

논문 2015-52-5-24

# 가변 및 민감성 부하를 고려한 대단위 가상 발전소 운영 방법

## ( Large-scale Virtual Power Plant Management Method Considering Variable and Sensitive Loads )

박 용 국\*, 이 민 구\*, 정 경 권\*, 이 용 구\*\*

( Yong Kuk Park, Min Goo Lee, Kyung Kwon Jung<sup>Ⓢ</sup>, and Yong-Gu Lee )

### 요 약

가상발전소(Virtual Power Plant)는 비상발전(DG), 열병합발전(CHP), 에너지 저장 장치(ESS), 부하(Load)등과 같은 분산 에너지 자원을 ICT기반의 기술로 연계하여 하나의 단일 발전소와 같이 운영하는 기술이다. 지금까지의 가상발전소는 하나의 가상발전 플랫폼을 통하여 광범위하게 산재해 있는 다양한 분산 에너지 자원을 네트워크로 연결하는 구조를 기반으로 개발되고 실증되었다. 그러나 분산 에너지 자원 종류 및 수가 지속적으로 증가할 경우 이러한 분산 에너지 자원과 관련된 데이터 또한 기하급수적으로 증가할 수밖에 없으며 분산 에너지 자원의 분포가 광범위한 지역에 분포되어 있는 경우 하나의 가상발전 플랫폼으로 이들 모든 자원에 대한 네트워크를 중앙 집중형으로 가져가는 것은 네트워크 구성을 위한 기술적, 비용적 측면에서 매우 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 광범위한 지역에 분포되어 있는 분산 에너지 자원을 효율적으로 관리함으로써 시스템 부하에 따른 오류 확률을 낮추고, 분산 에너지 자원과의 데이터 교환의 견고성과 가상발전소의 확장성을 확보할 수 있는 대단위 가상 발전소 구성 방법을 제안한다. 또한 대단위 가상 발전소 구성 시 분산 에너지 자원을 직접적으로 제어하고 모니터링 하는 소단위 가상발전 플랫폼에서 가변 및 민감성 부하를 고려한 최적의 자원 스케줄링 방법 또한 시뮬레이션을 통해 그 결과의 유효성을 검증한다.

### Abstract

Nowadays a Virtual Power Plant (VPP) represents an aggregation of distributed energy resource such as Distributed Generation (DG), Combined Heat and Power generation (CHP), Energy Storage Systems (ESS) and load in order to operate as a single power plant by using Information and Communication Technologies, ICT. The VPP has been developed and verified based on a single virtual plant platform which is connected with a number of various distributed energy resources. As the VPP's distributed energy resources increase, so does the number of data from distributed energy. Moreover, it is obviously inefficient in the aspects of technique and cost that a virtual plant platform operates in a centralized manner over widespread region. In this paper the concept of the large-scale VPP which can reduce a error probability of system's load and increase the robustness of data exchange among distributed energy resources will be proposed. In addition, it can directly control and supervise energy resource by making small size's virtual platform which can make a optimal resource scheduling to consider of variable and sensitive load in the large-scale VPP. It makes certain the result is verified by simulation.

**Keywords:** Virtual Power Plant, Energy Resource Scheduling, Genetic Algorithm, Variable and Sensitive Loads

\* 정회원, 전자부품연구원  
(Korea Electronics Technology Institute)

\*\* 정회원, 한림성심대학교 방사선과  
(Department of Radiological Science, Hallym Polytechnic University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: kkjung@keti.re.kr)

※ 본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (20131010501760)

Received ; April 15, 2015

Revised ; April 25, 2015

Accepted ; April 30, 2015

## I. 서 론

최근의 전력 시스템은 전통적인 구조에서 분산 발전 형태로 진화하고 있다. 전통적인 전력 시스템은 발전소에서 생산된 에너지가 송전망을 따라 최종 소비자가 연결되어 있는 배전망으로 전달되는 구조이다<sup>[1]</sup>. 이러한 전통적인 전력 시스템 구조에서의 에너지 흐름은 발전과 송전 및 배전을 거쳐 소비자에게 전달되는 한방향성을 가지는 탑-다운 방식으로 장거리에 걸쳐 전력이 전달되기 때문에 높은 비용과 에너지 손실이 발생한다.

이에 반해 가상발전소 기술은 주로 배전망에 연결되어 있는 다양한 분산 에너지 자원들을 ICT기술로 연계하여 하나의 단일 발전소와 같이 동작시키는 기술로서 송전에서 배전이라는 전통적인 탑-다운 방식의 에너지 전송에서 그 역의 방향으로의 에너지 전송을 가능하게 하는 기술이다. 다만 그리드에 연결된 분산 에너지 자원의 수가 급증하여 배전망을 통해 역송되는 에너지가 커지게 되면 전력 네트워크상의 과부하, 과전압뿐만 아니라 전력 시스템의 밸런싱과 주파수 제어 등의 문제가 발생한다<sup>[2]</sup>. 가상발전소 기술을 통해, 많은 수의 소용량 분산 에너지 자원들을 보유하고 있는 시스템에 대한 시스템 관리의 분산화 기능과 서로 다른 종류의 분산 발전과 수요에 대한 스케줄을 관리할 수 있는 기능이 다양한 연구를 통해 증명된 바 있다<sup>[3~5]</sup>. 또한 많은 개발업체들은 가상발전소 개념을 근간으로 하여 주로 발전 스케줄을 다루는 에너지 관리 소프트웨어를 개발한 바 있다<sup>[6~8]</sup>.

