

Particle Swarm Optimization을 이용한 VPP 최적구성

김동진, 김성열, 배인수, 김진오
한양대학교

Optimal VPP Composition Using Particle Swarm Optimization

DongJin Kim, SungYul Kim, InSu Bae, JinO Kim
Hanyang University

Abstract - 기술의 진보와 친환경적 시대의 조류에 발맞추어 배전계통에서 분산전원의 이용은 더욱 증가하는 추세이다. 따라서 저용량의 다양한 분산전원을 하나의 가상발전소(Virtual Power Plant, VPP)로 운영하는 개념이 도입되고 있다. 본 논문은 Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘을 이용하여 경제적 효율을 고려한 VPP의 최적구성을 다룬다. 사례연구로는 다양한 분산전원으로 구성된 시스템의 시간별 전력 및 열에너지 수요를 고려한 VPP의 최적구성을 수행한다.

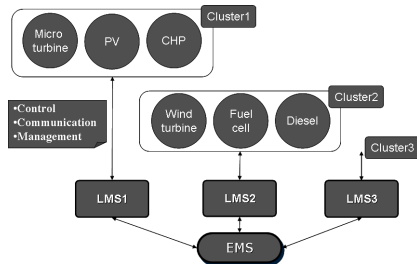
1. 서 론

환경문제 및 에너지 안정공급확보라는 관점에서 태양광 발전을 포함하는 천연에너지자원과 열병합발전 등 분산전원에 대한 관심이 고조되고 있으며 분산전원 관련기술이 발전하고 있다[1].

분산전원은 서로 다른 특징을 가지므로 새로운 형태의 운영을 고려해야 한다. 여기서 다수의 분산전원을 모아 하나의 VPP로 운영하는 개념이 등장하게 되었다.

VPP는 매니지먼트시스템(EMS)이 관리하는 여러 로컬매니지먼트 시스템(LMS)들로 구성되며, 각각 여러 분산전원들로 구성된 클러스터를 갖는다. VPP의 개념을 <그림 1>에 나타내었다.

본 논문에서는 여러 분산전원의 특성 및 운영비용, 그리고 수용가의 전력 및 열 수요를 고려하고, 발전된 Particle Swarm Optimization(PSO)를 이용하여, 디젤, CHP, 태양광 발전과 보일러로 구성된 복합 시스템의 VPP 최적 운영계획을 구성한다.



<그림 1> 가상발전소의 개념도

2. 본 론

2.1.1 태양광발전기

태양광발전의 전력생산량은 태양전지 주위의 기상환경과 에너지 변환효율, 효율보정계수 등에 의해 결정되며 전력생산 비용이 존재하지 않는다.

$$C_{DG} = 0 \quad (1)$$

2.1.2 디젤발전기

디젤발전기는 대표적인 연료형 분산전원이며, 시간당 비용함수는 2차함수의 형태를 갖는다.

$$C_{DG,k}(t) = \alpha_k + \beta_k \cdot p_k(t) + \gamma_k \cdot (p_k(t))^2 \quad (2)$$

여기서 $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ 는 분산전원 k 의 비용함수 계수이며, 발전기마다의 정해진 고유의 값이다.

본 논문에서는 구역전기사업자가 자신의 전력수요 이상으로 생산하지 않으며, 부족한 전력은 시장에서 구매한다고 가정한다. 따라서 전력시장을 용량이 무한하고 영점을 지나는 1차 비용함수를 갖는 발전기 증가화 할 수 있으며 다음과 같이 목적함수와 제약조건을 두고 분석한다.

$$\min \left\{ C_{market}(t) \times p_{market, VPP,m}(t) + \sum_{k \in VPP,m} C_{DG,k}(t) \right\} \quad (3)$$

$$p_{market, VPP,m}(t) + \sum_{k \in VPP,m} p_k(t) \geq \sum_{i \in VPP,m} L_i(t) \quad (4)$$

$$0 \leq p_{market, VPP,m}(t) \quad (5)$$

$$p_k^{\min} \leq p_k(t) \leq p_k^{\max} \quad (6)$$

여기서 $C_{market}(t), p_{market, VPP,m}(t)$ 는 각각 시간 t 에서 전력가격과 m 번째 VPP의 구입 전력량을 말한다.

