

분산 재생에너지의 효율적 활용을 위한 가상발전소(VPP) 플랫폼 개발에 관한 연구

조영혁* · 백승엽** · 최원용*** · 정대을****

〈 목 차 〉	
I. 서론	IV. 가상발전소 플랫폼 솔루션 개발
II. 가상발전소의 개념 및 선행연구	4.1 통합관제센터 UX 개발
2.1 가상발전소의 개념과 특성	4.2 분산자원 전력중개거래 기능 개발
2.2 가상발전소에 관한 선행연구	4.3 계통운영 보조서비스 기능 개발
2.3 가상발전소의 운영사례	4.4 가상발전소 모의 시뮬레이터 개발 및 적용방안
III. 가상발전소 플랫폼 개발 방법	V. 결론
3.1 가상발전소 도입방안	참고문헌
3.3 요구사항 분석 및 아키텍처 설계	<Abstract>
3.3 발전량 예측 방법	
3.4 가상발전소 운영 최적화 방법	

I. 서론

전력산업은 석탄, 가스를 주된 연료로 하는 대규모 발전설비를 건설하여 생산된 전력을 전국적인 송배전망을 통해 수요자에게 전송하는 중앙 급전방식이 주류를 이루어 왔다. 그러나 최근 세계 195개 국가가 서명한 파리기후협약(2015.12.12), 미세먼지 등 강력한 환경 이슈로 태양광, 풍력 등을 에너지원으로 하는 재생에너지

산업이 급속도로 확대되고 있다. 태양광발전, 풍력발전과 같은 재생에너지 발전설비는 중앙급전방식의 발전설비와 달리 상대적으로 규모가 작아 기후 조건이 좋은 지역 어디에나 적은 비용으로도 쉽게 설치할 수 있는 특성이 있다. 이런 특성으로 인해 태양광발전, 풍력발전을 대표적인 분산전원이라 부른다. 미래 전력산업의 패러다임은 ICT 기술 발전과 분산전원 확대에 따라 중앙급전 방식의 전력망이 분산화·

* 한국남동발전(주), yhcho7@koenergy.kr(주저자)
** 브이젠(주), sybaek@vgen.co.kr(공동저자)
*** 한국남동발전(주), koenergy@koenergy.kr(공동저자)
**** 경상대학교 경영정보학과, dyjeong@gnu.ac.kr(교신저자)

스마트화 되고, 에너지 생산과 소비를 동시에 행하는 프로슈머 확산의 시대로 급격히 바뀌고 있다(IEA, 2017).

이와 같은 분산전원의 지역적 분산성은 필요한 전원을 수요지 인근에 설치가 가능하도록 함으로써 송배전 인프라 건설 및 운영비용을 절감할 수 있다. 그리고 적은 시설규모는 부지 선정에 대한 어려움을 경감시키고 소규모의 자본으로도 재생에너지 발전 산업에 참여할 수 있어 재생에너지 산업과 시장의 발전을 촉진시키는 장점이 있다. 그러나 재생에너지의 지역적 분산성과 소규모성, 그리고 출력의 변동성은 분산전원 시스템 구성을 쉽게 다양화할 수 있어 이로 인한 전력계통의 안정성을 훼손할 수 있다. 이처럼 재생에너지 중심의 분산전원이 급속히 확산됨에 따라 분산전원들의 운영 효율성을 확보하기 위한 상호연계, 통합관리 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 그리고 분산전원들의 계통과의 연계 및 신뢰성 확보방안과 함께 분산전원들의 전력시장 참여방안에 대한 폭넓은 연구가 진행 중에 있다(오창진 등, 2013).

이와 같은 분산전원들의 운영효율성 확보와 전력시장 참여방안에 대한 연구 중의 대표적인 방법으로 VPP(Virtual Power Plant, 가상발전소)가 있다. VPP는 정보통신기술을 이용하여 다양한 분산에너지 자원(DER, Distributed Energy Resource)을 네트워크를 통하여 마치 하나의 발전소와 같이 통합하여 운영할 수 있도록 함으로써 분산전원의 운영 및 관리를 최적화할 수 있는 방법이다. 특히, 태양광 발전소의 보급 확산에 따라 태양광 발전량이 증가하면서, 일출에서 일몰 사이에 기저발전원 발전량이 현저히 감소되는 사례를 보여주는 캘리포니

아 Duck Curve 현상이 발생할 수 있다. 이로 인하여 일간 전기 판매가격의 급격한 변동을 유발하기 때문에 발전된 전기의 시차거래에 의한 운영관리 가능성이 중요시 되며, 이 문제를 해결하는데 있어 VPP를 통한 분산전원의 운영 및 관리 최적화 기술이 필요하다.

VPP를 통해 기존에는 중앙계통에서 관리가 불가능했던 소규모 분산에너지 자원들이 하나의 발전운영체제로 통합되어 발전량의 예측 및 전력거래, 발전설비의 모니터링 등을 용이하게 할 수 있게 됨으로써 분산전원의 운영효율성에 더하여 중앙급전발전기와의 연계성을 높여 계통신뢰도를 확보할 수 있을 뿐만 아니라 전력시장에서의 전력거래 시 수익 극대화를 가능하게 한다(정구형 등, 2015). 이와 같은 VPP의 성공적인 운영을 위해서는 분산전원들을 하나의 발전운영체제로 통합할 수 있는 네트워크 기술과 다양한 분산전원들을 최적 조합으로 구성하는 기술, 분산전원의 설비 모니터링 및 관리기술, 그리고 기후환경적 요인에 따른 불확정성이 큰 분산전원의 발전량과 시장의 전력 수요량을 정확하게 예측하여 발전함으로써 수익을 극대화할 수 있는 발전량 예측 및 전력거래 기술 등이 필요하다.

본 연구에서는 신재생에너지 발전원과 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)를 주축으로 하는 VPP의 구축 및 운영에 있어서 필요한 주요 요소기술이 무엇인지를 살펴보고, 그러한 요소기술들의 개발과 전체 개별 요소기술들을 통합하여 운영할 수 있는 VPP 플랫폼의 기획과 설계 및 실제 개발사례 제시한다. 본 연구를 위해 VPP의 특성을 서술하고 이에 근거한 VPP 도입전략과 선결사항들을 먼저 파악했

다. 그리고 전력회사와 같은 전력공급자 입장에서 분산에너지 자원의 효율적인 관리와 더불어 이익 최대화 목표를 달성하기 위하여 VPP 최적운동을 위한 VPP 솔루션 플랫폼 초기모델을 설계하였다.

본 연구에서 고찰되는 VPP 솔루션 플랫폼은 전력회사가 발전·송전설비 등의 건설에 소요되는 비용과 이와 관련된 투자 리스크를 최소화함과 동시에 소비자의 전력 수요를 충족할 수 있도록 향후 수요대응(Demand Response, DR) 프로그램 운영 기능까지 포함될 것을 사전에 고려하여 기획되었다. 이는 VPP의 도입으로 발전 및 송·배전부문에 대한 대규모 설비투자 없이 현존하는 발전기와 DR 프로그램 등을 통해서 소비자의 부하 변화에 실시간으로 대처하여 보다 친환경적이고 효율적인 전력공급이 가능하도록 하기 위한 것이다.

II. 가상발전소의 개념 및 선행연구

2.1 가상발전소의 개념과 특성

지금까지 가상발전소에 대한 공통된 정의가 없지만 해외 주요 연구기관에서 발표한 내용을 정리하면, 가상발전소는 지역적으로 산재한 다양한 분산전원들을 정보통신기술을 이용하여 연결함으로써 하나의 발전소와 같이 관리 및 운영이 가능하도록 할 수 있도록 구성된 발전소로 의미를 부여할 수 있다. 이런 가상발전소의 정의는 개별 분산전원과 개별 분산전원간의 연결, 분산전원의 통합관리 및 발전된 정보통신

기술의 활용이라는 특성을 제공한다. 여기서 개체·시스템으로서의 발전소는 가상발전소가 이행해야 하는 의무 및 계통운영상에서의 역할을 의미하고 발전원 집합체의 관리는 가상발전소 제어의 필요성에 관한 것이다. 그리고 발전된 ICT의 활용은 가상발전소 운영 시 분산전원들을 단일 발전시스템으로 운영하기 위한 통합관리시스템을 의미한다(정구형, 2015).