이러한 가상발전소 운영을 위한 에너지 관리 기술은 하나의 가상발전 플랫폼이 모든 분산 에너지 자원과 연결되어 분산 에너지 자원을 중앙에서 모니터링하고 제어하는 형태의 중앙 집중형 가상발전소를 기반으로 하고 있다. 그러나 향후에 다양한 분산 에너지원의 수가 증가할수록 처리해야 하는 분산 에너지원 관련 데이터 또한 기하급수적으로 증가할 수밖에 없기 때문에 하나의 가상발전 플랫폼에서 모든 자원 관련 정보를 처리하는 중앙 집중형 가상발전소의 경우에는 시스템 부하에 따른 오류가 증가할 확률이 높아지고, 분산 에너지원과의 데이터 교환의 견고성이 떨어지며, 나아가서는 가상발전소의 확장성을 저해할 수 있기 때문에 시스템 부하를 분산하고, 데이터 교환의 견고성을 제공하고 가상발전소의 확장성을 확보할 수 있는 계층적 구조의 대단위

가상발전소를 구성해야 한다. 이러한 대단위 가상발전소를 고려한 계층적 구조의 가상발전소 구성에 대한 필요성을 언급한 연구가 있지만 각 계층에 속한 가상발전 플랫폼들과 하위 및 상위 가상발전 플랫폼간의 역할 및 관계에 대한 연구가 진행된 바는 없다<sup>[9]</sup>.

따라서 본 논문에서는 많은 수의 다양한 분산 에너지 자원이 지리적으로 매우 광범위하게 분포하고 있을 경우 이러한 분산 에너지 자원을 효율적으로 제어할 수 있는 계층적 구조의 대단위 가상발전소를 구성하고 운영하는 방법을 기술하고 대단위 가상 발전소 구성 시 분산 에너지 자원을 직접적으로 제어하고 모니터링 하는 소단위 가상발전 플랫폼에서 가변 및 민감성 부하를 고려한 최적의 자원 스케줄링 방법 또한 시뮬레이션을 통해 제안하고자 한다.

## II. 가변 및 민감성 부하를 고려한 대단위 가상 발전소 운영 방법

### 1. 대단위 가상 발전소 구성 및 운영 방법

전력시장과 연계된 대단위 가상발전소의 구성은 그림 1에 나타나 있으며 그 운영 및 제어 방법은 다음과 같다.

우선, 비상발전, 상용발전, 에너지 저장 장치, 부하 및 열병합 발전 등의 다양한 분산 에너지원은 군집건물 단위, 커뮤니티 단위, 지역 단위, 도시 단위, 도 단위 및 전국 단위에 걸쳐 분포해 있기 때문에 분산 에너지원의 분포에 따라 대단위 가상발전소를 지역단위로 한다면, 중단위 가상발전소는 커뮤니티 단위, 소단위 가상발전소는 군집건물 단위가 될 수 있다. 또한 대단위 가상발전소를 전국단위로 한다면 중단위 가상발전소는 도 단위, 소단위 가상발전소는 도시 단위가 될 수 있으며 이러한 설계는 실제 대단위 가상발전소 구성 시 분산 에너지원의 분포에 대한 면밀한 조사를 통해 각 단위 가상발전소의 범주가 결정될 수 있다.

다음으로 각 단위 가상발전소의 기능에 대해 정의할 수 있는데 소단위 가상발전소는 하위의 분산 에너지 자원들의 운영 상태를 모니터링하고 제어할 수 있는 기능, 분산 에너지 자원들의 입찰내용(발전단가, 발전가능용량)분석 기능, 분산 에너지 최적 운영을 위한 스케줄링 기능 및 전력 공급 요구량에 대한 분산 에너지 자원 간 지능형 조정 기능을 가지고 있다. 중단위 가상발전

소는 하위의 소단위 가상발전소의 상태(발전가능용량, 운영상태)를 모니터링하고 제어할 수 있는 기능, 전력 공급 요구량에 대한 소단위 가상발전소간 지능형 조정 기능, 최적 운영을 위한 소단위 가상발전소 스케줄링 기능을 가지고 있다. 대단위 가상발전소는 중단위 가상발전소의 상태(발전가능용량, 운영상태)를 모니터링하고 제어할 수 있는 기능, 전력 공급 요구량에 대한 중단위 가상발전소간 지능형 조정 기능, 최적 운영을 위한 중단위 가상발전소 스케줄링 기능을 가지고 있다.

또한, 소단위 가상발전소는 소단위 가상발전소가 보유하고 있는 모든 분산 에너지 자원들의 발전 용량 및 상태 정보를 관리하고 있으며 중단위 가상발전소는 중단위 가상발전소가 보유하고 있는 모든 소단위 가상발전소의 발전 용량과 상태 정보를 관리하고 있고 마지막으로 대단위 가상발전소는 대단위 가상발전소가 보유하고 있는 모든 중단위 가상발전소의 발전 용량과 상태 정보를 관리하고 있다. 따라서 최상위에 있는 대단위 가상 발전소는 전력 시장에 응동할 수 있는 총 발전 용량에 대한 정보를 파악할 수 있게 된다.