2.1.3 보일러

전력과는 달리 열에너지는 시장을 통한 거래가 없으므로 여분의 에너지는 버려진다. 이는 앞선 디젤발전기와 유사한 조건이다. 보일러의 열에너지 생산량은 각 보일러마다 독립적으로 구할 수 없고, VPP에 있는 모든 보일러에 대해 경제급전 최적화 문제를 풀어야만 한다. 보일러의 경제급전 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min \left\{ \sum_{k \in VPP,m} C_{heat,k}(t) \right\} \quad (7)$$

$$\sum_{k \in VPP,m} h_k(t) \geq \sum_{i \in VPP,m} L_i^{heat}(t) \quad (8)$$

$$h_k^{\min} \leq h_k(t) \leq h_k^{\max} \quad (9)$$

2.1.4 열병합발전기

열병합발전은 열에너지와 전력을 동시에 생산하며, 본 논문에서는 열에너지와 전력 생산에 있어 두 생산량 간에 상관관계를 나타내기 위해 독립변수(η_{chp})를 가정하여 전력과 열에너지에 대한 비를 나타내었다. 열병합발전의 에너지 생산량을 결정하는 과정은 보일러와 동일하나 열병합발전의 비용함수는 열에너지뿐만 아니라 전력도 동시에 생산하는 비용이기 때문에 경제급전 최적화 문제에 적용하기 전에 비용함수를 수정해야 한다. 전력의 경제적 가치는 전력시장의 가격과 동일하므로 열병합발전의 순수 열에너지 생산비용은 전체 생산비용에서 전력의 가치를 뺀 값이

다. 즉, 열병합발전의 순수 열에너지 생산비용은 아래와 같다.

$$C_k(h_k(t)) = \alpha_k + \beta_k \cdot h_k(t) + \gamma_k \cdot (h_k(t))^2 - C_{market} \cdot \eta_{chp,k} \cdot h_k(t) \quad (10)$$

$$= \alpha_k + (\beta_k - C_{market} \cdot \eta_{chp,k}) \cdot h_k(t) + \gamma_k \cdot (h_k(t))^2$$

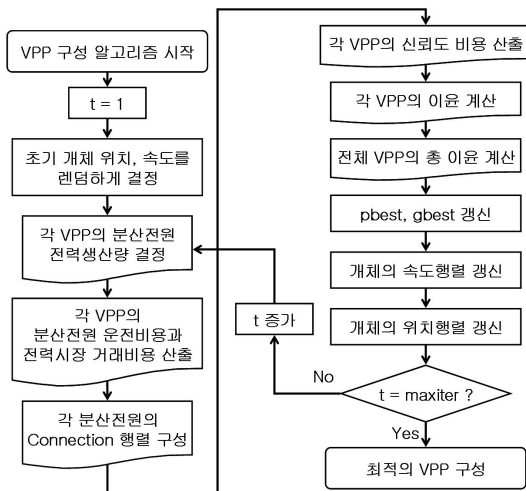
2.1.5 발전된 PSO알고리즘

PSO 알고리즘은 Kennedy와 Eberhart에 의해 처음 소개되었으며, 어려운 최적화 문제를 수행함에 있어서 그 효과는 응용영역의 확대에 나타나고 있다. 자연선택의 진화 메커니즘이 아닌 새 떼와 물고기 떼와 같은 생체군집의 사회적 행동양식을 바탕으로 하고 있으며, 군집 기반 알고리즘으로서 병렬처리 특징을 갖는다[2].

본 논문에서는 특정 발전기를 소유하는 VPP를 결정하기 위해 위상각(Phase)형태의 표현법을 제안하였다. 각 개체는 기존 PSO 알고리즘과 동일한 차원으로 구성되고 360°의 위상을 발전기 수로 분할하여 영역을 할당하며, 위상각의 값에 따라 포함될 VPP를 결정한다. 개체의 예를 아래에 나타내었으며 여기서 위첨자 j 는 개체수, 아래첨자 t 는 반복회수를 나타낸다.

