에너지저장장치가 계통보조서비스 (주파수조정예비력 및 순동예비력)를 제공할 수 있도록 전력시장규칙을 개정하였다. 이는 결과적으로 이러한 비전통적인 공급자원으로 구성되는 가상발전소의 경쟁력을 강화시키는 요인으로 작용하여, 가상발전소가 점차 중앙급전발전기의 역할을 대체할 수 있는 기반을 조성할 수 있을 것이다.

3.3 스마트그리드 하에서의 단계별 가상발전소 지원책

스마트그리드는 다수의 사람들에게 많은 것을 내포하고 있다. 전력회사 입장에서 스마트그리드는 지능형 계량기에 관한 모든 것을 의미한다. 이러한 기술은 전력회사에게 비용효과적으로 보다 정확한 요금청구와 관련된 데이터를 수집할 수 있는 능력과 소비자에게 동적인 도매전력시장과 연동되는 판매 가격신호를 제공할 수 있는 능력을 부여한다. 따라서 지능형 계량기는 스마트그리드의 기본 구성요소라 할 수 있다. 송·배전설비의 지능화가 전제되어 있지 않다면, 가상발전소의 도입은 별 다른 의미가 없게 된다. 통신매체와는 관계없이 소비자 단의 지능형 계량기 보급은 가상발전소 도입을 위한 1 단계라 할 수 있다.

최종소비자에게 스마트그리드는 수요감축을 자동화 할 수 있는 설비 및 기술을 이용하여 실시간 시장상태에 반응하는 능력을 부여하는 기술로, 수요반응 또는 분산전원 기술로 생산된 잉여 발전량을 배전회사나 계통운영자에게 판매함으로써 과거의 수동적 소비자를 능동적 소비자로 변모시키게 될 것이다. 이러한 소비자 환경의 변화는 요금절감을 통해 최종소비자의 전기요금을 15% 정도 환급해 줄 수 있을 것으로 예상하고 있기 때문에, 일반적으로 소비자가 소유하는 이러한 유형의 설비 및 공급능력 또한 가상발전소 도입에 필수적이라 할 수 있다. 이러한 능동적 소비자를 스마트그리드 망에 연계시키는 것이 가상발전소 도입을 위한 2 단계라 할 수 있다.

가상발전소 도입을 위한 3 단계는 광범위한 지역에 설치된 지능형 검침 인프라를 기반으로 하는 지능형 네트워크 시스템을 이용하여 전력공급 서비스를 소비자 단에서 송전단 수준으로 확장시킨다. 동시에, 자동화 기술은 개별 소비자 자원을 상위 전력망의 자원 및 계통운영자와 연계할 수 있도록 한다. 이와 같은 상위 전력망과의 네트워킹이 가상발전소 도입의 4 단계이다.

계통설비 관련 하드웨어 및 소프트웨어 공급사업자는 전 세계적으로 가장 수익성이 좋은 시장 가운데 하나에 자사 제품과 서비스를 공급할 수 있는 좋은 기회를 스마트그리드가 달성해 줄 것으로 기대하고 있다. 전기는 미래의 에너지 서비스를 위한 선택 수단이며, 심지어 플러그인 하이브리드 자동차를 통해 운송분야까지로 확대되고 있는 실정이다. 실제로 가상발전소 구현에 따른 계통에서의 새로운 가치를 창출하기 위해 이러한 IT (Information Technology) 공급사업자들이 중요한 촉매제 역할을 수행하고 있다. 따라서 가상발전소 도입의 5 단계는 이러한 IT 공급사업자들이 개방된 계통 아키텍처 기술 환경 하에서 혁신에 박차를 가할 수 있도록 이들의 참여를 허용하는 것이다. 그러나 이 단계는 IT 기업들이 제공하는 데이터 취득 및 관리 부문에서 비약적인 발전 없이는 불가능하다. 가상발전소 도입을 위한 6 단계는 이러한 데이터 흐름을 아주 자연스럽고 효율적으로 만드는 것이라 할 수 있다.

가상발전소 도입의 7 단계는 모든 가상발전소 관련 이해관계자들에게 유리한 해법을 제시할 수 있는 규제 체제를 수립하는 것이다. 아직 전 세계 어디도 이 수준까지는 도달하지 못했지만, 미국, 덴마크, 독일 및 일본과 같은 국가들은 이와 관련하여 상당히 발전을 거듭하고 있다. 이상적으로는 이것이 1 단계가 되어야 하지만, 새로운 개념, 사업 모형 및 최첨단 기술 도입 시 이와 관련된 정책 및 규제는 기술의 진보를 따라가지 못하는 것이 현실이다. 가상발전소 개념 또한 이러한 경향을 보이고 있기 때문에, 기술 구현을 바탕으로 가상발전소 개념을 보다 구체화시킨 이후에야 이와 관련된 정책 및 규제를 수립할 수 있을 것이다.