만일 전력시장에서 일정 양의 전력 공급 요구량을 가상발전 사업자에게 보내게 되면 최상위의 대단위 가상 발전소는 전력 공급 요구량을 중단위 가상발전소들의 개별 발전용량에 비례하여 나누어 개별 중단위 가상발전소들에게 요구하게 된다. 이때 중단위 가상발전소는 나누어진 전력 공급 요구량을 하위의 소단위 가상발전소들의 개별 발전용량에 비례하여 소단위 가상발전소들에게 재차 나누어 요구하게 된다. 이때 소단위 가상발전소는 중단위 가상발전소로부터 할당된 전력 공급 요구량을 가지고 하위의 분산 에너지원들의 발전용량을 기준으로 발전량을 할당하게 되고 분산 에너지원들은 할당된 발전량을 기준으로 발전단가를 고려하여 발전 가능량을 재차 소단위 가상발전소로 입찰하게 된다. 이때 전력시장으로부터의 가상발전 사업자에 대한 전력 공급 요구량은 대단위 가상발전소가 가지고 있는 최대 발전용량 이내이기 때문에 소단위 가상발전소에 대해서도 해당 소단위 가상발전소가 가지고 있는 최대 발전용량 이내로 전력 공급 요구량이 할당될 것이며 이때 소단위 가상발전소는 각 분산 에너지원으로부터의 입찰정보(발전단가, 발전 가능량)를 바탕으로 비용모델 알고리즘을 통해 비용을 최소화하는 관점에서 분산 에너지원을 지능적으로 그룹핑하여 해당 전력 공급 요구량을 충

족시키는 형태로 제어하게 된다.

예를 들어, 소단위 가상발전소 하위의 특정 분산 에너지원이 제출한 입찰에서 해당 분산 에너지원의 발전 단가를 고려한 발전 가능량이 소단위 가상발전소로부터 할당받은 공급량 보다 클 경우 해당 분산 에너지원이 발전 가능량 증가를 소단위 가상발전소에게 요구할 수 있으며 이렇게 되면 소단위 가상발전소에서의 전체 수요 공급의 일치를 위해 소단위 가상발전소가 하위의 다른 분산 에너지원에게 발전량 축소를 원하는 조정을 진행할 수 있으며, 이것이 해당 소단위 가상발전소에서 조정이 불가능한 경우 상위 중단위 가상발전소 관점에서 타 소단위 가상발전소로 확대하여 중단위 가상발전소단에서의 전체적인 수요와 공급이 일치하도록 조정한다. 또한 특정 중단위 가상발전소단에서 수요와 공급이 일치하지 않으면 대단위 가상발전소 관점에서 타 중단위 가상발전소들에게 전체적인 수요와 공급을 일치시킬 수 있는 조정을 진행하여 전체 가상 발전소 구조에서 소단위 가상발전소와 분산 에너지원간, 중단위 가상발전소와 소단위 가상발전소간, 대단위 가상발전소와 중단위 가상발전소간의 지능적인 조정을 통해 전력 시장에서 요구한 전력 공급 요구량에 일치하는 전력 공급을 하게 된다. 결과적으로 이러한 전력시장 연계를 통해 가상발전 사업자가 획득한 이윤은 각 중단위 가상발전소와 소단위 가상발전소 및 분산 에너지원별로 응동한 발전시간과 발전량을 바탕으로 여기에 비례하여 분배된다.

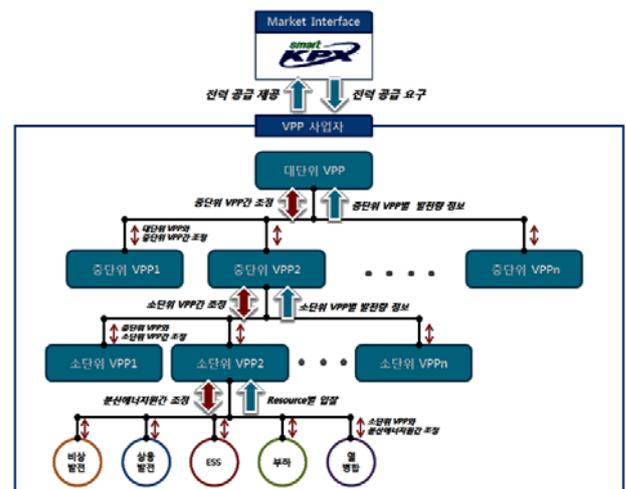


그림 1. 대단위 가상발전소 구성  
Fig. 1. Configuration of large-scale VPP.

## 2. 가변 및 민감성 부하를 고려한 분산 에너지 자원 최적 운영 방법

위에서는 대단위 가상발전소의 운영 방법에 대해서 알아보았다. 앞서 언급한 것과 같이 대단위 가상발전소의 계층구조에서 최하위에 속한 소단위 가상발전소의 경우는 분산 에너지 자원과 직접 연결되어 이들 자원들을 실시간으로 모니터링하고 제어하는 기능을 수행한다. 또한 전력시장에서 가상발전 사업자에게 전력 공급량을 요구하는 과정에서 대단위, 중단위 가상발전소 뿐만 아니라 소단위 가상발전소와 분산 에너지 자원간의 입찰 절차와 조정 기능을 통해 개별 분산 에너지 자원의 최종 발전량이 결정되게 된다.

