

PSO 알고리즘을 이용한 온실가스배출량에 따른 구역전기사업자의 최적 운영에 관한 연구

김성열*, 배인수*, 김진오*
한양대*

An Optimal Operation of Community Energy System Considering Greenhouse Gas Emission Using PSO Algorithm

Sung-Yul Kim*, In-Su Bae*, Jin-O Kim*
Hanyang University*

Abstract - 신재생에너지의 개발, 정부의 규제 완화와 환경적 이유로 인해 배전계통에서 분산전원은 점차 증가하는 추세이다. 최근 분산전원을 소유한 구역전기사업자가 전력시장의 새로운 시장 참여자로서 대두되고 있다. 분산전원을 소유한 구역전기사업자는 최대 이윤을 얻기 위해서 매 시간마다 발전량을 변화시켜야 한다. 본 논문에서는 배전계통에 연계된 분산전원의 최적 운영에 대해서 소개할 것이다. 이 때, 최적화의 목적은 구역전기사업자 이윤의 최대화이며, 국제적 환경규제에 따른 온실가스배출량을 고려하여 발전비용을 산출한다. 산출기법으로 Particle Swarm Optimization 알고리즘을 이용한 다.

1. 서 론

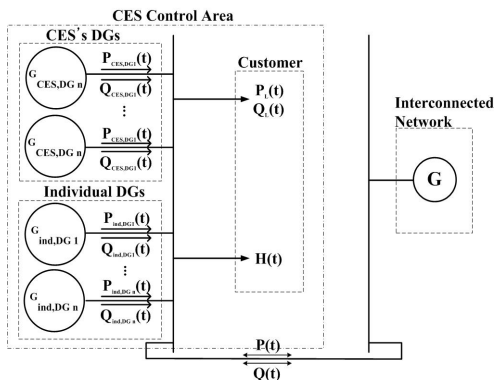
분산전원은 일반적으로 배전계통에 연결된 소규모 발전기를 말하며, 시스템의 안정도 유지, 순동예비력 제공, 송전비용 및 배전비용 감소에 유용하다.[1] 실제 전력 소비자에게 있어서, 분산전원은 전력공급의 안정 및 품질 개선을 가져다준다.[2,3] 사회적 측면에서, 신재생 에너지는 기존의 대단위 발전소로 인한 배기가스 등의 유해 물질을 줄이는데도 효과가 있으며, 전력품질의 개선 및 전력수급 안정과 배전계통의 최적화에도 주요한 대안이다.

송전 비용 및 전력가격의 변동을 줄이기 위해서는 분산전원의 설치가 좋은 대안이 된다. 이러한 시점에서, 배전계통 내에 분산전원을 소유한 구역전기사업자가 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 것이며, 구역전기사업자도 점차 보편화될 것이다. 따라서 구역전기사업자의 최적 발전 운영에 관한 연구가 절실히 필요한 시점이며, 변동하는 시장가격과 환경규제를 고려하여 보다 합리적인 발전 운영방안의 제시는 중요한 의미를 갖는다.

2. 본 론

2.1 구역전기사업 구조

구역전기사업자(Community Energy System: CES)는 매 시간 유, 무효 전력 및 열전력에 대해 발전계획을 수립한다. 이 때, 특정 공급구역 내 수용가의 열부하에 대한 공급을 최우선으로 하며, 과부족한 유효전력과 무효전력은 개인 분산전원과 연계된 계통을 통해 전력시장에 참여한다. 이는 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 1> 구역전기사업자의 계통구조

2.2 분산전원의 운영비용

분산전원에는 소수력, 태양광, 태양열, 풍력, 마이크로터빈, 열병합 발전 등 다양한 형태가 있다. 본 논문에서는 태양광 발전, 디젤 발전, 보일러, 열병합 발전, SVC를 통해 구역전기 사업자가 수용가에게 유효전력, 무효전력 및 열부하를 공급할 때 최대 운영 이익을 위한 발전기별 최적 발전량에 관해서 논의하며, 목적함수는 다음과 같다.

$$f(t) = C_{P,customer} \cdot \sum_{i \in CES, Load} P_i(t) + C_{H,customer} \cdot \sum_{i \in CES, Load} H_i(t) + C_{P,market}(P(t)) + C_{Q,market}(Q(t)) - \sum_{i \in CES, DG} C_{CES, DG_i}(P_{CES, DG_i}(t)) - \sum_{i \in CES, DG} C_{CES, DG_i}(H_{CES, DG_i}(t)) - \sum_{i \in ind, DG} C_{P, ind, DG_i}(t) \cdot P_{ind, DG_i}(t) - \sum_{i \in ind, DG} C_{Q, ind, DG_i}(t) \cdot Q_{ind, DG_i}(t) \quad (1)$$

