

저탄소 패러다임에 따른 구역전기사업자의 분산전원 최적 운영에 관한 연구

논 문
58-8-7

The Optimal Operation of Distributed Generation Possessed by Community Energy System Considering Low-Carbon Paradigm

김 성 열* · 심 현* · 배 인 수** · 김 진 오†
(Sung-Yul, Kim · Hun-Shim · In-Su, Bae · Jin-O, Kim)

Abstract - By development of renewable energies and high-efficient facilities and deregulated electricity market, the operation cost of distributed generation(DG) becomes more competitive. The amount of distributed resource is considerably increasing in the distribution network consequently. Also, international environmental regulations of the leaking carbon become effective to keep pace with the global efforts for low-carbon paradigm. It contributes to spread out the business of DG. Therefore, the operator of DG is able to supply electric power to customers who are connected directly to DG as well as loads that are connected to entire network. In this situation, community energy system(CES) having DGs is recently a new participant in the energy market. DG's purchase price from the market is different from the DG's sales price to the market due to the transmission service charges and etc. Therefore, CES who owns DGs has to control the produced electric power per hourly period in order to maximize the profit. If there is no regulation for carbon emission(CE), the generators which get higher production than generation cost will hold a prominent position in a competitive price. However, considering the international environment regulation, CE newly will be an important element to decide the marginal cost of generators as well as the classified fuel unit cost and unit's efficiency. This paper will introduce the optimal operation of CES's DG connected to the distribution network considering CE. The purpose of optimization is to maximize the profit of CES and Particle Swarm Optimization (PSO) will be used to solve this problem. The optimal operation of DG represented in this paper is to be resource to CES and system operator for determining the decision making criteria.

Key Words : Carbon Emission, Community Energy System, Optimal Operation

1. 서 론

분산전원은 일반적으로 배전계통에 연결된 소규모 발전기를 뜻하며 태양광발전, 풍력발전, 연료전지, 마이크로터빈, 수소에너지발전 등이 있다. 분산전원은 순동예비력을 제공하고, 송전비용 및 배전비용을 감소하는데도 일조한다[1]. 실제 전력 소비자에게 있어서, 분산전원은 전력공급의 안정 및 품질 개선을 가져다 준다[2,3]. 사회적 측면에서, 신재생 에너지는 기존의 대단위 발전소로 인한 배기가스 등의 유해 물질을 줄이는데도 효과가 있다. 분산전원은 전력품질의 개선 및 전력수급 안정과 배전계통의 최적화에도 주요한 대안이다. 규제완화로 인해 전력의 생산, 송배전이 분할되고, 경쟁체제로 인해 전력가격이 하락할 것이라 기대하지만 전력가격은 새로운 경쟁체제에서 유동적일 것이다. 송전 비용 및 전력가격의 변동을 줄이기 위해서는 분산전원의 설치가 좋은 대안이 된다.

최근 새로운 대체에너지의 개발과 분산전원 효율향상에 관한 지속적인 연구수행을 통해 분산전원의 가격경쟁력이 높아지면서 배전계통 내에 분산전원 보급이 더욱 확대되고 있는 추세이다. 또한 저탄소 패러다임이라는 국제적 조류에 따라 탄소배출량이 상대적으로 적은 친환경 분산전원 보급에 전 세계가 주목하고 있다.

이러한 시점에서, 배전계통 내에 분산전원을 소유한 구역 전기사업자가 새롭게 등장하였다. 구역전기사업자는 자신이 관할하는 지역 내의 수용가에게 전력과 열을 동시에 공급하는 전력 시장의 새로운 참여 형태이다. 국제적 환경규제로 인해 신재생 에너지를 비롯한 고효율 발전기의 보급이 불가피한 상황에서 분산전원의 보급은 더욱 가속화될 것이다. 따라서, 구역전기사업자도 점차 보편화될 것이다. 그러나 배전계통에서 분산전원을 운영하는 구역전기사업자의 최적 발전 운영에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 구역전기사업자의 최적 발전 운영에 관한 연구가 절실히 필요한 시점이다. 더 나아가, 변동하는 시장가격과 저탄소 패러다임에 적합한 운영방안의 제시는 중요한 의미를 갖는다. 이에 본 논문은 유·무효전력의 시장변동가격을 반영하고, 더 나아가 탄소배출량을 고려한 구역전기사업자의 최적 발전 운영계획을 제시한다. 신재생 에너지인 태양광 발전을 비롯하여, 가스터빈, 열병합 발전기 및 보일러를 사례연구에 적용하였다. 최적 발전량의 산출에는 최근 다양한 분야에 적용되어 그 우

† 교신저자, 정희원 : 한양대 공대 전기공학과 정교수 · 공박
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

* 정희원 : 한양대 공대 전기공학과 박사과정

** 정희원 : 강원대 전기제어공학부 전임강사 · 공박

접수일자 : 2009년 1월 20일

최종완료 : 2009년 3월 17일

수성이 입증된 PSO 알고리즘을 이용하여 논문의 신뢰성을 높였다.

2. 구역전기사업자의 특징

구역전기사업이란 병원과 백화점, 아파트단지, 대형빌딩 등 특정한 공급구역의 수요에 따라 신재생 에너지 및 고효율 기기를 이용하여 전기를 생산해 전력 시장을 통하지 않고 공급구역 내에 유효전력, 무효전력을 비롯한 열을 공급하는 것을 말한다. 이는 가상발전소(Virtual Power Plant: VPP), Microgrid와 같은 분산전원의 발전된 형태로 볼 수 있다. 구역전기사업의 확산은 발전소 입지난을 해소하고 송전손실을 절감하며 안정적 전력수급에 기여하고 있다. 구역전기사업자는 부족한 전력이나 남는 전력을 전기판매사업자와 거래할 수 있다.