따라서 수요자원 시장에서 전력시장으로부터 특정 용량만큼의 수요반응(DR) 요구를 가상발전 사업자가 수신한 후 대단위, 중단위, 소단위 가상발전소와 분산 에너지 자원 간에 앞서 언급한 입찰 절차와 조정 기능을 통해 개별 분산 에너지 자원의 최종 발전량과 부하 대응 용량이 가변적으로 응동하는 경우를 고려하되, 특정 부하가 off하기 어려운 민감성 부하의 경우를 함께 고려하여 이러한 가상발전소 운영 방법에 적합한 최적 자원 스케줄링 방법을 제안한다.

일반적으로 발전기를 포함한 분산전원의 운영은 운영상에 정의된 주기  $T$ 동안에 가상발전기 내 모든 발전원의 출력 전력 레벨뿐만 아니라 가동(start up)과 정지 시간(shut down time)에 대한 결정을 포함하고 있다. 또한 이러한 운영은 가상발전기 전체 시스템과 개별 분산전원의 제약조건(constraints)들을 만족하면서 전체 시작 비용, 가동 비용 및 운영 비용을 최소화할 수 있도록 하는 최적 제어가 되어야 한다.

### (1) 발전기 비용 함수

발전기의 연료비용 함수는 발전기의 유효전력(real power)의 함수로 2차의 다항식(quadratic polynomial)로 표현될 수 있으며 가상발전기 운영관리 플랫폼 내의 분산 전원 중 모든 발전기에 대한 총 연료비용 함수(total fuel cost function)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FC_j(P_j) = \sum_{j=1}^N \alpha_j P_j^2 + \beta_j P_j + \gamma_j \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 발전기의 수를 나타내며,  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  와  $\gamma_j$  는 발전기마다의 특성에 해당하는 발전기의 계수

(coefficient)이고  $P_j = 1, 2, \dots, N$ 은  $j$ 번째 발전기의 출력 전력(kW)을 나타낸다.

운영정지 되어 있는 발전기를 시작 비용이 비용 측면의 목적 함수에 포함될 수 있는데 이러한 발전기의 시작 비용은 발전기가 가동되기 이전에 발전기가 off되어 있었던 시간에 따라 달라진다. 일반적으로 발전기의 정지 지속 시간이 발전기의 저온 가동 시간( $T_{cld,j}$ )와 최소 정지 지속 시간을 넘게 되면 이때에는 발전기를 가동하기 위해 고비용이 드는 저온 가동 비용으로, 반대의 경우에는 발전기를 가동하기 위해 저비용이 드는 고온 가동 비용으로 정의할 수 있다.

임의의 시간 구간에서의 발전기의 가동 비용 함수는 지수함수에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SC_{j,t} = \sigma_j + \delta_j \left[ 1 - \exp\left(\frac{-T_{OFF,j,t}}{\tau_j}\right) \right] \quad (2)$$

$\sigma_j$ 는 시간  $t$ 에서의 분산전원  $j$ 의 고온 가동(hot startup) 비용이고,  $\delta_j$ 는 시간  $t$ 에서의 분산전원  $j$ 의 저온 가동(cold startup) 비용이고,  $\tau_j$ 는 분산전원  $j$ 의 쿨링 시간 상수이다.  $-T_{OFF,j,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 분산전원  $j$ 가 off 상태로 지속된 시간을 의미한다.

이와 유사한  $T_{ON,j,t}$ 는 시간  $t$ 에서 분산전원  $j$ 가 on 상태로 지속된 시간으로, 최소 운전 시간(Minimum Up Time), 최소 정지 시간(Minimum Down Time)에 대한 제약조건에 사용된다.

$$\begin{cases} [T_{ON,j,t} - MUT_j] [u_{j,t-1} - u_{j,t}] \geq 0 \\ [T_{OFF,j,t} - MDT_j] [u_{j,t} - u_{j,t-1}] \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$u_{j,t}$ 는 시간  $t$ 에서 발전기의 동작 상태로 on=1, off=0을 나타낸다.

발전원의 경우 일반적인 유지관리 비용 함수를 비례 상수  $K_{OM}$ 을 가지고 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$OM_{j,t} = K_{OM} P_{j,t} \quad (4)$$

$K_{OM}$ (Diesel engine)=0.01258 \$/KWh

$K_{OM}$ (Fuel Cell)=0.00419 \$/KWh

$K_{OM}$ (Micro Turbine)=0.00587 \$/KWh

### (2) 에너지 저장장치 비용함수

에너지 저장장치(ESS)의 경우에는 일반적으로 그리

드 에너지 가격이 싼 시간에 그리드로부터 충전을 하고 그리드 에너지 가격이 비싼 경우에는 방전을 하여 부하에 대한 공급을 지원하기 때문에 위의 일반적인 발전기와 마찬가지로 수용가 수익 측면을 고려한 총비용 함수는 충전에 소요된 비용 함수에서 방전으로 그리드 수전이 대체된 비용을 차감해주어야 하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p_{grid,c,t}P_{j,ESS,t} - p_{grid,d,t}P_{j,ESS,t} \quad (5)$$

여기서  $p_{grid,c,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 충전 시 그리드 전기 가격,  $p_{grid,d,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 방전 시 그리드 전기 가격이다.  $P_{j,ESS,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 에너지 저장장치  $j$ 에 연결되어 있는 부하이다.