4. 결 론

가상발전소는 분산형 에너지원 제어의 가시성 문제를 해결하기 위한 대표적인 방법으로, 다양한 유형의 분산형 에너지원을 정보통신기술을 활용하여 통합 운영함으로써 중앙급전발전기와 유사한 운영상의 유연성과 제어가능성을 확보하기 위한 기술이다. 그러나 아직까지 가상발전소는 개념 정립 수준에 머물러 있으며, 이에 대한 공통된 정의가 존재하지 않는다. 따라서 가상발전소를 마이크로그리드와 같은 유형의 분산형 에너지원 통합 운영기술과 구분하기 위해서는 이에 대한 보다 명확한 정의가 필요하다. 이에 따라, 본 논문에서는 가상발전소를 “도매전력시장 및 계통운영에의 참여를 목적으로 전력망 내에 산재해 있는 다양한 유형의 분산형 에너지원을 진보된 정보통신기술 및 자동제어기술을 활용하여 단일 발전시스템의 형태로 운영하기 위한 통합관리시스템”으로 정의하였다.

가상발전소의 도입을 위해서는 지능형 계량기, 지능형 검침 인프라 및 자동화 기술 등을 통한 송·배전설비의 지능화가 전제되어야 한다. 이와 함께, 가상발전소 도입을 위한 제도적, 정책적 지원 또한 제공되어야 한다. 그러나 현 수준에서는 전 세계적으로 가상발전소를 구성하는 요소기술 개발 및 보급을 위한 장려금 제도와 지원정책을 통해 가상발전소 도입을 추진하고 있다. 결과적으로 가상발전소의 도입 목적이 도매전력시장 및 계통운영에의 참여를 통해 기존의 중앙급전발전기와 동일한 역할을 수행하는 것이라고 한다면, 가상발전소 기술의 구현은 전력산업구조 또는 전력시장제도 수준에서 허용되어야만 한다. 즉, 가상발전소의 도입은 가상발전소를 통한 전기사업을 허용하는 방향으로의 전력시장제도 정비가 전제되어야 한다. 그러나 가상발전소 도입과 관련하여 가장 난해한 부분은 가상발전소 개념에 대한 공통적인 인식과는 달리, 보다 구체적인 가상발전소의 실체에 대한 해석이 이해관계자들의 관점에 따라 매우 다르다는 것이다. 이러한 가상발전소에 대한 정의 및 운영체계에서의 혼란은 가상발전소 도입을 지연시키고 이에 대한 부정적인 시각을 형성하는 원인으로 작용하고 있다. 따라서 가상발전소 도입과 관련된 보다 구체적인 기술에 대한 정의 및 이와 관련된 지원 방안의 수립은 해당 국가 또는 지역의 전력산업 환경을 감안하여 자체적으로 결정해야 하는 것이 합당할 것이다.

현재 국내에서는 수요반응 기반의 가상발전소의 초기 형태로 간주할 수 있는 수요자원시장을 통한 부하관리사업자 제도를 운영하고 있다. 반면, 아직까지 국내에는 판매경쟁을 통한 다수의 전기판매사업자를 용인하지 않고 있기 때문에 부하관리사업자 형태의 분산전원 기반 가상발전소 모형을 도입하기에는 현행 전력산업구조 및 전력시장운영규칙의 많은 부분을 변경해야 하는 어려움이 있으며, 이에 따라 이러한 형태의 가상발전소 모형을 도