2.1 구역전기사업자의 구조

구역전기사업자는 국가마다 그 기준이 상이하지만 일반적으로 해당지역 전력수요 50%이상의 전력공급 설비를 구비해야 전력시장에 참여할 수 있다. 과부족전력은 외부 계통을 통해 거래가 가능하다. 따라서 구역전기사업자는 발전사업자와 전력구매자로서 전력시장에 참여 가능하다. 이는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

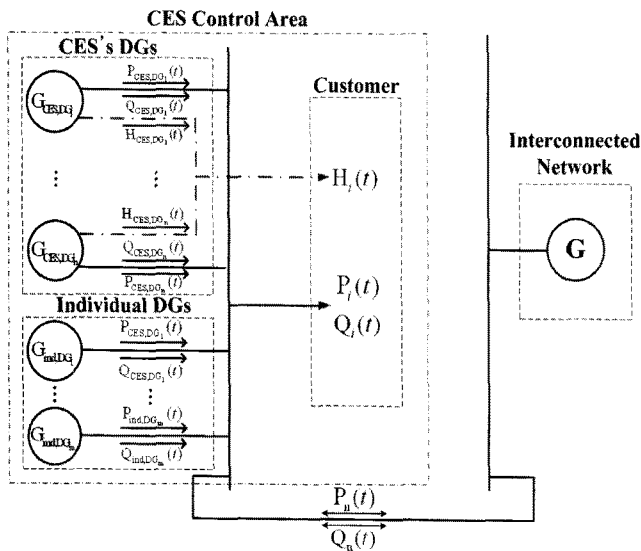


그림 1 구역전기사업자의 구조
Fig. 1 Configuration of Community Energy System

여기서 $G_{CES,DG}$ 는 구역전기사업자 소유로 운영되는 분산전원을 의미한다. $P_{CES,DG}(t)$, $Q_{CES,DG}(t)$, $H_{CES,DG}(t)$ 는 각각 t시간에 관할 구역 내 수용가에게 공급되는 유효전력, 무효전력 및 열에너지를 의미한다. $G_{ind,DG}$ 는 구역전기사업자가 관할하는 구역 내에 개인이 소유한 분산전원을 의미하며, $P_{ind,DG}(t)$, $Q_{ind,DG}(t)$ 는 각각 t시간에 개인 소유 분산전원에

의해 구역전기사업자 관할 구역에 공급되는 유효전력, 무효전력을 의미한다. $P_i(t)$ 는 수용가의 유효전력에 대한 부하량을, $Q_i(t)$ 는 무효전력에 대한 부하량을 나타낸다. $H_i(t)$ 는 관할 구역 내 열부하 수요에 따라 구역전기사업자가 보일러나 열병합 발전기 등을 이용해 공급해야 할 의무가 있는 열부하량을 나타낸다. $P_n(t)$ 와 $Q_n(t)$ 는 구역전기사업자의 관할 배전계통에 상호 연계된 계통으로부터 유입되는 유효·무효전력량을 나타낸다.

2.2 구역전기사업자 소유의 분산전원별 발전비용

분산전원에는 소수력, 태양광, 태양열, 풍력, 마이크로터빈, 열병합 발전 등 다양한 형태가 있다. 본 논문에서는 태양광 발전, 가스터빈, 보일러, 열병합 발전, SVC를 통해 구역전기사업자가 수용가에게 유효전력, 무효전력 및 열부하를 공급할 때 최대 운영 이익을 위한 발전기별 최적 발전량에 관해서 논의한다.

2.2.1 태양광 발전

태양전지 주위의 일사량과 에너지 변환효율에 의해 태양광 발전기의 생산전력량 및 발전비용은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{PV}(t) = \eta_p(t) \cdot A_p \cdot K_p \cdot G(t) \quad (1)$$

$$C_{PV}(P_{PV}(t)) = 0 \quad (2)$$

- η_p : 에너지 변환 효율
- A_p : 태양전지 면적 [m^2]
- K_p : 보정계수
- G : 일사량

여기서, $P_{PV}(t)$ 는 시간 t에서 태양광에 의해 생산된 전력 생산량을 의미한다. $C_{PV}(P_{PV}(t))$ 는 태양광 발전에 따른 발전비용을 나타낸다. 그러나, 태양광 발전의 경우 태양광 자체를 에너지원으로 사용함으로써 발전비용을 거의 무시할 수 있다.

2.2.2 가스터빈

연료형 발전기에 해당하는 가스터빈은 1시간동안 일정한 전력을 생산한다고 가정하면, 시간당 발전비용함수는 전력에 대한 2차함수의 형태를 가진다.

$$C_{GT}(t) = \alpha_g + \beta_g \cdot P(t) + \gamma_g \cdot P(t)^2 \quad (3)$$

$\alpha_g, \beta_g, \gamma_g$: 가스터빈의 발전비용함수 계수

2.2.3 보일러

보일러는 전력 대신 열에너지를 생산하며 그 외 특징은 가스터빈과 유사하다.

$$C_{Boiler}(t) = \alpha_b + \beta_b \cdot H(t) + \gamma_b \cdot H(t)^2 \quad (4)$$

$\alpha_b, \beta_b, \gamma_b$: 보일러의 발전비용함수 계수

2.2.4 열병합 발전기

열병합발전의 경우 열에너지와 전력을 동시에 생산하며, 본 논문에서는 발전비용함수를 열에너지와 전력 생산량의비로 나타내었다.