에너지 저장장치의 충전과 방전을 통한 효율적 운영을 위해서는 에너지 저장장치의 특성에 맞는 충방전율(C-rate) 이하에서 배터리의 충전과 방전에 대한 동작이 이루어져야 하며 이러한 제약 조건을 표현하면 다음과 같다.

$$|Q_{j,t} - Q_{j,t-1}| \leq C-rate \quad (6)$$

$Q_{j,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 에너지 저장장치  $j$ 에 저장된 에너지이다.

또한 에너지 저장장치의 에너지 한도는 충전 상태(state of charge)로 측정될 수 있으며 개개의 에너지 저장장치는 고유의 충전 상태 제약조건을 가지고 있으며 이러한 제약조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_j^{min} \leq Q_{j,t} \leq Q_j^{max} \quad (7)$$

에너지 저장장치의 충방전 조건에 대한 제약 조건으로는 충전과 방전을 동시에 동작시키지 않는 운영조건을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_{j,ESS,t}^c + u_{j,ESS,t}^d \leq 1 \quad (8)$$

$u_{j,ESS,t}^c$ 는 시간  $t$ 에서의 에너지 저장장치  $j$ 의 충전 상태이고,  $u_{j,ESS,t}^d$ 는 시간  $t$ 에서의 에너지 저장장치  $j$ 의 방전 상태이다.

### (3) 수요반응 비용 함수

전력시장으로부터 특정 용량만큼의 수요반응 요구를 가상발전 사업자가 응동을 하게 된다. 수요반응 자원의

비용은 다음과 같다.

$$p_{grid,DR,t}P_{j,DR,t}u_{j,DR,t} \quad (9)$$

여기서  $P_{j,DR,t}$ 는 시간  $t$ 에서 수요반응 자원  $j$ 의 응동량이고,  $p_{grid,DR,t}$ 는 응동량에 따른 그리드의 보상 가격이고,  $u_{j,DR,t}$ 는 응동 참여 상태이다.

본 논문에서는 무조건적인 응동이 아닌 상황에 따라 참여율로 대응하는 형태를 제안한다. 식(10)과 같은 수요반응 요구량에 대한 제한조건을 구성하여 적용한다.

$$\sum_{j=1}^{N_{DR}} P_{j,DR,t} = pr P_{DR,t}^T \quad (10)$$

여기서  $pr$ 은 수요반응 자원의 참여율이고,  $P_{DR,t}^T$ 는 시간  $t$ 에서의 수요반응 총 요구량이다.

### (4) 운영 목적 함수

분산 발전자원의 비용을 고려한 목적 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \{ \eta_j FC_j(P_{j,t}) u_{j,t} + SC_{j,t} u_{j,t} + OM_j u_{j,t} \} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{ESS}} \{ p_{grid,c,t} P_{j,ESS,t}^c u_{j,ESS,t}^c - p_{grid,d,t} P_{j,ESS,t}^d u_{j,ESS,t}^d \} \\ & - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{DR}} \{ p_{grid,DR,t} P_{j,DR,t} u_{j,DR,t} \} \} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $u_{j,t}$ ,  $u_{j,ESS,t}^c$ ,  $u_{j,ESS,t}^d$ ,  $u_{j,DR,t}$ 는 시간  $t$ 에서의 분산자원  $j$ 의 상태로 on=1, off=0이다

$N$ 은 발전기 수,  $N_{ESS}$ 는 에너지 저장장치 수,  $N_{DR}$ 은 수요반응 자원 수이다.

목적 함수가 최소가 되는 발전량( $P$ )과 운영상태( $u$ )는 다음의 제약조건이 반영되어야 한다.

$$\sum_{j=1}^N P_{j,t} u_{j,t} + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} P_{j,ESS,t} u_{j,ESS,t} = P_{L,t}^T + (1-pr) P_{DR,t}^T \quad (12)$$

여기서  $P_{L,t}^T$ 는 총 발전 요구량이고, 수요 반응에 대응하지 못한 양을 분산 자원에서 추가로 발전하는 조건이다.

$\eta_j$ 는 민감성 부하가 연결된 경우를 표현한 것으로 발전 비용함수를 강제적으로 적게 만들어서 최적화 알고리즘에서 해당 발전기를 선택하도록 한다.

발전자원 운영에 적용되는 최적화 알고리즘은 선형

프로그래밍 기법과 유전자 알고리즘 기법이 적용되고 있다<sup>[10~13]</sup>. 본 논문에서는 발전량과 운영 상태를 찾아야 하기 때문에 다변수 최적화에 적합한 유전자 알고리즘을 선택하였다.

### III. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 에너지 자원의 최적 운영 방식은 한국에너지기술평가원으로부터 지원받는 사업에서 모집 가능한 발전자원에 대해서 진행하였으며, 그 수는 발전기 10개와 에너지 저장 장치 2개, 수요반응 자원 3개를 대상으로 최적 운영 시뮬레이션을 수행하였다. 각 발전자원의 파라미터는 표 1과 같고, 시간별 발전 요구

량은 표 2와 같다.