입하기까지에는 상당 기간의 시간이 소요될 것이다. 이에 따라, 본 논문에서는 현재의 국내 전력산업 환경 하에서 제3자가 소유하는 독립발전사업자 형태의 수요반응 기반의 가상발전소 즉, 실시간 자동 수요반응 형태의 가상발전소 모형을 도입하는 것이 이와 관련된 규제 및 정책상의 혼란을 최소화하면서 가장 비용효과적으로 가상발전소 도입을 추진할 수 있는 현실적인 대안으로 제안하였다. 신재생전원, 분산전원 및 수요반응 등 다양한 유형의 분산형 에너지원으로 구성된 가상발전소의 도입이 가장 이상적이지만, 실제로 이러한 진보된 형태의 가상발전소 도입을 위해서는 전력산업구조 및 전력시장제도에서의 개선뿐만 아니라 송·배전망의 지능화와 같은 상당 수준의 기술적 진보 또한 선행되어야 한다. 이에 따라, 본 논문에서 제안한 바와 같이, 실시간 경제성 수요반응의 연장선상에서 가상발전소 도입을 고려하는 것이 국내 전력산업 환경에 적합한 가상발전소 개념을 구체화하고, 이를 바탕으로 보다 현실적인 유관 정책 및 규제를 수립할 수 있는 방안으로 보인다. 더 나아가, 가상발전소 개념의 현실화와 이를 바탕으로 하는 관련 기술 개발 및 제도 수립은 향후 스마트그리드 활성화에 따른 전력산업 환경의 변화에 대응하여 보다 이상적인 형태의 가상발전소 기술의 구현을 가능하게 하는 초석이 될 것으로 확신한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028509).

References

[1] The National Energy Technology Laboratory (NETL), A Vision for the Smart Grid, U.S. Department of Energy, June 2009.

[2] M. Newborough, Assessing the benefits of implementing micro-CHP systems in the UK, Proceedings of the I Mech E Part A Journal of Power and Energy, 2004, 218(4), pp. 203-218.

[3] J. D. Harrison, Micro combined heat and power: potential impact on the electricity supply industry, Proceedings of 16th International Conference on Electricity Distribution, 2001.

[4] Pike Research, Virtual Power Plants: Smart Grid Platform for Aggregating Distributed Renewables, Demand Response, and Energy Storage Technology, 2011.

[5] http://iom.invensys.com/KR/pages/SuccessStoriesDetail.aspx?company=PortlandGeneral.

[6] Power Market Department, Korea Power Exchange, A Research on Institutional and Technical Requirements for Virtual Power Plants to Participate in the Electricity Market under the Smart Grid Paradigm, April 2013.

[7] http://assets.dongenergy.com/DONGEnergyDocument/devpp/VirtualPowerplant_brochure_oct2008.pdf.

[8] B. Fesmire, Energy Efficiency in the Power Grid, ABB Inc., July 2007.

[9] http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html.

[10] J. A. P. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities", Electric Power Systems Research, 77(9), July 2007.

[11] WADE, World Survey of Decentralized Energy 2006.

[12] R. H. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulous, R. Yinger, and J. Eto, White paper on integration of distributed energy resources: The CERTS micro grid concept, Consortium Electric Reliability Technology Solution (CERTS), Tahoe city, CA, Tech. Rep. LBNL-50829, April 2002.

[13] K. Takahiro, Development Strategies toward Promotion and Expansion of Residential Fuel Cell Micro-CHP System in Japan, Osaka Gas Co., Japan 2008.

[14] M. Pehnt, M. Cames, and C. Fischer, Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems, Springer, 2005.

[15] Pike Research, Microgrids: Islanded Power Grids and Distributed Generation for Community, Commercial and Institutional Application, 2009.

[16] H. Morais, P. Kadar, M. Cardoso, Z. A. Vale, and H. Khodr, "VPP operating in the isolated grid", IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, USA, July 2008, pp.1-6.

[17] KEMA Inc., The Virtual Power Plant, 2011.

[18] C. Andrieu, M. Fontela, B. Enacheanu, H. Pham, B. Raison, Y. Besanger, M. Randrup, U. B. Nilsson, R. Kamphuis, and G. J. Schaeffer, Distributed Network Architectures, European project CRISP (ENK5-CT-2002-00673), Deliverable D1.7, 30 August 2005.

[19] D. Pudjianto, G. Ramsay, G. Strbac, and M. Durstewitz, The Virtual Power Plant: Enabling integration of distributed generation and demand, FENIX Bulletin 2, 2008.

[20] M. Braun and P. Strauss, "A review on aggregation

approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems", International Journal of Distributed Energy Resources, 4(4), October 2008, pp.297-319.

저 자 소 개

정 구 형(Koo-Hyung Chung)

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교 전기전자제어공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학석사). 2007년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2007년 ~ 현재 한국전기연구원 전력정책연구센터 선임연구원.

박 만 근(Man-Geun Park)

1970년 7월 6일 생. 1997년 홍익대학교 전기전자제어공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학석사). 1997년 한국전력 입사. 현재 한국전력거래소 종합조정실 부장.

허 돈(Don Hur)

1974년 1월 17일생. 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2005년 ~ 현재 광운대학교 전기공학과 교수.