$$C_{CHP}(t) = \alpha_{c,p} + \beta_{c,p} \cdot P(t) + \gamma_{c,p} \cdot P(t)^2 \quad (5)$$

$$= \alpha_{c,h} + \beta_{c,h} \cdot H(t) + \gamma_{c,h} \cdot H(t)^2$$

$$P(t) = \kappa \cdot H(t) \quad (6)$$

$\alpha_{c,p}, \beta_{c,p}, \gamma_{c,p}$: CHP의 유효전력생산 기준 발전비용함수 계수

$\alpha_{c,h}, \beta_{c,h}, \gamma_{c,h}$: CHP의 열생산 기준 발전비용함수 계수

κ : 열병합 발전기의 유효전력과 열의 비율

3. 탄소배출량에 따른 환경 제약조건

지구 온난화에 따른 범지구적 해결 노력에 대한 인식을 바탕으로, 1992년에 UN이 주체가 되어 브라질 리우데자네이루에서 환경회의가 열렸다. 이 회의에서 채택된 '기후변화에 관한 UN협약(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)'을 시작으로, 1997년 12월 교토의정서 및 최근 발리 로드맵을 통해 공동이행제(Joint Implementation: JI), 청정개발제도(Clean Development: CD), 배출권 거래제도(Emission Trading: ET)를 골자로 한 각국의 온난화 대처에 관한 보다 구체적인 방안이 드러나게 되었다.

교토의정서 발효에 따른 페널티 등으로 인해 1차 의무대상국들은 유럽을 중심으로 배출권 거래제도와 Nord Pool, Climax, Powernext, EEX, ECX, Sendec02와 같은 탄소시장을 확립하였다. 또한, 청정개발제도 및 공동이행제를 상호보완적으로 실시하고 있으며 탄소펀드를 비롯한 각종 배출권 투자가 이미 시행되고 있다.

탄소배출권자는 CO2[ton] 배출량에 대한 배출권 할당량(European Union Allowance: EUA)을 이행해야 한다. 배출권 거래제가 도입된 초기에는 배출권 1단위(EUA)당 30유로까지 치솟았으며, 2006년 1월까지도 26유로를 유지하였다.

미국 ARP의 경우, SO2 배출량을1990년대 수준대비 2005년에는 총 전력 부분 매출액의 35%를 감축하였고, NOx 배출량은1990년 대비 약 3,000,000[ton]을 감축하여 절반수준이 되었다.

3.1. 탄소배출량

발전을 위한 연료로는 석탄, 석유, 천연가스, 원자력, 수력, 태양열 등을 들 수 있는데, 이 중에서 화석연료만이 탄소를 배출한다. 그러나 화석연료별 탄소함유량이 상이하므로 연료별 탄소배출계수를 결정해야 한다.[4] 본 논문에서는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 연료별 탄소배출계수를 참조하였다.

계통을 통해 CES 관할 구역 내 유효전력 및 열부하를 직접 감당할 경우 발생하는 탄소배출량은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\Xi_{CE,n}(t) = \left[\sum_{i \in CES, Load} P_i(t) + \sum_{i \in CES, Load} H_i(t) \right] \cdot \xi_{CE,n} \quad (7)$$

$\Xi_{CE,n}(t)$ 는 t시간에 배출된 탄소량[ton-CO2]을 나타낸다. $\xi_{CE,n}$ 는 전체 계통의 1[MW] 전력 생산에 따른 평균 탄소배출량을 표시한다.

구역전기사업자가 다양한 연료형태의 분산전원을 운영할 경우, 구역전기사업자 입장에서 분산전원 발전에 따른 탄소배출량과 전체 계통 측면에서 구역전기사업자의 관할 구역 내 유효전력 및 열부하를 충족할 경우 발생할 것으로 예상되는 총 탄소배출량은 각각 다음과 같다.

$$\Xi_{CE,CES}(t) = \sum_{i \in CES, DG} P_{CES, DG_i}(t) \cdot \frac{CE_{CES, DG_i}}{\eta_{CES, DG_i}} + \sum_{i \in ind, DG} P_{ind, DG_i}(t) \cdot \frac{CE_{ind, DG_i}}{\eta_{ind, DG_i}} \quad (8)$$

$$\Xi_{CE,CES,n}(t) = \left[\sum_{i \in CES, Load} P_i(t) - \sum_{i \in CES, DG} P_{CES, DG_i}(t) - \sum_{i \in ind, DG} P_{ind, DG_i}(t) + \sum_{i \in CES, Load} H_i(t) - \sum_{i \in CES, DG} H_{CES, DG_i}(t) \right] \cdot \xi_{CE,n} \quad (9)$$

$$+ \left[\sum_{i \in CES, DG} P_{CES, DG_i}(t) \cdot \frac{CE_{CES, DG_i}}{\eta_{CES, DG_i}} + \sum_{i \in ind, DG} P_{ind, DG_i}(t) \cdot \frac{CE_{ind, DG_i}}{\eta_{ind, DG_i}} \right]$$

구역전기사업자는 관할 구역 내 열부하 공급에 필요한 에너지를 대단위로 생산하여 우선적으로 공급하므로, 본 논문에서는 개인이 소유한 분산전원에 의한 열공급은 고려하지 않는 것으로 가정한다. CE_{CES, DG_i} 과 CE_{ind, DG_i} 는 각각 구역전기사업자 소유의 분산전원과 개인 소유의 분산전원에서 사용하는 연료의 탄소배출계수[ton-CO2/MWhf]를 나타내며 η_{CES, DG_i} 과 η_{ind, DG_i} 는 각각 구역전기사업자 소유 분산전원과 개인 소유 분산전원의 발전효율[MWhe/MWhf]을 나타낸다.

3.2. 탄소배출 비용

탄소배출량에 대한 규제가 없다면, 발전 비용에 비해 전력의 생산량이 높은 발전 설비가가격 경쟁력에서 우월할 것이다. 그러나 국제적 환경 규제를 고려했을 경우, 연료별 단가와 설비 효율 뿐 아니라 온실 가스 배출량이 새로이 발전기의 한계비용을 결정하는 주요한 요소가 될 것이다.[5,6] 실제로, CO2 배출량 1[ton]을 기준으로 유럽에서 적용중인 European Union Allowance(EUA)를 고려할 경우, 발전설비별 탄소배출에의한 추가 발전 비용은 다음과 같다.

$$C_{CE}(t) = EUA_p \cdot \Xi_{CE}(t) \quad (10)$$

EUA_p : 탄소배출비용[\$/ton-CO₂]

본 논문에서는 분산전원의 운영 비용에 발전기별 탄소배출가격을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우를 비교한다.