유전자 알고리즘은 Matlab Global Optimization Toolbox의 함수를 활용하였고<sup>[14]</sup>, 자원의 운영 상태와 발전량을 탐색하였다. 유전자 알고리즘의 설정은 표 3과 같다. Elite Count는 현재 세대에서 다음 세대로의 재생산(reproduction)에 생존하는 개체수로 적합도가 높

표 3. 유전자 알고리즘 구성  
Table 3. Configuration of genetic algorithm.

Population Size	100
Generation	1000
Elite Count	10
Crossover Probability	0.8
Mutation Probability	0.01

표 1. 발전자원 파라미터  
Table 1. Generator resource parameters.

발전 자원											
발전기	발전 조건		연료비용 상수			동작 시간 상수		Start up 비용 상수			초기 상태
	$P_{min}$	$P_{max}$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	MUT	MDT	$\sigma$	$\delta$	$\tau$	
1	250	520	0.0013	1.395	105	10	4	60	207	11	10
2	120	320	0.0029	1.264	49	7	5	50	137	7	7
3	75	200	0.0015	1.214	82	6	6	70	157	9	6
4	75	280	0.0026	1.350	72	6	3	30	146	6	-3
5	50	150	0.0021	1.540	29	1	3	30	130	5	-3
6	50	150	0.0014	1.329	100	3	2	80	202	11	3
7	25	120	0.0038	1.500	32	3	3	12	100	5	3
8	30	100	0.0039	1.350	40	4	4	25	110	5	4
9	20	80	0.0040	1.500	25	3	4	15	123	5	3
10	15	60	0.0051	1.400	15	3	2	15	123	5	3
ESS 자원					DR 자원						
ESS	Min	Max	C-rate	초기값	DR	Min		Max			
1	80	806	0.2	725	1	0		100			
2	22	224	0.2	202	2	0		150			
					3	0		100			

표 2. 24 시간 요구량 데이터  
Table 2. Demand data with 24 hours.

시간	발전 요구량 [kWh]	ESS	DR 요구량 [kWh]	시간	발전 요구량 [kWh]	ESS	DR 요구량 [kWh]	시간	발전 요구량 [kWh]	ESS	DR 요구량 [kWh]
1	1517	충전	0	9	1317	방전	0	17	1113	방전	0
2	1426	충전	0	10	1293	방전	0	18	1079	방전	0
3	1368	충전	0	11	1238	방전	0	19	1034	방전	0
4	1328	충전	0	12	1226	방전	0	20	1022	방전	0
5	1317	충전	0	13	1203	방전	0	21	1010	방전	0
6	1351	충전	0	14	1180	방전	200	22	1058	방전	0
7	1398	방전	0	15	1170	방전	250	23	1124	방전	0
8	1351	방전	0	16	1136	방전	150	24	1517	충전	0

은 순서로 남겨진다.

시물레이션에서 발전기 3번을 민감성 부하가 연결된 것으로 가정하여 off하지 않고 최대 출력을 내도록 제한 조건을 설정하였으며, 수요반응 참여율은 0.7로 하였고, 그리드의 가격은 \$1/kWh로 고정하였다.

표 4는 민감성 부하 연결과 수요반응 참여율을 고려하지 않은 결과로 제약조건에 맞게 유전자 알고리즘 수행 후 얻은 발전량과 운영상태 결과이고, 표 5는 민감성 부하가 연결된 결과이다. 표 6은 수요반응 참여율이 적용된 결과를 나타낸다.

그림 2는 표 6에 대한 발전기의 출력(Output)을 나타낸 것으로 에너지 저장 장치가 방전하는 7시-9시에는 발전기의 발전량이 줄어들고, 14시-16시에는 수요반응 참여 시에 부족한 수요반응 응답량을 추가로 발전함을 확인할 수 있다.

그림 3은 발전비용 그래프로 수요반응 참여율(PR)에 따른 응용량 부족분을 추가 발전하는 경우는 14시-16시의 발전 비용이 추가로 발생한다.

표 4. 최적 운영 결과(민감성부하, 수요반응 참여율 미적용)

Table 4. Results of optimal operation without sensitive loads and DR partition rates.

		시간																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
발전기	1	444	455	479	443	463	505	422	335	433	442	499	319	418	480	480	479	384	442	499	479	508	457	395	417
	2	316	285	174	286	222	302	219	231	291	250	252	304	229	242	0	0	0	0	0	265	244	209	184	251
	3	177	147	189	183	168	195	194	0	0	0	0	0	0	123	156	159	97	160	191	152	162	183	157	168
	4	229	172	226	154	265	273	186	235	150	256	245	254	264	167	223	154	242	237	253	0	0	0	141	230
	5	106	86	86	0	0	0	66	89	0	0	0	78	101	0	0	0	102	0	0	0	0	0	95	139
	6	121	121	123	118	85	0	0	122	87	117	118	117	0	0	125	140	142	119	67	97	0	0	0	57
	7	39	99	66	91	40	0	0	0	0	98	79	58	88	90	88	97	96	90	0	0	0	76	68	111
	8	85	61	0	0	0	0	50	62	72	89	45	96	84	36	73	0	0	0	0	0	54	94	84	81
	9	0	0	0	0	29	76	55	35	46	0	0	0	0	0	0	54	50	31	24	0	0	0	0	63
	10	0	0	25	53	45	0	0	36	32	41	0	0	19	42	25	53	0	0	0	29	42	39	0	0
ESS	1	0	0	0	0	0	0	161.2	161.2	161.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	44.8	44.8	44.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	66	35	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	103	115	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 5. 최적 운영 결과(민감성부하 적용, 수요반응 참여율 미적용)

Table 5. Results of optimal operation with sensitive load and without DR partition rates.