전력시장에서 가상발전소는 물리적으로 통합된 단일 설비는 아니지만, 일관적인 관리 및 제어시스템으로 운영되기에 논리적인 개념에서는 하나의 발전소와 동일하게 취급됨으로써 발전경쟁시장에서 발전사업자나 구역전기사업자로서(배인수, 2007), 이익 최대화를 목적으로 에너지 시장 및 보조서비스 시장에 참여하여 서비스 제공을 목적으로 한다(박성원, 2018). VPP는 다양한 DER(distributed energy resource)을 ICT를 이용하여 통합 운영함으로써 중앙계통에서 관리가 불가능한 소규모 분산에너지 자원을 하나의 발전 프로파일로 통합하여 계획발전량, 증감발출 전압제어 능력, 예비력 등을 가시화 할 수 있게 하여 중앙급전 발전기로의 활용뿐만 아니라 전력시장에서의 전력거래 또한 가능하게 한다(정구형 등, 2015).

가상발전소 기술의 유형은 크게 수요대응기반 가상발전소, 공급형 가상발전소로 나누어 볼 수 있다. 수요대응기반 가상발전소는 수요측의 예비발전자원을 활용하여 피크부하에 대응하는 것으로 발전설비의 추가 설치 없이도 기존 발전설비의 비상발전기, 예비발전량 등의 유휴자원을 활용할 수 있는 장점이 있다. 반면에 자원의 범위와 내용이 명확하지 않고 수요관리시장이 아직 성숙하지 못해 거래가 제대로 이루어

어지지 못하는 단점이 있다. 공급형 가상발전소는 다양한 분산전원 설비를 정보통신 기술을 이용하여 하나의 발전소처럼 통합하여 운영함으로써 기존의 대규모의 중앙급전 발전소에서 제공하는 서비스와 동일한 기능을 수행할 수 있다. 그러나 이런 가상발전소의 구현을 위해서는 스마트미터기의 보급 확대, 관련기술 표준 마련, 검증된 사업모델 등이 필요하다.

또한 가상발전소 기술의 구조는 크게 중앙제어 가상발전소와 분산형 제어 가상발전소로 구분하여 살펴 볼 수 있다. 중앙제어 가상발전소는 가장 일반적인 형태로 상위 VPP 관리시스템이 존재하고 하위에 다수의 분산자원이 분포된 형태의 구조다. 상위의 가상발전소 운영자는 네트워크에 연결된 모든 하위 가상발전소를 통합된 관리 및 운영 로직으로 시장에 효율적으로 대응할 수 있게 한다. 그러나 하위 가상 발전소는 전체 전력시장에 대한 정보를 가질 수 없어 개별적으로 시장에 대응하기가 어려운 단점이 있다. 분산형 제어 가상발전소는 다수의 분산전원을 지역적 분산성, 발전설비 특성 등을 고려하여 가상 발전소를 상위단과 하위단의 계층적 구조로 구성하는 것이다. 이는 가상 발전소의 규모가 확대되는 경우의 모델로 대규모의 가상발전소를 효율적으로 관리 할 수 있게 해준다(박용국 등, 2015).

그리고 가상발전소와 유사한 개념으로는 배전단에서 다양한 유형의 DER을 통합하여 운영한다는 측면에서 마이크로그리드가 있다. 그러나 VPP와 마이크로그리드 간의 대표적 차이는 마이크로그리드가 최종소비자 수준에서의 수급균형에 초점을 맞추는 독립적 시스템인 반면에 가상발전소는 최종 소비자 수준에서의 수급

균형에 더하여 도매전력시장에서의 전력거래를 통해 송전계통 수준에서의 수급균형에 기여하는 부하관리 사업자 형태의 사업모델을 운영한다는 것이다(정구형 등, 2015).

2.2 가상발전소에 관한 선행연구

기존 가상발전소 연구는 초기단계로 주로 가상발전소에 대한 개념을 정립하고 지역적으로 분산되고 설비 특성이 상이한 가상발전소를 통합적으로 구성하고 운영할 수 있는 운영방법 및 표준의 수립에 관한 방향으로 이루어지고 있다. 이는 아직까지는 분산형 전원이 전체 전원에 미치는 영향이 작지만 분산전원의 지속적인 확산 전망에 따라 분산전원이 전체 전력계통과 신뢰도와 안정성을 확보할 수 있는 연계방안에 대한 사전 연구가 필요하기 때문이다. 국내외 연구는 가상발전소에 대한 이론적, 기술적 개념의 정립과 나아가 실제 가상발전소 구축과 운영을 위해 필요한 것을 실증하는 연구와 가상발전소에 관한 개별적인 요소기술에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 이들 대부분의 연구들은 분산전원의 확산에 따라 분산전원의 통합관리, 분산전원 상호간의 운용성 확보 등을 통해 전력계통의 신뢰도를 확보하고 전력시장 활동에 대한 문제해소 등이 연구되고 있다(Saboori et al., 2011; 박중성, 2017; Zamani et al., 2016; 박성원, 2018).

가상발전소에 관한 선행연구들을 요약하면 다음과 같다. 정구형 등(2015)은 스마트그리드 하에서 가상발전소의 전력시장 참여를 위한 제도적 선결요건에 관한 연구를 통해 가상발전소에 대한 개념을 정립하고 가상발전소 구성방법

및 필요한 요소기술에 대하여 제시하였다. 그리고 이윤환(2016)은 분산발전자원을 활용한 가상발전소 기반기술의 전력시장 참여방안에 대한 연구를 하였고, 배인수(2007)는 신뢰도 가치와 경제성 평가를 고려한 가상발전소의 최적구성에 대한 연구를 수행하였다. 김태형과 함경선(2017)은 가상발전소의 정보모델 구조를 설계하기 위해 IEC 61850 국제 표준을 기반으로 풍력발전 모델을 위한 IEC 61400-25와 분산전원 모델을 위한 IEC 61850-7-420을 적용하였다.

VPP의 효율적인 운영을 위해서는 소규모 신재생 분산설비와의 신뢰성 및 보안성이 강화된 네트워크 기술과 함께 기후변화에 따른 태양광 발전량 예측(Antonanzas et al., 2016; Voyant et al., 2017), 풍력 발전량 예측(Jung et al., 2014), 에너지 소비량 예측(유승형 등, 2016), 에너지 시장가격 예측(Crisostomi et al., 2015), 생산수요 최적화(Lombardi et al., 2009) 등 불확정성이 매우 커서 높은 수준의 예측 및 최적화 기술이 요구된다. Antonanzas et al.(2016)에 따르면, 태양광 발전량 예측에서 전체 70% 이상의 연구에서 회귀분석, 신경망이론, SVM(support vector machine) 등의 통계적 기법이나 물리적 모델 기법 또는 물리 및 통계모델의 혼합 기법들이 이용되었다고 했다. 그리고 Voyant et al.(2017)은 신경망이론과 SVM과 함께 회귀트리(regression tree)나 랜덤 포레스트(random forest) 등의 기법이 함께 적용된 하이브리드 기법들을 제안하였다.

풍력 발전량과 관련해서는 예측 오차를 줄이기 위해 다양한 기법들이 지속적으로 개발되고 있으며, 해상 풍력에 대한 연구는 새롭게 각광받고 있는 분야이다(Jung et al., 2014). 전력수

요예측을 위해 심층신경망(Deep Neural Network, DNN)을 전력수요예측 모델에 적용한 경우는 일반 신경망에 비해 예측오차가 약 20%이상 향상된 결과를 보였다(유승형 등, 2016). 에너지 시장가격 예측분야에서 연속형 데이터에 큰 기여를 하고 있는 딥러닝(deep learning) 기법의 일종인 RNN(recurrent neural network)을 응용한 Echo State Network (ESN) 기법이 다른 통계적 기법에 비해 오차가 향상된 결과를 보인 것으로 보고되었다(Crisostomi et al., 2015). Lombardi et al.(2009)은 태양광과 풍력과 함께 열병합 발전소와 산업단지를 수요 부하단으로 구성하고 전체 시스템의 운영비용을 최소화하는 모델과 VPP 구조를 최적화하는 방법을 제안하였다. 또한 VPP 운영전략 수립에서 DR(demand response)과 재생에너지의 출력에서의 불확실성이 고려되기도 했다(Ju et al., 2016).

최근에는 신재생에너지의 도입으로 배전계통의 전압상승과 같은 문제를 해결하기 위해 DSO(Distribution System Operator, 배전계통 운영자)의 공급용량 제약을 고려한 VPP의 운영 전략을 수립하는 연구도 진행되었다(박성원, 2018). 국내의 경우, VPP에 대한 관심은 아직까지 연구개발 수준에 그치고 있다. 하지만 DR을 통한 수요관리 및 에너지 효율화에 대한 관심은 높은 편이다. 이와 관련하여 DR기반 VPP 운영자가 직접계량기의 설치를 하지 않고도 한국전력의 i-Smart Open API를 활용하여 효율적으로 전력수요고객의 데이터를 분석할 수 있는 방안이 제시되기도 하였다(임정택 등, 2015).