4. 구역전기사업자의 목적함수

본 논문에서 목적함수는 구역전기사업자가 수용가에게 유효전력과 열을 판매해서 얻은 이익, 유·무효전력을 연계 계통을 통해서 거래한 금액, 구역전기사업자 소유 분산전원의 발전비용 및 개인 소유 분산전원으로부터 구입한 유·무효전력 비용, 관할 구역 내 탄소배출에 따른 추가비용을 통해 전체 이익을 최대화하는 것으로 한다. 따라서 탄소배출에 따른 추가비용은 식 (8)의 탄소배출량 추정치를 사용한다. 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(t) = & C_{P,customer} \cdot \sum_{ie \in CES,Load} P_i(t) + C_{H,customer} \cdot \sum_{ie \in CES,Load} H_i(t) \\
 & + C_{P,market}(P(t)) + C_{Q,market}(Q(t)) \\
 & - \sum_{ie \in CES,DG} C_{CES,DG}(P_{CES,DG}(t)) - \sum_{ie \in CES,DG} C_{CES,DG}(H_{CES,DG}(t)) \\
 & - \sum_{ie \in ind,DG} C_{P,ind,DG}(t) \cdot P_{ind,DG}(t) - \sum_{ie \in ind,DG} C_{Q,ind,DG}(t) \cdot Q_{ind,DG}(t) \\
 & - C_{CE}(t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

- $f(t)$: 시간 t 에서 구역전기사업자의 운영 이익
- $P(t)$: 구역전기사업자 관할 구역 내 총 유효전력 발전량과 부하량의 차
- $Q(t)$: 구역전기사업자 관할 구역 내 총 무효전력 발전량과 부하량의 차
- $C_{P,customer}$: 구역전기사업자 관할 구역 내 유효전력 부하에 대한 공급가
- $C_{H,customer}$: 구역전기사업자 관할 구역 내 열부하에 대한 공급가
- $C_{P,market}$: 계통으로부터 유효전력의 잉여·부족에 대한 거래가
- $C_{Q,market}$: 계통으로부터 무효전력의 부족에 대한 거래가
- $C_{CES,DG}$: 구역전기사업자 소유 분산전원 /의 발전비용
- $C_{P,ind,DG}(t)$: 구역전기사업자 관할 구역 내 개인소유 분산전원으로부터의 유효전력 구입가
- $C_{Q,ind,DG}(t)$: 구역전기사업자 관할 구역 내 개인소유 분산전원으로부터의 무효전력 구입가

구역전기사업자는 하루 24시간 별로 유·무효전력 및 열전력에 대해 발전계획을 수립한다. 이 때, 수용가의 열부하에 대한 공급을 최우선으로 하며, 과부족한 유효전력과 무효전력은 개인 분산전원과 외부 연계 계통을 통해서 거래한다. 수용가의 부하패턴이나 전력사용량의 변화 유도 목적으로 수요반응 프로그램(Demand Response:DR)을 이용하여 전력 공급가격을 시간대별로 변화시키거나 실시간으로 변화시키기도 한다.[7] 하지만, 본 논문에서는 저탄소 패러다임에 따른 발전기의 운영 방안에 초점을 맞추므로 수용가에게 전력 및 열 판매가격은 일반적인 전력판매 형태인 고정비로 가정한다. 반면, 구역전기사업자가 개인소유 분산전원으로부터 구입하는 유·무효전력 가격 및 연계 계통을 통한 전력거래가는 시간별로 유동적이라고 가정한다.

구역전기사업자 소유로 운영중인 발전기별 출력 제한과 수용가의 유·무효전력 및 열부하량에 따른 공급량 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases}
 P_{CES,DG,\min}(t) \leq P_{CES,DG_i}(t) \leq P_{CES,DG,\max}(t) \\
 Q_{CES,DG,\min}(t) \leq Q_{CES,DG_i}(t) \leq Q_{CES,DG,\max}(t) \\
 H_{CES,DG,\min}(t) \leq H_{CES,DG_i}(t) \leq H_{CES,DG,\max}(t)
 \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases}
 \sum_{ie \in CES,Load} P_i(t) \leq \sum_{ie \in CES,DG} P_{CES,DG_i}(t) + \sum_{ie \in ind,DG} P_{ind,DG_i}(t) + P(t) \\
 \sum_{ie \in CES,Load} Q_i(t) \leq \sum_{ie \in CES,DG} Q_{CES,DG_i}(t) + \sum_{ie \in ind,DG} Q_{ind,DG_i}(t) + Q(t) \\
 \sum_{ie \in CES,Load} H_i(t) \leq \sum_{ie \in CES,DG} H_{CES,DG_i}(t)
 \end{cases} \tag{13}$$

외부 계통으로부터 전력을 구입하거나, 판매할 때는 계통 안정도를 고려하여 일정 역률을 유지하여야 한다. 이에 따른 제약 조건은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$|\tan \theta| \geq \left| \frac{Q(t)}{P(t)} \right| \tag{14}$$

4. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘은 Kennedy 와 Eberhart에 의해 1995년에 제안된 최적화 기법이다. PSO 알고리즘은 다차원의 공간을 움직이는 개체들의 집합으로 구성된다.[8,9] 각 개체는 시간에 따라 계속 변하는 위치 벡터와 속도 벡터를 가지고 있으며, 개체는 매 반복단계마다 자신의 속도만큼 위치를 변경하여이동하는데, 그 속도 자체도 반복되는단계마다 변하게 된다. 따라서 개체의 속도는 자신의 최적해, 집단의 최적해, 과거의 속도를 이용하여 갱신하며, 개체 속도에 관한 개념과 수식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{i,k}^j = & w_i \times V_{i-1,k}^j + c_1 \times r_1 \times (Xbest_{i-1,k}^j - X_{i-1,k}^j) \\
 & + c_2 \times r_2 \times (Xbest_{i-1,k}^g - X_{i-1,k}^j)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$w_i = w^{\max} - (w^{\max} - w^{\min}) \times \left(\frac{t}{t^{\max}} \right) \tag{16}$$