		시간																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
발전기	1	505	419	399	421	460	476	501	432	472	445	448	508	363	357	367	469	420	503	452	436	469	409	366	442
	2	215	315	192	305	0	0	0	0	0	225	209	230	265	208	214	254	221	0	0	0	0	0	285	280
	3	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	4	149	155	230	129	184	247	195	182	142	269	246	200	188	0	0	0	117	181	270	139	246	242	117	272
	5	139	109	103	79	147	132	52	105	0	0	0	88	134	104	58	0	0	0	79	148	0	0	0	126
	6	147	114	118	109	124	102	0	0	112	90	135	0	0	148	124	77	107	142	0	0	0	0	0	65
	7	108	77	80	49	103	66	111	72	92	64	0	0	0	34	39	72	0	0	0	69	43	57	0	0
	8	0	0	0	0	43	64	63	84	49	0	0	0	0	48	68	64	48	0	0	0	0	97	82	87
	9	0	0	0	0	56	64	35	43	0	0	0	0	33	29	68	0	0	0	0	0	52	53	74	0
	10	54	37	46	36	0	0	35	27	44	0	0	0	20	52	32	0	0	53	33	30	0	0	0	45
ESS	1	0	0	0	0	0	0	161.2	161.2	161.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	44.8	44.8	44.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	96	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	73	132	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	81	18	0	0	0	0	0	0	0	0

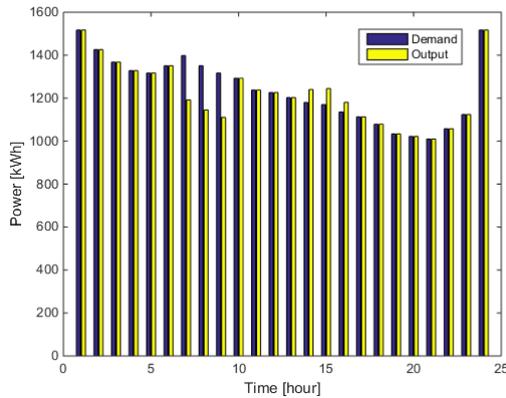


그림 2. 발전기의 총 출력  
Fig. 2. Total output of Generators.

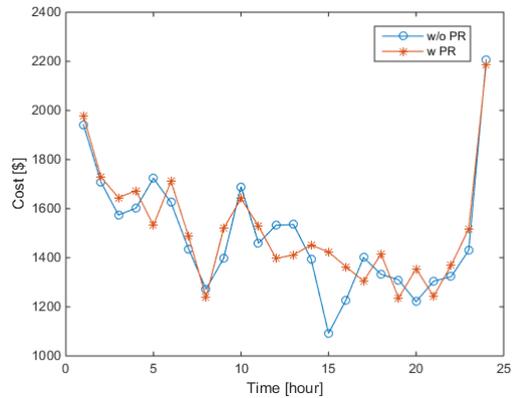


그림 3. 발전 비용  
Fig. 3. Generation cost.

표 6. 최적 운영 결과(민감성부하, 수요반응 참여율 적용)  
Table 6. Results of optimal operation with sensitive load and DR partition rates.

		시간																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
발전기	1	460	514	441	471	504	435	379	451	455	488	414	325	393	398	499	436	419	455	0	0	0	0	448	485
	2	316	283	243	211	129	257	223	214	220	239	187	150	183	302	312	272	191	122	300	314	240	295	162	287
	3	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	4	168	152	238	258	234	237	216	0	0	0	186	121	170	228	103	171	0	0	0	202	261	280	199	243
	5	81	74	113	119	91	83	94	125	0	0	0	137	58	0	0	0	95	74	129	0	0	0	0	148
	6	71	120	0	0	0	0	0	88	99	134	140	123	71	0	0	0	145	73	148	86	148	95	91	97
	7	96	83	86	36	112	34	0	0	0	96	72	103	89	0	0	0	0	77	108	75	63	96	0	0
	8	95	0	0	0	0	67	61	50	90	87	0	0	0	0	87	75	43	78	79	92	0	0	0	0
	9	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	39	57	0	0	0	0	70	32	68	56	0	0
	10	0	0	47	33	47	38	19	17	47	49	39	0	0	55	44	27	20	0	0	21	30	36	24	57
ESS	1	0	0	0	0	0	0	161.2	161.2	161.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	44.8	44.8	44.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
DR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	49	72	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	102	33	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	24	0	0	0	0	0	0	0	0	