그러나 앞서 살펴본 선행 연구에서 아직까지 분산전원과 전력계통의 연계, 그리고 전력시장

의 참여까지 포함하여 종합적인 관점의 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 이에 분산전원의 최적구성 및 운영과 전력계통과의 연계, 그리고 전력시장에의 참여 등을 위해 필요한 요소기술들을 전체 최적화 관점에서 연구한 내용을 본 논문에서 기술하였다. 특히, 본 연구의 VPP는 선행 연구와 대비하여 분산전원의 성공적인 운영과 관리를 위한 원천 기술로서 분산전원의 발전 데이터와 기후 데이터를 모니터링하고 VPP의 안정적인 운영을 위한 높은 정확도를 가지는 예측 및 최적화 모델을 만들기 위한 빅 데이터를 확보할 수 있는 기반 기술을 제공하고 있다. 이와 함께 VPP의 성공을 위해 핵심인 높은 정확도를 가진 예측 및 최적화 모델을 실증 데이터로 지속적으로 개선하는 프로세스를 가지고 있다는 것이다. 이것은 모델 기반 시뮬레이터를 실증 데이터 기반으로 지속적으로 모델을 평가할 수 있기 때문이다. 또한 본 연구의 VPP는 선행 연구에서 많이 다루지 않은 계통의 주파수가 불안정할 때 제어 가능한 ESS를 활용하여 계통 안정화를 위한 계통운영 보조 서비스를 제공하고 있다. 이러한 특징은 기존 VPP 연구와 대비해 VPP의 상용화를 위해 개발된 것이다.

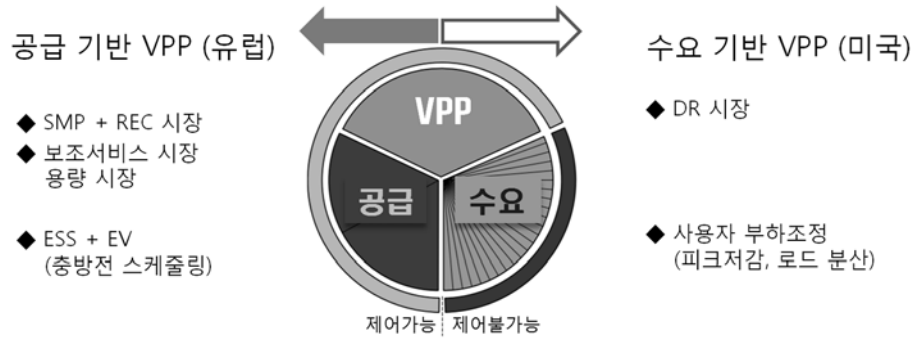
2.3 가상발전소의 운영사례

미국에서의 가상발전소는 효율화와 수요관리를 중심으로 하는 모델로 다양한 유형의 DR 자원을 통합하여 기존의 발전기 특성을 모방함으로써 비상시 피크용량(peak capacity), 유효 전력 및 순동예비력과 같은 계통보조서비스를 제공하는 것을 목적으로 한다. 즉, 가상발전소

는 피크부하(peak load)가 걸릴 경우 계통을 직접 보조하고 보완하는 기능을 한다. 대표적인 모델로는 NOC(network operation center)와 PGE(portland general electric)의 모델이 있다. NOC(network operation center)은 통신망을 이용하여 수요대응 자원을 원격 제어하는 부하관리사업 모델로 VPP를 통해 가격신호에 반응하여 사전에 계획된 운영전략에 따라 자동으로 수행되는 실시간 DR 형태로의 변화에 대응할 수 있다. 또한 PGE(portland general electric)의 모델은 수요대응이 아닌 고객 소유의 비상발전기를 통합하여 피크부하 감축에 이용하는 DSG(dispatchable standby generation) 프로그램으로 연료전지, PV 등 분산전원들을 연결하여 피크부하 해결 가상발전소를 만들 수 있게 한다. 이 경우 도매전력 시장가격이 매우 높게 상승하는 경우 전력구매비용을 절감할 수 있다.

반면, 유럽연합 국가들의 가상발전소 연구개발 동인은 신재생에너지 보급 확대에 따른 전력계통 신뢰도 문제를 해결하고자 소규모 분산전원의 전력시장 참여를 가능하게 하는 분산형전원의 통합운영 기술 플랫폼을 구축하는 것이다. 즉 전력수요를 각종 전자기기를 통해 실시간으로 파악하고, 공급부분에서는 태양광, 풍력, ESS 등 다양한 분산전원의 설비를 정보통신 기술로 통합하여 하나의 발전소처럼 운영함으로써 EU 배전계통을 비용 효율적이고 안정적이며 지속가능하도록 구현하고자 했다. 이상으로 미국과 유럽의 가상발전소 운영특성을 정리하면 <그림 1>과 같다.

EU 중에서도 독일과 덴마크가 전 세계적으로 VPP 기술 분야를 주도하고 있으며, 이와 관련하여 다양한 R&D 실증 프로젝트를 진행하



<그림 1> 미국과 유럽의 가상발전소 운영 특성

<표 1> 가상발전소 요소기술 개발/운영사례

회사(국가)	주요 사업	주요 특징
Enbala (캐나다)	전력망 균형유지 소프트웨어 플랫폼 개발 운영	<ul style="list-style-type: none"> 지역 전력망 운영기관과 통신하고 수초 내에 전력망 신호에 반응할 수 있는 전력망 균형유지소프트웨어 플랫폼(grid-balancing software Platform)을 개발하여 분산형 전원의 효율화 및 최적화를 달성 총 1,052개의 분산전원 네트워크 보유 - 총용량: 45MW(3년 이내 350MW 확대 전망)
Sunverge (미국)	ESS 및 에너지 관리 시스템 융합형 VPP 솔루션 개발 운영	<ul style="list-style-type: none"> 하드웨어(ESS)와 소프트웨어(EMS)를 동시에 판매할 수 있는 사업모델 수립 VPP 솔루션은 유틸리티 기업 대상으로 판매하고 있으며, ESS 소비자 대상으로는 수요관리 서비스를 제공하고 있음 현재 AGL Energy社, Schneider Electric社, 최근에는 한국전력공사와 협력하여 다수의 가상 발전소 실증사업 추진 중
ENERNOC (미국)	세계 최대 규모의 전력 수요대응 기반 가상 발전소 사업자	<ul style="list-style-type: none"> 17년 이상의 전력수요대응 제도 참여사 관리, 지원 노하우 보유 전 세계 12개국에서 운영/참여 용량 약 6GW 이상, 국내 1.1GW 규모의 수요대응관리프로그램 운영 참여사 관리, 부하 패턴 분석, 에너지 효율화, 전력 사용 관리 등 서비스 제공
NEXT KRAFTWERKE (독일)	독일, 오스트리아, 벨기에, 프랑스, 네덜란드, 폴란드, 스위스 및 이탈리아에서 VPP 사업운영	<ul style="list-style-type: none"> 양방향 통신기인 Nextbox를 통해 분산전원 출력제어, 전력모집/수요 관리 진행 중(총 4,000개의 분산전원 네트워크 보유, 총용량 2,500MW : IoT, 빅데이터 기술 접목→ 전력모집, 수급관리→가격/사용량 최적화) 에너지 도매 서비스 외에도 분산전원의 유연성을 활용한 수급 균형 서비스도 제공하고 있어 유럽 전력계통 안정화에 크게 기여하고 있음

고 있지만 상업화에 이르기까지는 아직 시간이 필요한 것으로 판단된다. 특히, 독일에서는 넥스트 크라프트베르케, 노르웨이에서는 스타크 크라프트, 덴마크에서는 Dong Energy 등이 수

많은 분산 발전사업자를 통합하고 있다. 넥스트 크라프트 베르케는 2,000MW 이상의 발전사업자를 통합하고 있고 소규모 발전소와 전력거래 시장 중개 기능을 통해 수수료를 받고, 발전소

의 예비발전능력을 거래하는 사업모델로도 성장하고 있다(조강희, 2017; 여정훈 등, 2014). 그 밖에 주요 선진국에서 가상발전소 구축에 필요한 요소기술을 개발하여 사업을 진행 중인 대표적인 기업들의 운영 사례를 살펴보면 <표 1>과 같다.

국내의 경우 VPP에 대한 연구는 초기개발 수준에 그치고 있지만, DR을 통한 수요관리 및 에너지 효율화에 대한 관심은 높은 편이다. 이와 관련된 에너지 정책 또한 매우 적극적으로 도입하고 있기 때문에 향후 VPP 도입에 대한 동인은 충분히 조성되어 있는 것으로 판단된다. 국내에 DR(demand response)제도는 2014년도에 처음 도입되었으나 2016년도에 1,900개 업체가 DR 시장에 참여하여 약 3GW 규모의 전력을 1,000억 원대에 거래하는 시장으로 빠르게 성장하였다. EnerNoc Korea는 한국의 수요 대응제도 성장에 대비하여 한국의 전력 인프라 환경을 반영한 수요대응 모니터링 플랫폼인 'E-Smart Platform'을 2016년도에 구축하여 서비스를 진행하고 있다(김형민, 2016).