- k : 최적화 문제의 차원수
- t : 시행 회수
- t^{\max} : 총 시행 회수
- w_i : t 번째 시행에서의 관성계수
- w^{\max} : 최대 관성계수
- w^{\min} : 최소 관성계수
- c_1, c_2 : 가속계수
- r_1, r_2 : [0,1] 사이의 랜덤변수
- $V_{i,k}^j$: t 번째 시행에서 j 개체의 속도벡터 중 k 번째 인자
- $X_{i,k}^j$: t 번째 시행에서 j 개체의 위치벡터 중 k 번째 인자
- $Xbest_{i,k}^j$: t 번까지 시행에서 j 개체의 위치벡터 중 최적 위치벡터의 k 번째 인자
- $Xbest_{i,k}^g$: t 번까지 시행에서 그룹전체의 최적 위치벡터의 k 번째 인자

5. 사례연구 및 분석

사례연구에서 구역전기사업자는 관할 구역 내에 태양광 발전(2), 가스터빈(2), 보일러(1), 열병합 발전(1)을 운영하여 전력 및 열에너지를 생산한다. 또한, 무효전력은 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator:SVC)를 통해 보상

한다. 개인이 운영중인 분산전원을 통해 생산되는 유효전력과 무효전력은 구역전기사업자가 구입한 후 수용가에게 재판매하는 형식을 취한다. 구역전기사업자의 분산자원 운영시 필요한 데이터는 다음과 같이 가정한다.

표 1 구역전기사업자 소유 분산전원의 변수

Table 1 Parameters of DGs

	α	β	γ	$CE_{CES,DG}$	$\eta_{CES,DG}$	Active/Thermal Rate	Limit [MW]	
							Min	Max
GT1	21	1.258	2.978	0.05508	0.38	1/0	2.0	25.8
GT2	23	2.271	5.264	0.05508	0.30	1/0	1.6	15.0
Boiler	19	2.025	2.698	0.09648	0.41	0/1	0	17.2
CHP	31	1.354	2.787	0.07200	0.86	1/0.8	2.3	21.5

표 2 태양광 발전기 변수

Table 2 Parameters of PVs

	A_p	η_p	K_p
PV 1	65	0.12	0.8
PV 2	107	0.12	0.8

표 3 거래 대상별 전력 가격

Table 3 Energy Price

	customer		Individual DG		Market	
	Active [\$/MW]	Thermal [\$/MW]	Active [\$/MW]	Reactive [\$/MVar]	Active [\$/MW]	Reactive [\$/MVar]
Buy	0	0	85	2.8	95	3
Sell	100	85	0	0	90	2.8

수용가에 공급하는 유효전력 및 열에너지는 고정비로 산출하고, 개별사업자 및 연계 계통을 통한 전력 거래는 표 3의 가격을 최대값으로 매시간 유동적이라고 가정한다. 구역전기사업자는 수용가에 열전력 공급을 최우선으로 하며, 유·무효전력의 과부족양은 외부 연계 계통을 통해 거래한다. 수용가의 유효전력, 무효전력과 열부하는 RBTS summer weekday load data를 수정하여 사용하였으며 다음과 같다.

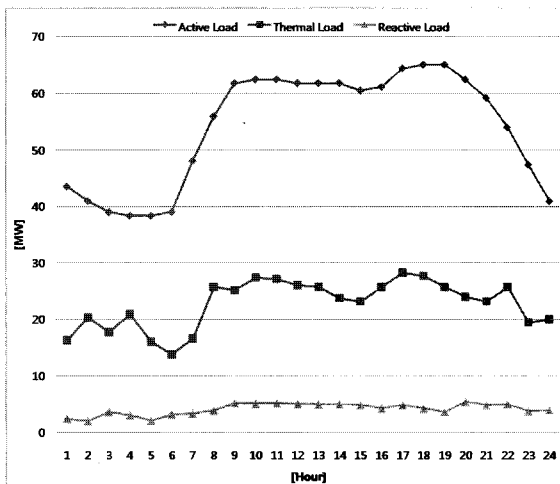


그림 2 시간별 유·무효전력 및 열부하 곡선
Fig. 2 Hourly active, reactive and thermal load in CES's control area

이 때, SVC는 -2[MVar]에서 2[MVar]까지 무효전력을 보상한다. 이 때, 역률은 0.9이상 유지한다.

목적함수의 최적화를 위한 기법으로서, PSO 알고리즘의 총 개체수는 1000으로 설정하였으며, 최대 시행회수는 100회로 하였다. 최대 관성계수, 최소 관성계수, 가속계수 c_1 , c_2 는 각각 0.9, 0.4, 2, 3으로 정한다.

5.1 Case 1: 탄소배출량을 고려하지 않을 경우

탄소배출량을 고려하지 않고, 구역전기사업자가 분산전원의 전력을 수용가에 공급할 경우 시간별 유·무효전력 공급 형태에 따른 전력량 및 역률은 다음과 같다.