### IV. 결 론

본 논문에서는 많은 수의 다양한 분산 에너지 자원이 지리적으로 매우 광범위하게 분포하고 있을 경우 이러한 분산 에너지 자원을 효율적으로 제어할 수 있는 계층적 구조의 대단위 가상발전소를 구성하고 운영하는 방법을 제안하였다. 개별 분산 에너지 자원의 최종 발전량과 부하 대응 용량이 가변적으로 변동하는 경우를 고려하되, 특정 부하가 off하기 어려운 민감성 부하의 경우를 함께 고려하여 이러한 가상발전소 운영 방법에 적합한 최적 자원 스케줄링 방법을 유전자 알고리즘을 이용하여 발전량과 운영 스케줄을 탐색하였

다. 목적함수는 발전비용으로 구성하여 최소가 되는 방향으로 자원별 운영 스케줄을 탐색하였고, 민감성 부하는 발전비용이 적게 설정하여 항상 선택이 되도록 하였다. 수요반응 참여율을 설정하여 수요 반응에 대응하지 못한 양을 분산 자원에서 추가로 발전하는 방식으로 진행하였다.

향후 통합 에너지 관리 시스템에 운영 알고리즘이 적용된 가상발전기 운영관리 플랫폼을 구축하고 실제 발전 자원의 통합 관리를 수행하고, 그리드의 가격을 실시간으로 연동하는 가변적 가격 정책(dynamic pricing) 방법을 적용하여 보다 안정적인 가상발전소 운영 모델을 수립하고자 한다.

## REFERENCES

- [1] H. Saboori, M. Mohammadi and R. Taghe, "Virtual Power Plant(VPP), Definition, Concept, Components and Types," 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, March 2011.
- [2] P. Lombardi, M. Powalko and K. Rudion, "Optimal Operation of a Virtual Power Plant," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, July 2009.
- [3] K. Dielmann and A. van der Velden, "Virtual Power Plants(VPPs)-A New Perspective for Energy Generation?" Modern Techniques and Technologies(MTT) 2003. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Scientific and Practical Conferences of Students, Post-graduates and Young Scientists, pp. 18-20, April 2003.
- [4] C. Schulz, G. Roder and M. Kurrat, "Virtual power plants with combined heat and power micro-units," 2005 International Conference on Future Power Systems, p.5, Nov. 2005.
- [5] K. Koen, C. Warmer, R. Kamphuis, P. Mellstrand and R. Gustavsson, "Distributed Control in the Electricity Infrastructure," 2005 International Conference on Future Power Systems, p.7, Nov. 2005.
- [6] <http://www.encorp.com/content.asp?cmsID=41>
- [7] <http://www.environmental-expert.com/>
- [8] AREVA, "Energy Management System Application for Large Windfarm Projects", presented in Glasgow conference, 2006
- [9] K. El Bakari and W. L. Kling, "Development and operation of virtual power plant system," 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), pp. 1 - 5, Dec. 2011.
- [10] Miguel Carrión and José M. Arroyo, "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 3, pp. 1371 - 1378, August 2006.
- [11] K. S. Swarup and S. Yamashiro, "Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 17, NO. 1, pp. 87-91, February 2002.
- [12] Adanan Al Anbukey, Salem Al Aqtash and Sameer Bataineh, "Implementation of Neural Network to Unit Commitment," International Conference On Neural Information Processing, pp. 815-825, January 1994.
- [13] Won-Sim Park and Kab-Ju Hwang, "A Study on the Hydro-thermal Unit Commitment for Practical Power Systems," Proceeding of IEEK Conference, pp. 648-651, July 1987.
- [14] [www.mathworks.com/products/global-optimization](http://www.mathworks.com/products/global-optimization)

---

 저 자 소 개
 

---



박 용 국(정회원)

1994년 중앙대학교 전자공학과  
학사 졸업.1996년 중앙대학교 전자공학과  
석사 졸업.2012년 중앙대학교 전자공학과  
박사 졸업.2001년~현재 전자부품연구원 책임연구원 재직  
<주관심분야 : VPP, Green IT, RF 통신, 임베디드 시스템>

이 민 구(정회원)

2000년 서강대학교 전자공학과  
학사 졸업.2004년 서강대학교 전자공학과  
석사 졸업.2001년~현재 전자부품연구원  
책임연구원 재직

&lt;주관심분야 : VPP, Green IT, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템&gt;



정 경 권(정회원)

1998년 동국대학교 전자공학과  
학사 졸업.2000년 동국대학교 전자공학과  
석사 졸업.2003년 동국대학교 전자공학과  
박사 졸업.2009년~현재 전자부품연구원 연구원 재직  
<주관심분야 : VPP, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템>

이 용 구(정회원)

1987년 2월 동국대학교  
전기공학과 학사 졸업.1993년 2월 동국대학교  
전기공학과 석사 졸업.1997년 2월 동국대학교  
전자공학과 박사 졸업.1998년 3월~2005년 2월 한림성심대학교  
전자정보통신과 전임강사, 조교수, 부교수  
2005년 3월~2010년 2월 한림성심대학교  
의용정보과, 방사선과 부교수  
2010년 3월~현재 한림성심대학교  
방사선과 교수

&lt;주관심분야 : 퍼지논리시스템, 신경회로망, 패턴인식, 의학영상&gt;