Ⅲ. 가상발전소 플랫폼 개발 방법

3.1 가상발전소 도입방안

VPP의 성공적 도입을 위해서는 분산된 에너지 자원들을 하나의 발전설비로 통합하여 관리하고 운영할 수 있어야 하고, 분산발전소들의 설비특성과 기후 환경적 특성을 반영한 발전소 운영전략이 필요하다. 또한 생산된 전력을 전력 시장에서 가장 유리한 가격으로 판매할 수 있

는 시스템화 된 입찰전략이 중요하다. 이를 통해 가상발전소는 개별적 발전설비들을 하나의 설비와 같이 최적 운영함으로써 최대치의 수익을 기대할 수 있다. 이를 위해서는 VPP 통합관리자(agggregator)가 IoT(internet of things) 기술을 활용해 전력의 생산과 소비관련 데이터를 얻고, 더 나아가 기계학습과 인공지능을 활용해 전력의 생산량과 소비량을 예측하여 분산전원을 최적화하면서 전력시장에 참여할 수 있도록 하는 요소기술 개발이 전제되어야 한다.

가상발전소 구성을 위한 기본적 요소로 다양한 분산에너지 자원에서 생산된 전력과 기존 송배전 인프라와의 최적 연계를 위한 지능형 원격 검침계량기(Advanced Metering Infrastructure, AMI)와 같은 정보통신 인프라의 구축이 필수적이다. 지능형 계량기는 송·배전 인프라의 지능화를 위한 가장 기본적인 구성요소다. 광범위한 지역에 설치된 AMI는 인터넷과 정보통신기술을 기반으로 하여 고장진단, 누전 등 설비운영상의 이상여부를 원격으로 판단하고 제어할 수 있게 해주며 전력공급 서비스를 배전단에서 송전단 수준으로 확장시킬 수 있다. 또한 다양한 유형의 분산에너지 자원으로 구성되는 VPP의 특성을 반영하여 이런 분산 에너지 자원들이 하나의 발전소처럼 운영될 수 있도록 해주는 네트워킹과 제어기술이 전제되어야 한다. 즉 VPP 단위의 네트워킹과 제어기술을 바탕으로 가상발전소 내 모든 설비의 운영 효율의 확보와 함께 전력시장 및 계통운영에 대한 제어를 수행할 수 있어야 한다.

VPP를 구성하는 요소기술 자체는 소비자 단위의 배전 전력기술로 분류할 수 있지만, 분산전원들의 집합체로서 도매전력시장 및 계통운영

에 참여하는 VPP 그 자체는 하나의 발전소로서 기존의 중앙급전발전기와 같은 역할을 수행하기 때문에 VPP 단위의 전력생산 및 공급능력 가시화를 위한 계통운영 기술기준의 수립이 선행되어야 한다. 또한 VPP 도입을 촉진하기 위해서는 중앙급전발전기 중심의 전력시장을 VPP의 참여가 허용되는 경쟁적 전력시장으로 바뀌어야 한다. 이를 통해 다양한 분산 에너지 자원에 의한 발전량의 적정한 거래가격과 계통보조서비스 가격을 제공해야 한다. 이는 단순히 VPP 도입만을 위해서가 아니라 스마트그리드(SG), 마이크로그리드(MG), 수요대응(DR), 에너지저장장치(ESS)와 같은 에너지 신기술의 확산과 이런 신기술을 기반으로 하는 에너지 신산업의 발전을 위해서도 반드시 필요한 선결사항이라 할 수 있다. 즉, 전력신기술과 에너지 신산업 발전을 위해서는 공정한 전력시장의 형성과 함께 다양한 사업자의 시장참여를 통한 전력시장의 경쟁 활성화가 중요하다. 이러한 공정한 경쟁적인 전력시장은 시장 참여자에게 성과에 대한 적절한 보상과 서비스 가치에 대한 객관적 평가를 제공한다. 또한 객관적인 가격, 성능과 기술 등을 기준으로 경쟁력을 결정하는 시장구조는 시장 참여자 모두에게 강력한 혁신의 동기를 부여함으로써 에너지 신산업의 성장을 더욱 촉진시킬 수 있을 것이다.

3.2 요구사항 분석 및 아키텍처 설계

본 연구에서 연구하고자 하는 가상발전소(VPP) 플랫폼이란 ICT기술과 다양한 기술요소들을 결합하여 발전, 에너지 저장, DR 등에 관련된 다양한 자산을 효과적으로 관리할 수 있

도록 하는 시스템이다. 이 플랫폼은 일반적으로 소규모 공급측 자원과 수요측 자원을 연결하기 위하여 ICT 기반으로 통합 운영할 수 있도록 하여 전력계통 운영의 유연성을 강화하는데 기여한다. 해당 시스템 구현을 위해서 현장의 분산 발전원의 세부 데이터를 취득하는 장치, 재생에너지 발전원의 발전량 예측을 위한 기상정보 수집장치, 그리고 이 데이터를 통합하고 저장하는 장치, 연산하여 예측하고 경제성을 평가하는 장치, 발전원과 ESS 등을 연계하여 최적 입찰량을 결정하고 제어하는 장치 등으로 구성된다. 개발하고자 하는 VPP 플랫폼은 풍력, 태양광 등 소요량의 변동성이 높은 재생에너지를 ICT 기술을 통해 중앙급전 발전기화 함으로써 계통 안정성을 제고하고, 분산전원 발전설비를 경제적으로 운영하며, 이를 통한 신수의 창출을 도모하는데 기여할 수 있다. 또한 VPP 솔루션을 활용하여 전력시장과 신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC) 현물시장에 참여함으로써 신재생에너지 설비의 경제성을 극대화할 수 있다.

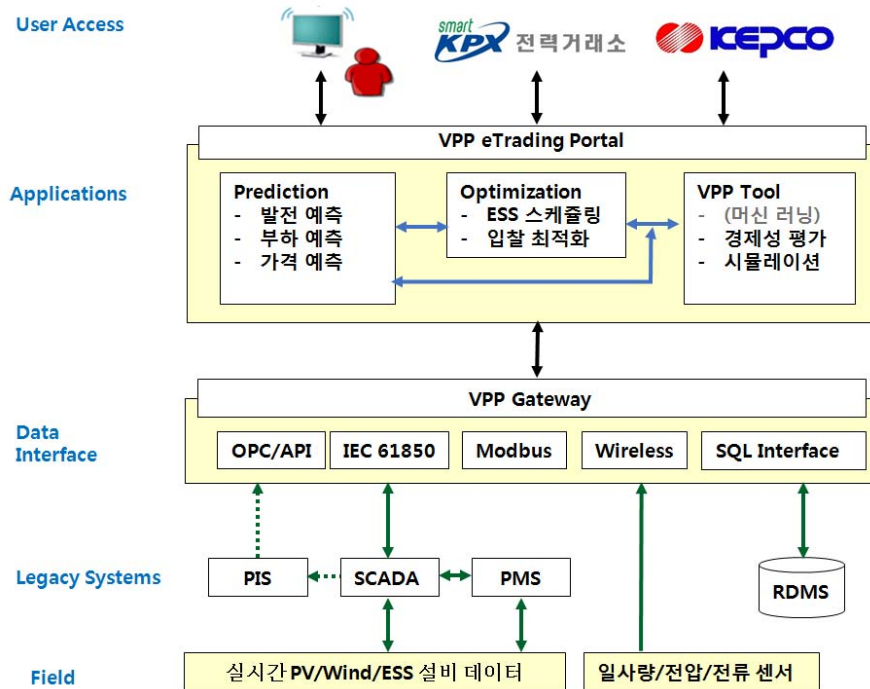
VPP 플랫폼 개발에서 주요 고려할 요소들은 다음과 같다. 먼저, 재생에너지의 경제적 설비 운영을 위해서는 넓게 분포되어 있는 소규모 분산형 발전 설비의 특성과 비용을 고려해야 한다. IoT기술을 기반으로 재생에너지의 지역적 분산성을 경제성으로 대응할 수 있도록 분산전원 제어가 개발되어야 한다. 분산전원 제어기는 VPP의 운영 소프트웨어(Software, S/W)와 재생에너지 설비 현장 사이를 연결할 수 있는 Gateway 기능을 수행해야 한다. 이를 위해서는 국내외 전력시장에서 운영기능이 검증된 제품과 기술이 적용되어야 한다. 그리고

게이트웨이를 통해 분산전원의 출력 현황을 실시간으로 모니터링 할 수 있어야 VPP 솔루션을 통한 운영전략이 실효성을 가질 수 있고, VPP운영자는 계통 안정성을 유지할 수 있게 된다. 무엇보다도 앞서 언급한 대로 VPP가 생성하는 충방전 계획에 따라 ESS의 충방전 제어를 수행할 수 있어야 한다.

또한 날로 위협이 증가하고 있는 사이버 테러로부터 시스템을 보호하기 위해 국가가 인증할 수 있는 수준의 사이버 보안 적합성을 확보하고 있어야 한다. VPP 운영자는 계통 안정성을 유지하면서 신수익을 창출할 수 있어야 한다. 계통 안정성을 위해서는 무엇보다도 VPP S/W와 분산 재생에너지 설비 간의 연계가 원활해야 한다. 그리고 환경 요인에 크게 좌우되는 재생에너지의 발전 예측, 하루 전(Day-Ahead,

DA) 부하추정, 전기가격인 계통한계가격(System Marginal Price, SMP)과 REC 현물거래가격 예측이 가능해야 한다. REC 현물가격 예측은 중개거래수익을 극대화하기 위해 요구되는 기능이다. VPP가 실행되는 서버는 VPP 운영 시스템이 실행되는 실행서버, 예측 모델을 이용해 예측값을 계산하는 계산서버 등의 로컬 서버와 하위 서버들을 통합하는 기능으로 확장이 가능해야 한다.

VPP가 계통 안정성 보장 및 경제적 설비 운영의 기능을 통해 목적하는 이익 최대화를 위해 분산자원 전력 중개거래 기능이 필수적이다. 이때 시장거래를 보호하기 위한 분산전원과 VPP 서버간의 사이버 보안 매커니즘을 포함해야 한다. 이외에도 VPP 시스템과 같은 상용화 시스템을 개발하기 위한 요구사항을 분석에서



<그림 2> VPP 시스템 아키텍처

는 사회심리적 요소도 동시에 고려해야 한다 (김중욱, 김병곤, 2000).

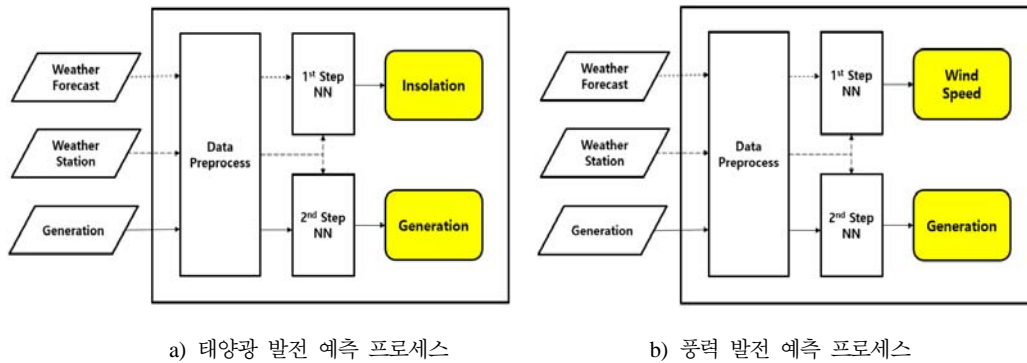
이상에서 제시된 여러 가지 기능적 요구사항들을 충족시킬 수 있는 VPP 아키텍처를 제시하면 <그림 2>와 같다. VPP 플랫폼은 다양한 사용자들의 활용할 수 있는 VPP eTrading Portal과 다양한 전력설비 및 센서정보를 처리하는 부분으로 나눌 수 있다. 다양하고 복잡한 가상발전소를 최적으로 운영하는데 있어 가장 중요한 요소기술로는 발전량 예측과 운영 최적화 기술이 가장 중심이 된다.

3.3 발전량 예측 방법

VPP의 요소기술 중 가장 핵심적인 기술 중 하나가 발전량 예측 기술이다. 앞서 언급한대로 재생에너지 중 태양광과 풍력이 본 논문의 대상이다. 태양광과 풍력은 조사된 태양광과 일정 속도 이상의 바람을 각각 발전원으로 하고 있다. 각각의 발전원이 하루의 시간대별, 일별, 계절별로 각각 변동성이 매우 크기 때문에 분산 재생에너지의 변동성을 고려해야 한다는 것이다(Antonanzas et al., 2016; Voyant et al., 2017). 이러한 변동성을 대응하기 위한 방안으로 하루 전(DA) 발전량 예측을 정확하게 해야 VPP 운영시스템에서 하나의 발전 프로파일로 통합할 수 있게 되는 것이다. 각각 설정 조건에 따라 달라질 수 있으나, 일반적으로 발전 데이터는 초당 혹은 분당 수집되고 있어 수년간 수집된 데이터는 빅데이터를 형성하게 된다. 그러므로 빅데이터 특성에 맞게 독립변수인 기후 데이터와 종속 변수인 발전량의 관계 분석을 해야 한다.

먼저 기후데이터와 태양광과 풍력 발전의 이력 데이터가 입력이 되고 예측모델 개발 알고리즘에 적합하게 데이터를 준비하는 데이터 전처리가 필수적이다. 데이터 전처리에는 결측값 처리가 중요하다. 기후 데이터는 기상청의 제공하는 공공데이터를 기본으로 하고, 발전량 이력 데이터를 연속형으로 간주한 후 선형 보간법이나 스프라인 보간법으로 결측값을 예측하거나, 결측값이 존재하는 경우 해당 레코드 전체를 제거하는 방법 중 선택하게 된다. 데이터 처리는 예측 기술의 핵심으로 통계기법에 기반한 상관관계 분석, 시계열 분석, 데이터 마이닝, 기계학습 등의 다양한 기술이 알려져 있다 (Paluszek and Thomas, 2016). 데이터 처리 결과로 기후 데이터와 발전량 데이터 간의 관계식이 생성되는데, 이렇게 예측 모델을 생성하는 것이다.

본 연구에서는 기계학습 중 신경망(neural network) 기법을 이용해 발전량 예측 모델을 개발하였다. 발전량 예측 모델은 <그림 3>에 나타난 바와 같이 2단계로 개발되었다. 태양광 발전의 경우, 기후 예측값과 기상관측기 실측값과 태양광 발전값을 입력으로 하고, 전처리 과정을 거친 후 각각 태양광 일사량 예측 모델과 태양광 발전량 예측 모델 2단계로 태양광 발전량을 최종 출력값으로 하였다. 이와 유사하게 풍력 발전의 경우, 기후 예측값과 기상관측기 실측값과 풍력 발전값을 입력으로 하고, 전처리 과정을 거친 후 각각 풍속 및 풍향 예측 모델과 풍력 발전량 예측 모델 2단계로 풍력 발전량을 최종 출력값으로 하였다.



<그림 3> 신경망 기법을 이용한 발전량 예측 모델 개발 프로세스

VPP를 운영하기 위해서는 부하 및 SMP 등을 예측할 수 있어야 한다. 다만 본 논문에서 대상으로 하는 VPP는 부하를 포함하고 있지 않고, 구성원인 분산재생에너지에서 생산된 전기의 판매를 다루고 있기 때문에 부하 예측에 대해서는 제외하고자 한다. 또한 전력 판매 및 중개거래를 위해 필수 정보인 SMP는 입찰 마감 시간인 오후 6시보다 3시간 이른 오후 3시에 발표되기 때문에 입찰을 위해 SMP의 예측이 필요하지 않기 때문에 부하와 함께 본 논문에서 논의하는 것은 제외하고자 한다. 향후 부하를 포함하고 수요대응 기능을 위해서는 부하 예측과 함께 1일을 초과하는 중장기 전략 수립을 위해서는 주간, 월간 SMP 예측기술이 반드시 필요하다.

3.4 가상발전소 운영 최적화 방법

일반적으로 VPP는 이익 최대화를 목표로 한다. 이를 위해서는 시간별도 전기가격이 변동하는 도매시장 환경과 국내의 보조금 정책에 따라 달라지는 REC 보증 기준에 맞춰 발전된 전기의 판매나 ESS의 충방전을 결정해야 한다.

이때 적절한 결정이란 목표를 달성하기 위한 조건을 개인의 경험이나 지식에 의존하지 않고 수리적 분석을 통해 최적해를 찾는 것으로 볼 수 있다(Lombardi et al, 2016). 최적해를 찾는 기술 중 대표적인 것으로 수학적계획모델 기반 최적해를 찾는 알고리즘과 휴리스틱으로 특정 문제가 갖는 정보에 구속되지 않고 다양한 문제에 적용가능한 상위수준의 휴리스틱 기법인 메타 휴리스틱(Meta-Heuristic)이 있다. 또한 지능형 기술을 이용한 방법도 고려할 수 있다. 특히 다중에이전트 기술의 이용할 경우 문제를 분산적으로 쉽게 해결할 수 있다(김태운, 고창성, 김원경, 1999).