$$X_t^j = (45^\circ, 190^\circ, 250^\circ, 310^\circ, 67^\circ)$$

알고리즘 구현에 있어서 몇 가지 고려해야 할 사항들이 있다. 첫째, VPP의 수가 많아짐에 따라 VPP 하나에 배당되는 위상각의 영역이 좁아지기 때문에 개체의 속도도 이에 맞춰 감소시켜야 한다. 둘째, 속도갱신을 위한 위상차를 구할 때 -180° 보다 작거나 180° 보다 큰 경우는 반대방향으로 측정하여 사용한다. 셋째, 하나의 VPP가 모든 발전기를 포함하지 않는다. 최적의 VPP 구성을 위한 알고리즘을 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> 최적의 VPP 구성을 위한 알고리즘

3. 사례연구

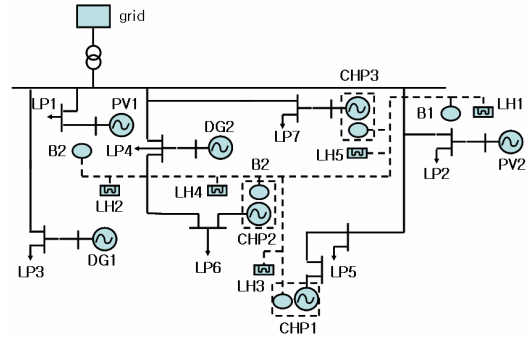
사례연구에 사용된 계통은 <그림 3>과 같으며, 태양광발전의 에너지변환 포화효율과 효율 보정계수는 국내 실측값과 계산값을 이용하였으며, 발전기 데이터들을 <표1-2>에 나타내었다[3,4]. 사례연구는 24시간에 대해 수행하였으며, 전력부하와 열부하의 패턴은 일반 가정용 부하와 상업용 부하를 따른다고 가정하였다.

<표 1> 태양광발전기(PV)

	$A[m^2]$	최대용량	η_c	K_p
PV1	3,000	345.6kW _p	0.12	0.8
PV2	5,000	576kW _p	0.12	0.8

<표 2> 디젤발전기(DG), 열병합발전기(CHP)와 보일러(B)

	비용함수 [\$/kW]			최대용량
	2차	1차	상수	
DG1	0.000054	0.0322	33	1,200 kW
DG2	0.000041	0.0592	19.4	700 kW
B1	0.0000752	0	24	800 kW
B2	0	0.0622	0	500 kW
CHP1(0.577)	0.0001077	0.269704	14.3	1,300 kW
CHP2(1.0)	0.0001917	0.1104	4	500 kW
CHP3(0.8)	0.0002074	0.2556	39.4	700 kW



<그림 3> 사례연구 계통도

VPP의 개수가 3개로 구성함에 따라, 총 운영비용은 \$15,184에서 \$15,206으로 증가하는 결과를 얻었으며, 구성결과를 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 3개의 VPP 최적구성안

VPP	1	2	3
구성	DG1	B1 CHP2	PV1 PV2 DG2 B2 CHP1 CHP3
열부하		LH4 LH5	LH1 LH2 LH3
전력부하	LP1 LP4	LP2 LP6 LP7	LP3 LP5

4. 결 론

본 논문은 시스템에서 모든 유닛의 비용함수를 기반으로 최적의 VPP를 구성하는 기법을 소개하였다. 특히, 발전된 PSO 알고리즘을 이용하여 VPP 개수에 따른 최적 구성안을 도출하였다. 친환경적인 시대의 흐름과 과학기술이 발전함에 따라 분산전원은 점차적으로 폭넓게 활용될 것이며, 이에 따른 VPP의 최적 구성이 주요한 요소가 될 것이다.

감사의 글

이 논문의 연구는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수님들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Willis, H.L., Scott, W.G., "Distributed Power Generation", Marcel Dekker Inc, New York, 2000
- [2] G. Savard, J. Gauvin, "The steepest descent direction for the nonlinear bi-level programming problem", Oper.Res.Lett., vol.15, no.5, pp.265 - 272, 1994
- [3] R. Caldon, A. Rossi Patria, R. Turri, "Optimal Control of a Distribution System with a Virtual Power Plant, Bulk Power System Dynamics and Control - VI", Cortina d'Ampezzo(ITA), 2006
- [4] 태양광 발전 모니터링 시스템. (<http://pvcms.hanyang.ac.kr>)