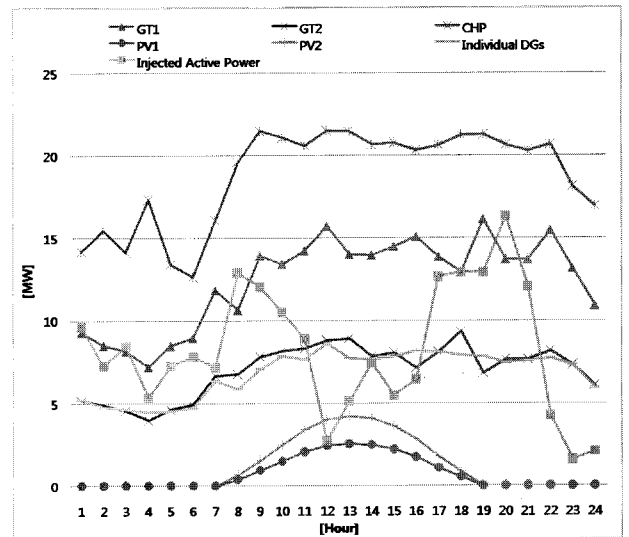


그림 3 시간별 유효전력의 공급 형태에 따른 전력량 곡선
Fig. 3 The amount of hourly active generation

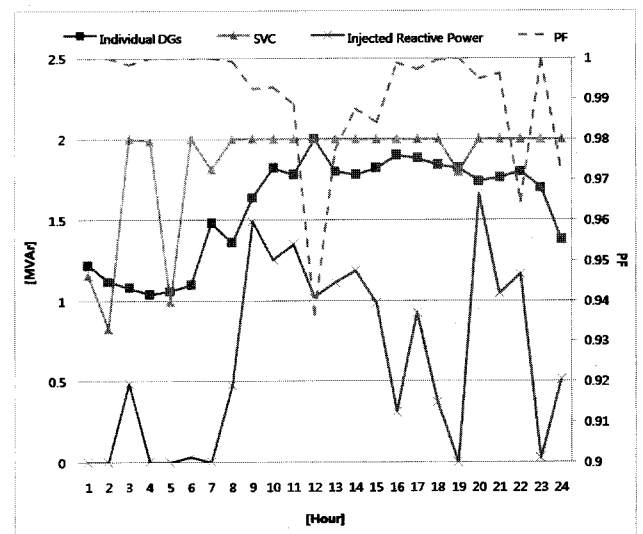


그림 4 시간별 무효전력 공급 형태에 따른 전력량 및 역률 곡선
Fig. 4 The amount of hourly reactive generation and power factor

보일러와 열병합 발전을 통한 시간별 열에너지 생산 곡선은 다음과 같다.

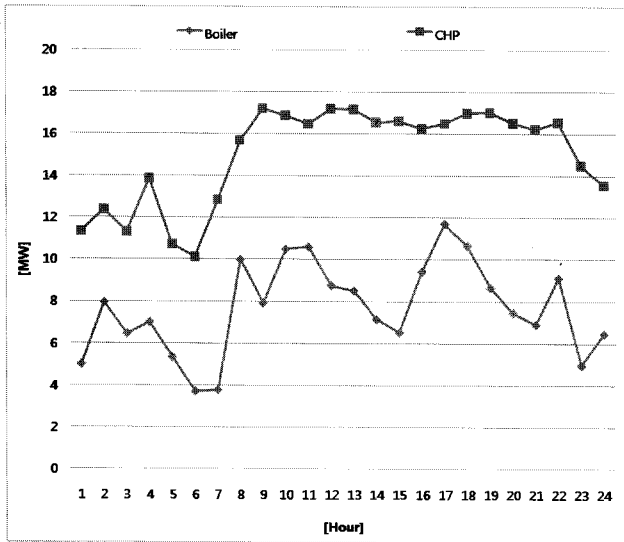


그림 5 시간별 발전기 형태에 따른 열에너지 생산 곡선
Fig. 5 The amount of hourly thermal generation

5.2. Case 2: 탄소배출량을 고려할 경우

발전설비별 전력생산량에 따른 탄소배출량을 고려할 경우, 발전기별 전력생산량 및 운영 비용이 달라지게 된다. 이때, 구역전기사업자의 시간별 유효전력 공급 형태에 따른 전력량은 다음과 같다.

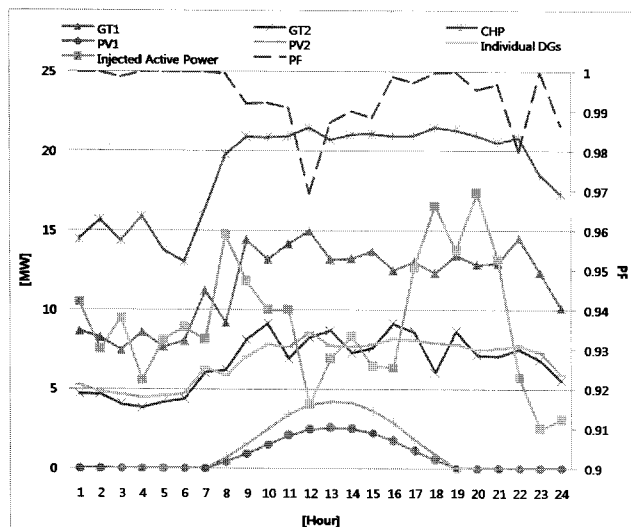


그림 6 시간별 유효전력의 공급형태에 따른 전력량 및 역률 곡선
Fig. 6 The amount of hourly active generation and power factor

EUA_p 를 $31[\$/\text{ton-CO}_2]$ (2008년 8월 기준 산정)로 가정하였을 경우, 탄소를 배출하는 분산전원별 일일 발전비용 및 탄소배출비용은 그림 7과 같이 나타난다.