수학계획 모델에는 선형계획법, 네트워크 분석, 정수계획법, 비선형계획법 등이 있고, 메타 휴리스틱은 유전자 알고리즘(Genetic algorithms, GA), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA), 터부탐색(Tabu Search, TS) 등이 있다. 수리계획법은 가용한 자원이 한정되어 있는 조건 하에서 수익의 극대화나 비용의 최소화와 같은 경영상의 목적을 달성하는 문제의 해를 찾는 의사결정 기법으로 크고 복잡한 의사결정 문제를 모형화(modeling) 하고 그 해답을 찾는 과정

에 활용되는 유용한 기법이다.

본 연구에서는 수익의 발생이나 자원의 사용이 선형(linear)의 비율로 변한다고 가정하는 모형으로 선형계획법(Linear Programming, LP)과 정수 조건이 혼합된 혼합정수 계획법(Mixed Integer Linear Programming, MILP)을 기본으로 하고 있다. 또한 문제의 크기와 최적화 주기에 따라 메타 휴리스틱법을 적용하고 있다. 목적함수는 전력시장 및 전력계통운영정보를 연계한 공급원 수익을 최대화하도록 하였다. 특히, VPP 연계 요소 중 에너지 저장장치인 배터리의 최적 운전조건을 제시하고, 최대 수익을 위한 전력판매 전략이나 배터리의 충방전 조건을 고려하고 있다.

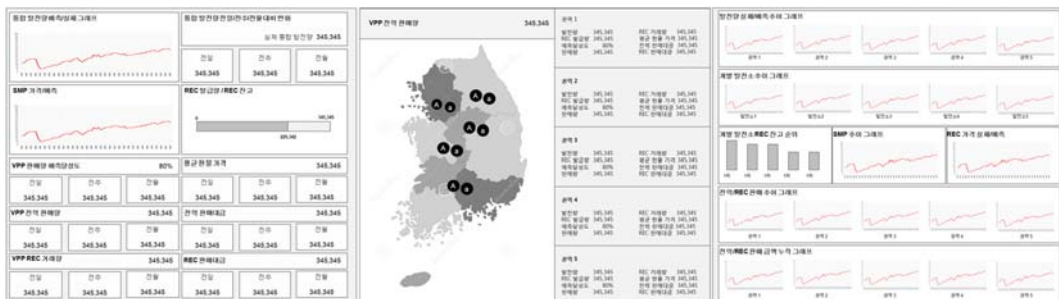
IV. 가상발전소 플랫폼 솔루션 개발

4.1 통합관제센터 UX 개발

VPP 시스템은 ICT기술을 이용해 넓은 지역에 소규모로 분산되어 있는 다수의 재생에너지 설비를 모니터링하고 스케줄링 지령에 따라 에

너지 저장 장치 충방전 제어를 통한 전력 시장에서 계통 안정성을 제고하면서 경제적 설비 운영을 통해 수익을 극대화해야 한다. 그리고 실시간 운영시스템을 위해 통합관제센터에서는 효율적인 UX(user experience)가 개발되어야 한다(장형철 등, 2015). 통합관제센터 UX에서는 VPP의 핵심 기능들이 종합적으로 구현되면서 또한 효율적으로 데이터 종류와 특성에 따라 시각화 방안을 선정해야 한다.

<그림 4>는 통합관제센터 UX의 예로서 좌에서 우로 각각 통합상황판, 지역별 현황 모니터링, 개별 발전소 상세현황을 배치하였다. 통합상황판은 발전, 가격, 판매량, 판매대금의 일련의 순서대로 표시하였다. 시계열 데이터는 선 그래프로 표시하였고, REC 잔고는 띠 그래프로 표시하였다. 모든 데이터는 일간, 주간, 월간 변화율로 기준에 따른 변화 정도를 나타내었다. 지역별 현황 모니터링은 지도를 이용해 지역별 VPP 주요 정보를 시각화하였다. 시각화 기능을 활용해 지역별로 기후 정보, 발전소 가동 상태, 예측 오차 등의 위험 정도를 아이콘으로 표시할 수 있다. 이를 통해 VPP 운영자는 분산 자원의 상태와 기후 상태를 모니터링할 수 있다. 또한 재생에너지 설비의 운전 및 유지보수(Operation & Maintenance, O&M) 서비스를



<그림 4> VPP 통합관제센터 UX 예시

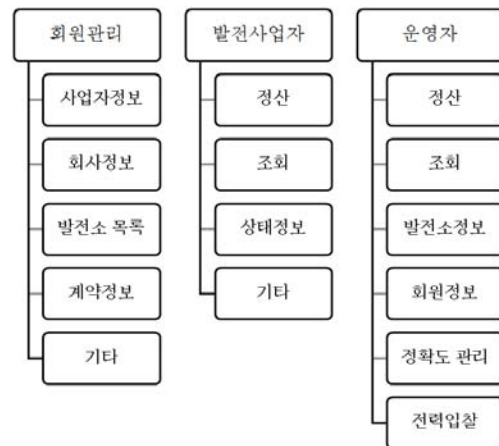
제공할 수 있도록 하여 효율적 원격관리를 가능하게 한다. 지역별 상태정보로는 발전량과 함께 전력 판매량, 판매대금 등을 함께 표시하였다. 이를 통해 발생 수익 분포를 모니터링할 수 있게 된다. 마지막으로 통합관제센터 UX에 개별 발전소 상세 현황에서는 지역별 상세 발전량과 예측의 추이를 표시할 수 있다. 그리고 지역별 전력과 REC 판매 추이 그래프와 판매 금액 누적 그래프를 나타내었다.

4.2 분산자원 전력중개거래 기능 개발

VPP 시스템 요구사항분석에서 살펴본 바와 같이 VPP는 계통 안정성 보장 및 경제적 설비 운영의 기능과 함께 분산자원 전력 중개거래 기능이 필수적이다. 전력 중개거래 기능을 통해 VPP의 수익을 창출할 수 있게 된다. 중개거래 수익은 전력 자체 판매와 REC 판매 위탁에 대한 수수료가 기본적이며, 전력중개거래에서 전 날 입찰한 전력 예상 프로파일이 당일 실제 전력 판매 프로파일과의 일치 정확도에 따라 VPP 운영자는 추가 수익이 발생할 수 있거나 혹은 오차가 커져서 손실이 발생할 수 있게 된다(Ju et al, 2016). 그러므로 VPP 운영자에게는 발전 설비 운영 관리와 함께 예측 정확도를 일정 수준 이상으로 유지 관리하는 것이 매우 중요하다.

전력 중개거래 주요 기능분류는 <그림 5>와 같이 회원관리, 발전사업자, 운영자 등 그룹으로 분류할 수 있다. 먼저 회원관리에서는 사업자 정보와 계약정보와 계약에 해당하는 발전소 목록 관리 등이 포함하였다. 이를 통해 시장 참여하기 위한 등록이 되는 단계이다. 발전사업자

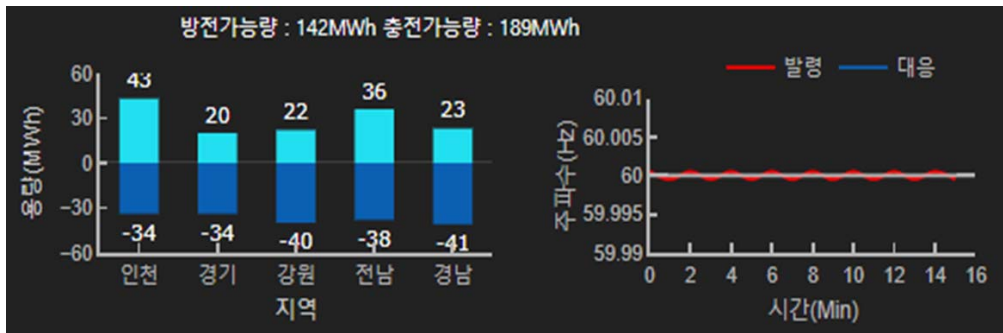
그룹에서는 분산전원 소유자들이 발전 설비 정보를 관리할 수 있어야 하며 각 자원 이 시장에 참여한 이후에 수행되는 평가 및 정산에 대한 정보를 조회할 수 있게 된다. 운영자 그룹에서는 운용중인 가상 발전소 내 분산 전원의 통합 정보 조회와 개별 분산 전원들의 통신, 가동, 상태 정보 조회 기능 등이 포함되어 있다. 예측 정확도 관리는 데이터 엔지니어링을 이용해 예측 정확도의 추세를 관리하며, 오차가 관리 영역에서 벗어나 오차가 커질 때 과거 데이터를 기반으로 기계학습을 재수행하여 예측 모델을 최신화해서 예측 정확도를 유지하도록 한다. 기본이며 필수인 전력입찰 기능은 운영자 그룹에 속해 있다.



<그림 5> 전력 중개거래의 주요 기능 분류

4.3 계통운영 보조서비스 기능 개발

계통운영 보조서비스(ancillary service)는 전력계통의 안정 유지하기 위해 제공하는 서비스를 말한다. 이 서비스에 주파수 조정, 적정 예비전력의 확보, 무효전력수급, 자체 기동발전 등



<그림 6> 주파수 추종 서비스 관리화면

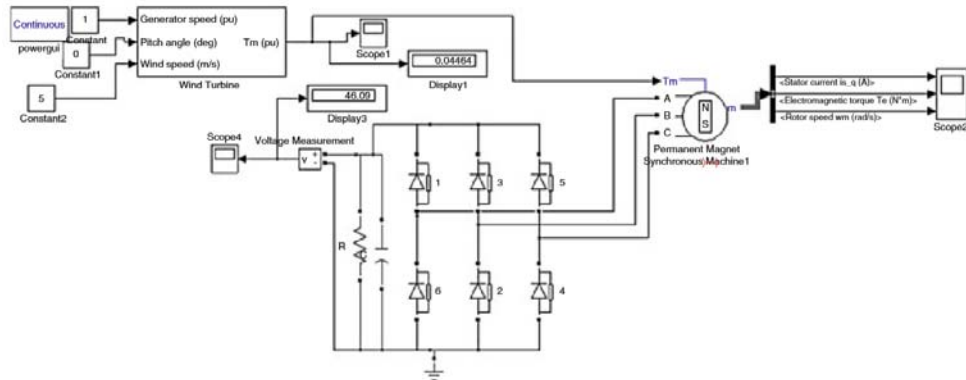
이 존재한다. 계통운영 보조서비스는 시장참여자가 전력계통의 신뢰도와 안정성을 유지하기 위해 발전사업자가 공급하는 서비스를 말한다(오창진 등, 2013). 본 연구에서는 변동성이 큰 전력수요와 계통이나 발전기의 문제로 인한 계통주파수 변동을 제어하기 위해 에너지 저장장치의 충방전을 이용해 자동적으로 대응하여 주파수 추종(governor free) 운전을 다룰 수 있게 한다.

<그림 6>은 주파수 추종 서비스 관리 화면에 대한 하나의 예를 나타내고 있다. 수요가 늘어나거나 공급이 줄어들어 계통의 수급이 불안정해지면 VPP는 각 지역별로 에너지 저장장치에 저장된 전력으로 계통에 공급하여 주파수 변동을 대응하거나, 반대의 상황(수요가 줄어들거나 공급이 늘어나는 경우)에서 계통의 수급이 불안정해지면 VPP는 계통으로의 전력판매를 중지하고 시스템 내의 에너지 저장장치의 충전 가능한 양만큼 전력을 충전하여 계통의 입장에서 전력 공급이 줄어들도록 하여 주파수 변동에 대응하게 된다. 이러한 주파수 추종은 수분 내에 자동으로 이루어진다.

4.4 가상발전소 모의 시뮬레이터 개발 및 적용방안

개발된 시스템의 성과를 분석하기 위해서는 모의실험을 할 수 있는 시뮬레이터의 개발과 구축이 중요하다(손달호, 1992). 본 연구에서는 VPP 솔루션의 성능을 검증하기 위해 모의 시뮬레이터를 제안한다. 모의 시뮬레이터를 통해 VPP 솔루션 플랫폼의 기능을 시험할 수 있다. 모의 시뮬레이터는 물리적 모델을 기반으로 VPP의 구성 요소를 모사할 수 있게 된다. 앞서 언급한 대로 본 연구에서는 태양광 발전소, 풍력발전소, ESS 등 3종의 구성요소를 대상으로 하고 있다. 모의 시뮬레이터는 블록 다이어그램 환경으로 구성된 모델기반 설계도구로 알려진 맵스워크(mathworks)사의 시뮬링크(simulink)를 이용해 개발하고자 한다(Sumathi et al, 2015). <그림 7>은 시뮬링크를 이용한 풍력발전기 모델의 예를 나타낸다.

모의 시뮬레이터를 이용해 VPP 시스템을 검증하기 위해서는 실제 운영 이력 데이터를 이용해 예측기능과 계통연계 운전성능을 검증해야 한다. 검증 작업을 통해 시뮬링크 모델의 오



<그림 7> 풍력발전기 모델의 예(Sumathi et al, 2015)

차를 조정할 수 있다. 이 과정을 통한 설비 모델 개선은 결국 모의 시뮬레이터의 정확도를 높이고 예측 가능한 모델로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 모의 시뮬레이터에는 기후 정보와 VPP의 운영전략을 입력 데이터로 받아들일 수 있는 기능이 포함될 경우, 시뮬레이터를 이용해 VPP의 운영수익 분석에 활용될 수 있다. 즉, VPP의 최적화를 이용한 최적 운영전략을 이용한 수익 결과와 VPP의 운영전략을 적용하지 않을 때 발생한 수익 결과와 이용해 VPP 플랫폼이 기여하는 경제적 효용을 모의 계산할 수 있게 된다.

V. 결론

2000년대 초부터 신재생에너지 기술의 효율 향상과 이에 따른 재생에너지 발전의 양산화 및 사업화가 진행됨에 따라 재생에너지 발전소의 설치 규모가 빠른 속도로 증가하고 있으며 정부의 지원제도에 따라 다양한 형태의 사업 기회가 생성되면서 새로운 투자자들이 지속적으로

로 유입되고 있다. 친환경적인 재생에너지 발전소는 미세먼지를 유발하지 않아 깨끗한 전기로써 우리 삶의 질을 한층 높여주고 있다. 하지만 재생에너지 발전의 대부분을 차지하는 태양광 발전과 풍력 발전은 기술적 특성상 일사량·풍속 등 기후조건에 따라 생산되는 전력량이 유동적인 변동성을 가지고 있으므로, 전력망 안정성을 저해할 수 있으므로 이를 보완하기 위한 기술적, 제도적 장치가 필수로 요구되고 있다.

변동성이 큰 재생에너지 발전원의 전력을 일시 저장할 수 있는 에너지저장장치 보급 확대가 망 안정성을 높이는 해법 중 하나로 제시되고 있으며, ICT 기술과 예측 및 최적화 기술을 융합하여 재생에너지를 포함하는 분산전원을 중앙급전 발전기와 같은 유연성과 제어가능성을 부여할 수 있는 가상발전소 기술과 해당 기술 적용을 위한 전력 중개거래 허용 및 중개 인센티브 부여 등의 방안이 논의되고 있다.

본 연구에서는 태양광과 풍력의 재생에너지 발전원과 제어 가능한 에너지 저장장치를 기반으로 한 가상발전소 개발사례를 제시하였다. 특히, 예측기술과 운영전략 최적화 기술을 핵심 요소기술로 보고 이것의 적용방안을 제시하였

다. 또한 제안된 가상발전소 플랫폼의 구현요소로서 통합관제센터 UX와 분산자원 전력중개거래 시스템, 그리고 에너지 저장장치의 충방전 제어용 계통운영 보조서비스 기능 개발 내용을 소개하였다. 또한 개발된 가상발전소의 실증을 위한 VPP 모의 시뮬레이터 개발과 적용방안을 제시하였다. 제안된 모의 시뮬레이터에는 기후 정보와 VPP 운영전략을 입력으로 하고, VPP의 경제성 평가와 함께 과거 이력 데이터를 이용한 물리적 모델의 개선을 지속적으로 수행할 경우 실제 발전소 상태를 모사할 수 있는 예측 가능한 모델로 발전시킬 수 있을 것으로 기대하며, 이를 통하여 다음과 같은 성과를 거둘 수 있다.

1. 공급 및 수요를 통합하여 제어 가능한 가상발전소 운영이 가능하다.
 2. 실제 데이터를 바탕으로 가상환경으로 구축된 모의 시뮬레이터를 통해 최적 운영관리 전략수립/고장예측이 가능해진다.
 3. 발전소 매매 시 자산가치에 대한 정확한 분석이 가능해지므로 투명하고 신뢰 있는 거래가 가능해진다.
 4. 가상발전소 플랫폼을 통한 전력관련 파생시장(예 : 에너지 선물거래, RE100 증빙 등) 또는 파생서비스(발전소 유지보수, 모니터링, 매매 등) 확장이 용이해진다.
- 향후 후속 연구로 구성 발전원을 태양광과 풍력 외에 연료전지 등의 재생에너지 발전원은 물론 화력발전소까지 주목하고 이에 따른 운영 전략 최적화 모델을 추가로 개발할 필요가 있다. 화력발전은 VPP의 예측 오차에 대한 보조 수단으로 활용될 가능성이 높을 것으로 예상하고 있다. 그리고 에너지 저장장치로 급격히 확

산되는 전기자동차에 주목하고 전기자동차의 에너지 저장장치를 VPP 내에 연결하여 제어 가능한 에너지원으로 활용하도록 확장할 필요가 있다. 이를 통해 수요대응 서비스까지 새로운 수익원으로 이끌어 낼 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김종욱, 김병근, "Why Systems Analysts Ignore Socio-Organizational Concerns During Systems Analysis?," 정보시스템연구, 제9권, 제1호, 2000, pp. 189-216.
- 김태운, 고창성, 김원경, "분산 및 글로벌 구배를 위한 멀티에이전트 설계," 정보시스템연구, 제8권, 제2호, 1999, pp. 111-127.
- 김태형, 함경선, "가상발전소 분산전원의 통합관리 및 정보교환을 위한 IEC 61850 적용 연구," 한국통신학회 학술대회논문집, 2017, pp. 1430-1430.
- 김형민, "아낀 전기 공급하는 '가상발전소,'" 매일경제신문 기사, 2016.08.25.
- 박성원, "신재생원 도입 환경에서 배전계통 제약을 고려한 가상발전소 최적 운영 방법," 가천대학교 박사학위논문, 2018.
- 박용국, 이민구, 정경권, 이용구, "가변 및 민감성 부하를 고려한 대단위 가상 발전소 운영 방법," 전자공학회논문지, Vol. 52, No. 5, 2015, pp. 225-234.
- 박중성, "가상발전 최적운영 기술 개발을 위한 VPP 와 City EMS," 대한전기학회 학술대회 논문집, 2017, pp. 147-154.

- 배인수, “신뢰도 가치와 경제성 평가를 고려한 가상발전소의 최적 구성,” 한양대학교 박사학위논문, 2007.
- 손달호, “컴퓨터 시스템의 시뮬레이션 모델링에 대한 정보 구조의 구축에 관한 연구,” 정보시스템연구, 제1권, 제1호, 1992, pp. 111-122.
- 여정훈, 하영복, 윤장한, 김균관, “분산형전원(비상발전기, ESS, 태양광발전)을 활용한 VPP(가상발전소) 기반 통합에너지 관리기술,” 한국조명·전기설비학회 학술대회논문집, 2014, pp. 421-422.
- 오창진, 이종혁, 심현보, “국내외 계통운영보조 서비스 현황 비교 연구,” 대한전기학회 학술대회논문집, 2013, pp. 474-475.
- 유승형, 노재구, 김홍석, “심층신경망 기반 전력 수요예측 모델에 대한 연구,” 한국통신학회 학술대회논문집, 2016, pp. 488-489.
- 이윤환, “분산발전자원을 활용한 가상발전소 기반 기술의 전력시장 참여 방안에 대한 연구,” 전기학회논문지, Vol. 65, No. 2, 2016, pp. 94-100.
- 임정택, 이지은, 김태형, 함경선, “국내 전력수요자원시장을 고려한 VPP 시스템의 I-Smart Open API 적용,” 한국정보과학회 학술발표논문집, 2015, pp. 16-17.
- 장형철, 김제현, 김태형, 함경선, “VPP 플랫폼 운용 접근성을 고려한 사용자 인터페이스 연구,” 한국정보과학회 학술발표논문집, 2015, pp. 18-20.
- 정구형, 박만근, 허돈, “스마트그리드 하에서 가상발전소의 전력시장 참여를 위한 제도적 선결요건에 관한 제언,” 전기학회논문지, Vol. 64, No. 3, 2015, pp. 375-383.
- 조강희, “계량기 뒤의 전력시장 ‘가상발전소,’” 한국에너지신문 기사, 2017.6.19.
- Antonanzas, J., Osorio, N., Escobar, R., Urraca, R., Martinez-De-Pison, F., and Antonanzas-Torres, F., “Review of Photovoltaic Power Forecasting,” *Solar Energy*, Vol. 136, 2016, pp. 78-111.
- Crisostomi, E., Gallicchio, C., Micheli, A., Raugi, M., and Tucci, M., “Prediction of the Italian Electricity Price for Smart Grid Applications,” *Neurocomputing*, Vol. 170, 2015, pp. 286-295.
- IEA, *Digitalization and Energy*, October 2017.
- Ju, L., Tan, Z., Yuan, J., Tan, Q., Li, H., and Dong, F., “A Bi-Level Stochastic Scheduling Optimization Model for a Virtual Power Plant Connected to a Wind-Photovoltaic-Energy Storage System Considering the Uncertainty and Demand Response,” *Applied Energy*, Vol. 171, 2016, pp. 184-199.
- Jung, J., Broadwater, R. P., and Supplement, C., “Current Status and Future Advances for Wind Speed and Power Forecasting,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, 2014, pp. 762-777.
- Lombardi, P., Powalko, M., and Rudion, K., “Optimal Operation of a Virtual Power Plant,” *IEEE Power & Energy Society*

- General Meeting(PES'09)*, 2009, pp. 1-6.
- Paluszek, M. and Thomas, S., *Matlab Machine Learning*, Apress, 2016.
- Saboori, H., Mohammadi, M., and Taghe, R., “Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC)*, 2011, pp. 1-4.
- Sumathi, S., Kumar, L. A., and Surekha, P., *Solar Power and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with Matlab/Simulink, and the Role of Soft Computing Techniques*, Springer, 2015.
- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M. L., Paoli, C., Motte, F., and Fouilloy, A., “Machine Learning Methods for Solar Radiation Forecasting: A Review,” *Renewable Energy*, Vol. 105, 2017, pp. 569-582.
- Zamani, A. G., Zakariazadeh, A., and Jadid, S., “Day-Ahead Resource Scheduling of a Renewable Energy Based Virtual Power Plant,” *Applied Energy*, Vol. 169, 2016, pp. 324-340.

조영혁 (Cho, Young-Hyeok)



이주대학교 행정학과와 서울대학교 MBA를 취득하였고, 경상대학교 경영정보학과 박사과정 수학중이다. 현재 한국남동발전(주)에서 미래전략실장으로 재직하고 있으며, 주요 관심분야는 온라인 플랫폼 비즈니스 및 가상발전소 등이다.

백승엽 (Baek, Seung-Yup)



서울대학교 공학학사 및 석사와 Penn State에서 박사학위를 취득하였다. 현재 브이젠(주)의 연구소장으로 재직하고 있으며, 주요 관심분야는 재생에너지, 가상발전소, 인공지능, 딥러닝, 최적화 알고리즘 등이다.

최원용 (Choi, Won-Yong)



고려대학교 기계공학과를 졸업한 후 현대자동차(주) 연구원으로 근무하며, 양산차량에 대한 설계개선 업무를 수행하였다. 현재 한국남동발전(주)에 재직하여 가상발전소 솔루션 개발 및 신재생에너지 플랫폼 비즈니스 개발 업무를 담당하고 있다.

정대율 (Jeong, Dae-Yul)



부산대학교 경영학과에서 학사, 석사, 박사를 취득하였다. 현재 경상대학교 경영정보학과 교수로 재직하고 있으며, 주요 관심분야는 정보시스템 개발, 지능형 시스템, 인터넷 전자상거래 플랫폼, 프로젝트 관리 등이다.

<Abstract>

A Development of VPP Platform for the Efficient Utilization of Distributed Renewable Energy Resources

Cho, Young-Hyeok · Baek, Seung-Yup · Choi, Won-Yong · Jeong, Dae-Yul

Purpose

The recent concern over environmental problems such as greenhouse gas emission and fine dust contributes increasing interest in renewable energies. However the intrinsic characteristics of renewable energies, intermittent and stochastic generation, might cause serious problems to the stability and controllability of power grid. Therefore countermeasures such as virtual power plant (VPP) must be prepared in advance of the spread of uncontrollable distributed renewable energy resources to be one of major energy sources.

Design/methodology/approach

This study deals with the design concept of the VPP platform. we proposed as a technology solution for achieving the stability of power grid by guaranteeing a single power profile combining multiple distributed power sources with ICT. The core characteristics of VPP should be able to participate in the grid operation by responding to operation instructions from the system operator, KPX, as well as the wholesale electricity market.

Findings

Therefore this study includes energy storage device(ESS) as a controllable component as well as renewable energy resources such as photovoltaic and wind power generation. Based on this configuration, we discussed core element technologies of VPP and prototype design of VPP solution platform according to system requirements. In the proposed solution platform, UX design for the integrated control center and brokerage system were included as well as ancillary service function to respond to KPX's operation instruction with utilizing the capability of ESS. In addition, a simulator was suggested to verify the VPP operations.

Keyword: Virtual Power Plant, Renewable Energy, Energy Storage System, Platform Business

* 이 논문은 2018년 5월 30일 접수, 2018년 6월 18일 1차 심사, 2018년 6월 28일 게재 확정되었습니다.