$f(t)$: 시간 t 에서 CES의 전체 이익

$C_{P,customer}$: CES 구역내 수용가에게 판매하는 유효전력 가격

$P_i(t)$: CES 소유의 분산전원의 총 유효전력 생산량

$C_{H,customer}$: CES 구역내 수용가에게 판매하는 열 공급 가격

$H_i(t)$: CES 소유의 분산전원의 열 생산량

$C_{P,market}$: 유효전력을 시장에서 구입 또는 판매할 경우의 시장가격

$P(t)$: CES 구역내의 유효전력량과 유효부하량의 차

$C_{Q,market}$: 무효전력을 시장에서 구입 또는 판매할 경우의 시장가격

$Q(t)$: CES 구역내의 무효전력량과 무효부하량의 차

C_{CES, DG_i} : CES 소유 분산전원 i 의 발전비용

$P_{CES, DG_i}(t)$: CES 소유 분산전원 i 의 유효전력 생산량

$H_{CES, DG_i}(t)$: CES 소유 분산전원 i 의 열 생산량

$C_{P, ind, DG_i}(t)$: CES가 개인 소유 분산전원으로 부터 구입한 유효전력 가격

$P_{ind, DG_i}(t)$: 개인 소유 분산전원 i 로 부터 생산된 유효전력량

$C_{Q, ind, DG_i}(t)$: CES가 개인 소유 분산전원으로 부터 구입한 무효전력 가격

$Q_{ind, DG_i}(t)$: 개인 소유 분산전원 i 로 부터 생산된 무효전력량

2.3 탄소배출량에 따른 비용

온실 가스 배출량에 대한 규제가 없다면, 발전 비용에 비해 전력의 생산량이 높은 발전 설비가 가격 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.[4] 실제로, CO₂(1톤 기준) 배출량에 따라 유럽에서 적용중인 European Union Allowance(EUA)를 고려할 경우, 발전설비별 온실가스 배출에 의한 추가 발전 비용은 다음과 같다.

$$C_{GHG}(t) = \frac{EUA_p}{1000} \cdot \frac{E_{GHG}}{\eta_f} \cdot P(t) \quad (2)$$

$C_{GHG}(t)$: 온실가스 배출량에 따른 비용 [\$]

EUA_p : CO₂ 1톤당 규제 비용 [\$/ton-CO₂]

E_{GHG} : 온실가스 배출 인자 [kg-CO₂/GW_e]

η_f : 설비 효율 [GW_e/GW_i]

$P(t)$: 발전량 [GW_e]

본 논문에서는 분산전원의 운영 비용에 발전기별 온실가스배출 비용을 포함한 경우를 모의한다. 이 때 EUAp는 31 [\$/ton CO₂]로 가정한다.

2.4 Particle Swarm Optimization 알고리즘

Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘은 1995년 Kennedy와 Eberhart에 의해서 개발된 탐색적 최적화 기법이다.[5]

$$V_{i,k}^j = w \times V_{i,k}^j + c_1 \times r_1 \times (Xbest_{i,k}^j - X_{i,k}^j) + c_2 \times r_2 \times (Xbest_{i,k}^g - X_{i,k}^j) \quad (3)$$

k : 최적화 문제의 차원수

w : 관성 계수

c_1, c_2 : 가속 계수

r_1, r_2 : random 수 [0,1]

$V_{i,k}^j$: 반복회수 i 에서 j 개체의 k 항 속도벡터

$X_{i,k}^j$: 반복회수 i 에서 j 개체의 k 항 위치벡터

$Xbest_{i,k}^j$: 반복회수 i 까지 j 개체의 k 항에 대한 최적위치

$Xbest_{i,k}^g$: 반복회수 i 까지 전체개체의 k 항에 대한 최적위치

본 논문에서는 1000개의 개체, 반복회수 100회, 관성계수는 최대 0.9, 최소 0.4, 가속계수 c_1, c_2 는 각각 2.8, 3.5로 모의하였다.

2.5 사례 연구

사례연구에서 구역전기사업자는 관할 구역 내에 태양광 발전(2대), 디젤 발전(2대), 보일러(1대), 열병합 발전(1대)을 운영하여 유효전력 및 열전력을 생산한다. 무효전력은 SVC를 통해 보상한다. 개인이 운영중인 분산전원을 통해 생산되는 유효전력과 무효전력은 구역전기사업자가 구입한 후 수용가에게 재판매하는 형식을 취한다.