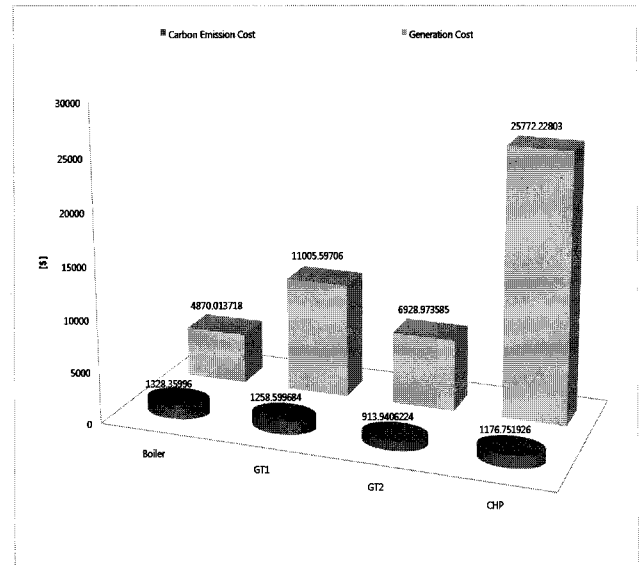


그림 7 분산전원별 발전비용 및 탄소배출비용
Fig. 7 Total generation cost and CE cost by DG types

열병합 발전기는 상대적으로 발전효율이 높기 때문에 다른 발전기에 비해서 탄소배출에 따른 비용이 적은 것을 확인할 수 있다. 구역전기사업자의 시간별 전체 발전비용과 탄소배출비용을 살펴보면 다음과 같다.

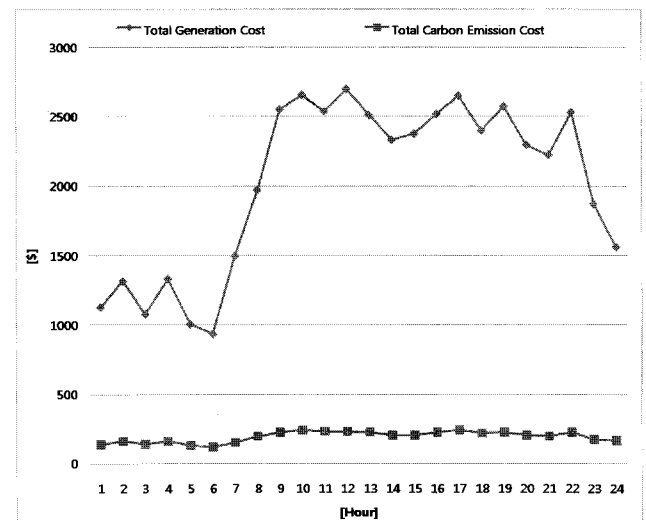


그림 8 시간별 전체 발전비용 및 탄소배출비용
Fig. 8 Total generation cost & total CE cost of CES

탄소배출량을 고려한 Case 2의 경우, Case 1에 비해 시간별 운영 이익이 줄어드는 것을 그림 9을 통해 확인할 수 있다.

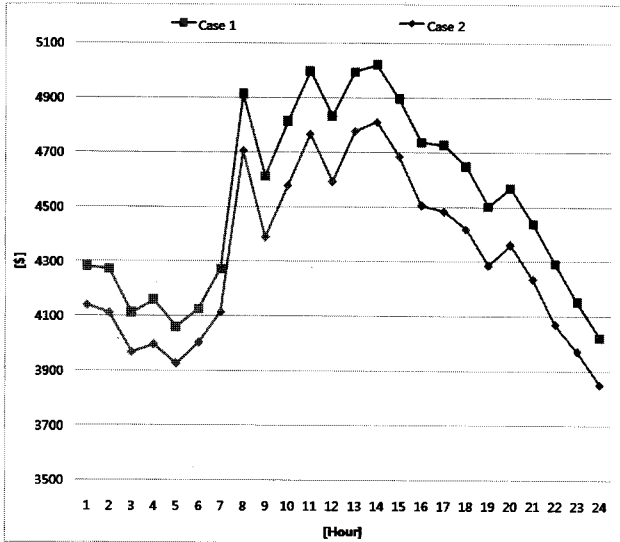


그림 9 사례별 구역전기사업자의 시간별 전체 운영 이익
Fig. 9 Total operation profit of CES case by case

또한 수용가에 전력 및 열을 공급할 때, 구역전기사업자가 공급하는 경우와 구역전기사업자를 통하지 않고 계통에서 직접 공급할 경우 배출되는 탄소량 및 탄소배출에 따른 이익을 살펴보면 다음과 같다.

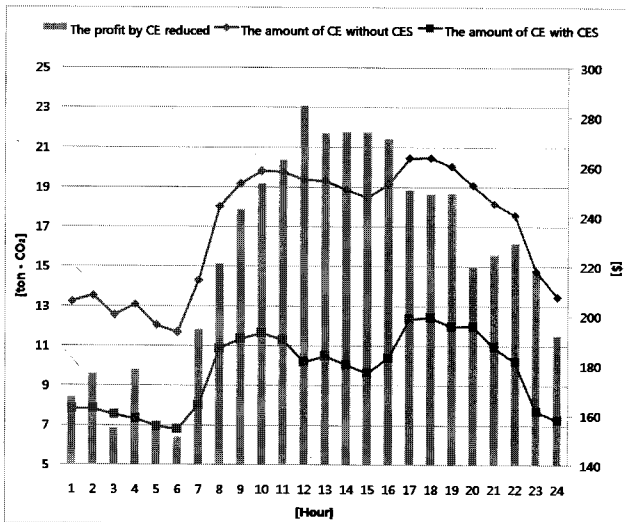


그림 10 전력 공급 주체에 따른 탄소배출량 및 탄소배출량 경감에 따른 이익 곡선
Fig. 10 Hourly profit by CE reduced and the amount of CE without CES and with CES

구역전기사업자를 통해서 관할 수용가 내에 전력 및 열을 공급할 경우, 계통에서 직접 수용가에 공급할 때 보다 탄소배출량이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

각 사례별 보일러와 열병합 발전기의 시간별 열에너지 생산량을 표 4에 나타내었다.