<표 1> 분산전원의 계수

	α_i	β_i	γ_i	BGHG $_i$	η_i	유효전력/열	한계 [MW]	
				[kg CO ₂ /GJ]	[GJe/GJ]		비율	min
디젤 1	21	1.322	0.084	72.6	0.51	1/0	100	1200
디젤 2	23	1.592	0.061	69.4	0.49	1/0	80	700
보일러	19	1.0921	0.0852	64.8	0.47	0/1	0	800
열병합	31	0.9211	0.0927	71.2	0.89	1/0.8	110	1000

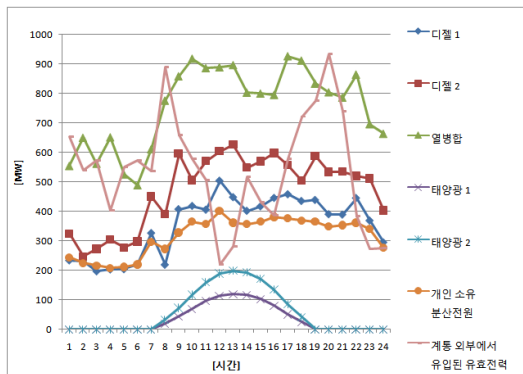
<표 2> 태양광 발전기 계수

	A_i	η_i	K_i	최대출력	방전율
	[m ²]			[KW]	[KW/hr]
태양광 1	3000	0.12	0.8	1,728	1,500
태양광 2	5000	0.12	0.8	2,304	2,000

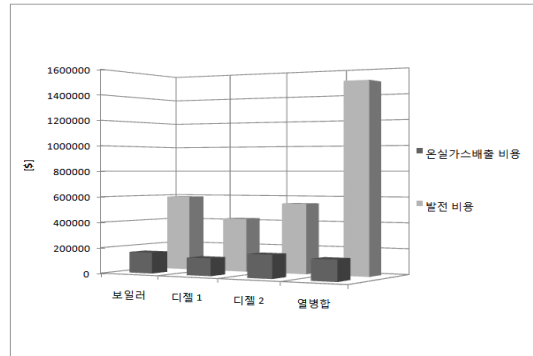
<표 3> 구역전기사업자의 전력 및 열의 구매, 판매 가격

	수용가		개인 소유 분산전원		전력시장	
	유효부하	열	유효부하	무효부하	유효부하	무효부하
	[\$/MW]	[\$/MW]	[\$/MW]	[\$/MVar]	[\$/MW]	[\$/MVar]
구매	0	0	85	2.8	95	3
판매	100	85	0	0	90	2.8

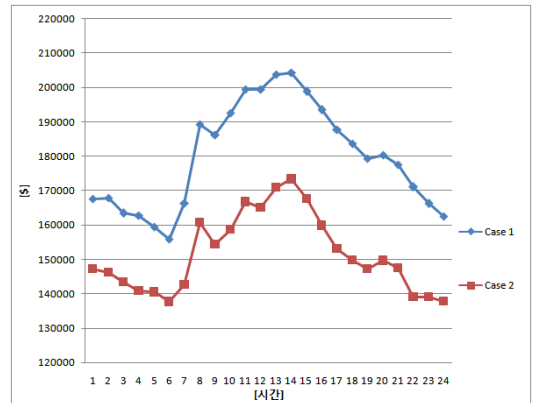
구역전기사업자는 수용가에 열전력 공급을 최우선으로 하며, 유,무효전력의 과부족량은 연계된 계통을 통해 거래한다. 수용가의 유효전력, 무효전력과 열부하는 RBTS 여름철 부하 데이터를 수정하여 사용하였다. 이 때, 역률은 0.95이상을 유지하고, SVC는 최대 100MVar까지 보상이 가능하다고 가정하였다.



<그림 2> 시간별 유효전력



<그림 3> 분산전원별 발전비용 및 온실가스배출 비용



<그림 4> Case별 구역전기사업자의 이익

온실가스배출에 따른 비용을 고려한 경우(Case 2), 고려하지 않은 경우(Case 1)에 비해 구역전기사업자의 시간별 운영이익이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 보일러와 열병합 발전기를 통해 열전력 생산을 할 때, 온실가스를 고려할 경우 기존의 보일러는 상대적으로 생산량이 감소하고, 열병합 발전기는 열 생산량이 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

실시간으로 변화하는 유효전력, 무효전력의 가격에 따라 구역전기사업자는 소유한 분산전원의 발전량 변화를 통해 최대의 이윤을 추구할 것이다. 그러나, 최근 국제적 환경 규제에 따라 온실가스배출 비용을 고려할 경우 기존의 발전기 운영 방식은 구역전기사업자의 최대 운영 이익이라는 목적에 부합하지 않는다. 따라서, 본 논문은 실시간으로 변화하는 전력 가격 변동과 온실가스배출 비용을 고려한 구역전기사업자의 새로운 최적 운영 방안을 제시하는 중요한 의미를 갖는다. 또한, 발전기별 최적 발전량은 여러 연구를 통해 그 우수성이 입증된 PSO 알고리즘을 이용함으로써, 결과에 대한 신뢰도를 높였다.

[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 Transactions on Industrial Electronics, Volume 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, Volume 28, Issue 8, pp 548-564, Oct. 2006
- [5] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings IEEE Int'l. Conf. on Neural Networks, IV, pp.1942-1948. 1995