표 4 사례별 보일러와 열병합 발전기의 시간별 열에너지 생산량

Table 4 Hourly Thermal Generation of Boiler and CHP Case by Case

	Case 1		Case 2	
	Boiler	CHP	Boiler	CHP
1	5.0064	11.35	4.7974	11.559
2	7.9342	12.37	7.7592	12.545
3	6.4506	11.315	6.2793	11.487
4	7.0016	13.866	8.1431	12.725
5	5.3413	10.733	5.0525	11.022
6	3.7098	10.108	3.4084	10.41
7	3.7815	12.856	3.5488	13.089
8	9.9811	15.681	9.825	15.837
9	7.9117	17.186	8.3596	16.738
10	10.484	16.87	10.671	16.683
11	10.599	16.473	10.329	16.743
12	8.744	17.2	8.744	17.2
13	8.5003	17.162	9.078	16.584
14	7.1426	16.545	6.8436	16.844
15	6.5252	16.599	6.2502	16.874
16	9.4133	16.249	8.9018	16.76
17	11.697	16.503	11.424	16.776
18	10.652	16.984	10.439	17.197
19	8.6395	17.022	8.5929	17.069
20	7.4499	16.52	7.1754	16.795
21	6.9054	16.219	6.6884	16.436
22	9.1074	16.555	8.9724	16.69
23	4.9603	14.498	4.6407	14.817
24	6.4606	13.561	6.1724	13.85
Total	184.3987	360.425	182.0961	362.73

보일러와 열병합 발전기를 통한 열에너지 생산 시 탄소배출량을 고려한 Case 2의 경우 기존의 보일러는 상대적으로 생산량이 감소하고, 열병합 발전기는 생산량이 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

규제완화와 환경적 기술적 요인으로 인해, 전력 계통 전반에 분산전원의 보급이 확대되고 있는 추세이다. 이러한 분산전원을 일정 지역의 수용가에 전력과 열을 동시에 공급하는 구역전기사업자가 전력 시장에 참여하게 되었고, 분산전원의 확대 보급으로 인해 구역전기사업자도 점차 증가하게 될 것이다.

실시간으로 변화하는 유·무효전력의 가격에 따라 구역전기사업자는 소유한 분산전원의 발전량 변화를 통해 최대의 이익을 추구할 것이다. 그러나, 최근 국제적 환경 규제에 따라 탄소배출 비용을 고려할 경우 기존의 발전기 운영 방식은 구역전기사업자의 최대 운영 이익이라는 목적에 부합하지 않는다. 본 논문에서 제안한 탄소배출량 산출기법을 사용할 경우 구역전기사업자의 분산전원 운영에 따른 탄소배출

량뿐만 아니라 전체 계통 측면에서 구역전기사업자의 관할 구역 내 전력 및 열에너지 공급에 따른 탄소배출량을 산출할 수 있다. 따라서, 구역전기사업자 입장에서의 실시간으로 변화하는 전력 가격 변동과 탄소배출 비용을 고려한 구역전기사업자의 새로운 최적 운영 방안을 제시하고 전체 계통 측면에서 구역전기사업자의 보급이 저탄소 패러다임에 미치는 영향을 분석하는 중요한 의미를 갖는다. 이 때 분산전원별 최적 발전량은 여러 연구를 통해 그 우수성이 입증된 PSO 알고리즘을 이용함으로써, 다중 목적함수의 결과 대한 신뢰도를 높였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-38) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] P. A. Daly and J. Morrison, "Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems", Rural Electric Power Conference, pp. 424-429, 1999

[2] Funabashi T., Yokoyama R., "Microgrid field test experiences in Japan", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, pp. 2, 18-22 June 2006

[3] Prodanovic M., Green T.C., "High-Quality Power Generation Through Distributed Control of a Power Park Microgrid", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 53, Issue 5, pp. 1471-1482, Oct. 2006

[4] T.J. Hammons, "Impact of electric power generation on green house gas emissions in Europe: Russia, Greece, Italy and views of the EU power plant supply industry - A critical analysis", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, Issue 8, pp 548-564, Oct. 2006

[5] Erik Delarue, William D'haeseleer, "Greenhouse gas emission reduction by means of fuel switching in electricity generation: Addressing the potentials", ELSELVIER Energy Conversion and Management vol. 49, pp 843-853, Aug. 2007

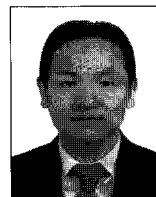
[6] Karki, S.; Mann, M.D.; Salehfar, H., "Substitution and Price Effects of Carbon Tax on CO2 Emissions Reduction from Distributed Energy Sources", Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006. PS '06, pp. 236-243, 14-17 March 2006

[7] C. A. Babu and S. Ashok, "Peak Load Management in Electrolytic Process Industries", IEEE Trans. on Power System, vol. 23, Issue 2, pp. 399-405, May. 2008

[8] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings IEEE Int'l. Conf. on Neural Networks, IV, pp.1942-1948, 1995

[9] Yuchao Ma, Chuanwen Jiang, Zhijian Hou, Chenming Wang, "The Formulation of the Optimal Strategies for the Electricity Producers Based on the Particle Swarm Optimization Algorithm", IEEE Trans. on Power System, vol. 21, no. 4, pp. 1663-1671, 2006

저 자 소 개



김 성 열 (金成烈)

1980년 3월 23일생. 2007년 2월 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 현재 동 대학원 박사과정 재학중
E-mail : psl@hanyang.ac.kr



심 헌 (沈憲)

1973년 8월 26일생. 1996년 순천향대학교 전기공학과 졸업. 2001년 한국기술교육대학교 전기공학과 석사 졸업. 현재 한양대학교 박사과정 재학중



배 인 수 (裴引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 현재 강원대 공학대학 전기제어공학부 전임강사



김 진 오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한양대학교 전자전기공학부 정교수.
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr