

VPP 운영을 위한 클러스터 구성 기법에 대한 연구

엄영철, 심현, 김진오
한양대학교 전기공학과

A study on cluster composition method for VPP operation

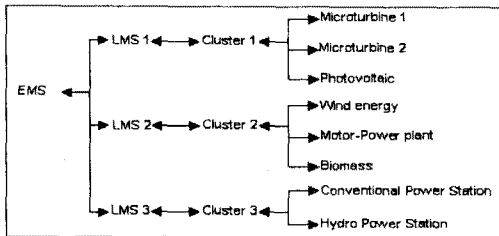
Young-Chul Eum, Hun Shim, Jin-O Kim
Dept. of EE, Hanyang University

Abstract - 미래의 전력 시스템은 환경과 기술적인 이유로 인해 많은 분산전원을 이용하게 될 것이다. 이런 분산전원들을 좀 더 효율적으로 운영하기 위해 다수의 분산전원을 모아 하나의 가상의 발전소로 운영하는 개념이 등장하게 되었는데, 이를 Virtual Power Plant(VPP)라고 한다. VPP는 매니지먼트 시스템이 관리하는 여러 클러스터들로 이루어져 있으며 이들 클러스터들은 각각 종류의 분산전원으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 분산전원들이 여러 개 존재하는 경우 각 클러스터를 효율적으로 운영하도록 하는 클러스터 구성기법에 대해 논의하게 될 것이다. 사례연구에서는 수용가의 부하를 전력 및 열 부하로 구분하였고 분산전원의 종류로 태양광 발전과 열병합 발전 등을 이용하여 클러스터를 구성하였으며 이를 통해 배전계통의 클러스터 구성 형태에 따른 운영비용을 비교하였다.

1. 서 론

최근 지구환경문제 및 에너지 안중공급확보라는 관점에서 태양광 발전을 포함하는 신 에너지자원(태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전 등)과 열병합 발전 등 분산전원에 대한 관심이 고조되고 있으며 이에 대한 연구의 중요성도 점차 커지고 있다. 또한 전력시장에 앞으로 경쟁이 도입되고 분산전원 관련기술이 발전함에 따라 미래의 전력시장에서는 그 역할이 중요시되고 있다.

이런 시대적인 변화에 맞추어 분산전원들을 좀 더 효율적으로 운영하고 미래 전력시장에서 적용하기 위해 여러 분산전원들을 모아 가상의 발전소처럼 운영하는 개념이 등장하게 되었는데 이를 Virtual Power Plant(VPP)라고 한다.[1]



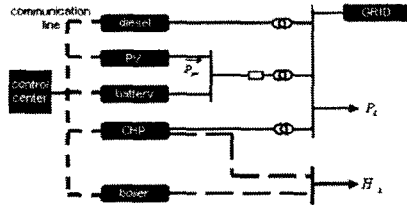
<그림 1> Virtual Power plant의 구성도

VPP는 매니지먼트 시스템이 관리하는 여러 클러스터들로 이루어져 있으며 이들 클러스터들은 각각 여러 종류의 분산전원으로 구성되어 있다. 그림 1은 이런 VPP에 대한 일반적인 구조를 나타내고 있다.

본 논문에서는 분산전원을 최적의 경제적 효율을 지닐 수 있도록 운영하고 이를 이용하여 클러스터를 구성하는 방법에 대해 논의할 것이다.

2. 시스템 구성

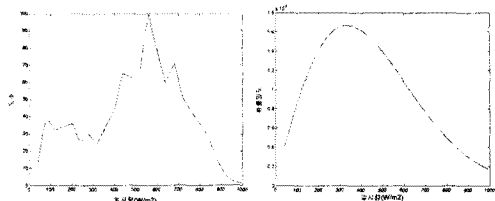
그림 2는 본 논문의 발전 시스템을 구성한 것이다. 구성 요소들은 각각 계통, 디젤발전기, 보일러, CHP(열병합발전) 유닛, 그리고 재생에너지원으로 태양광 발전으로 구성되어 있다.



<그림 2> VPP 클러스터 시스템

2.1 태양광 발전

태양광 발전시스템의 출력은 기상조건에 따라 시시각각으로 변한다. 따라서 본 논문에서는 태양광 발전량에 가장 영향을 많이 미치는 일사량과 태양전지 효율을 고려하여 계절에 따른 시간별 도수분포의 평균과 분산을 이용, 일사량 확률밀도함수 (Probability Density Functions, PDF)를 얻고 이를 가지고 태양광 발전의 출력을 계산하였다.



<그림 3> 봄철 13시 일사량 도수 분포와 확률밀도함수

또한 태양광 어레이 효율의 경우 Kyocera modules의 특성을 이용하였으며 태양광 발전의 출력이 급격히 변하는 것을 막기 위해 배터리를 이용하여 출력이 평균보다 이하일 때에는 방전을, 평균 출력보다 더 많은 전력을 생산할 때에는 충전하는 형태로 운영하였다.[4]

2.2 디젤발전기 및 보일러

디젤발전기 및 보일러는 전력(p)와 열에너지(h)를 생산하는 것으로 그에 대한 비용함수는 다음과 같은 2차함수의 형태를 가진다.

$$C_e(p) = \alpha_e + \beta_e \cdot p + \gamma_e \cdot p^2 \quad (1)$$

$$C_h(h) = \alpha_h + \beta_h \cdot h + \gamma_h \cdot h^2 \quad (2)$$

2.3 열병합 발전(CHP)

CHP 유닛의 경우 열에너지(h)와 전력(p)을 같이 생산하며 본 논문에서는 열에너지와 전력에너지를 일정한 비율로 생산한다고 가정하였다.

$$p_{chp}(h_{chp}) = \eta_{chp} \cdot h_{chp} \quad (3)$$

2.4 계통에서의 전력교환

전력 시장이 자유화 된다면 계통의 시간당 전력 가격은 C_{spot} 으로 주어지게 되고, 실제 전력의 교환 시 그 가격으로 운영될 것이다. 그에 대한 식은 다음과 같다.

$$C_{grid}(p_{exchange}) = C_{spot} \cdot p_{exchange} \quad (4)$$

$p_{exchange}$ 는 계통에서 교환되는 전력의 양을 나타내며 이 값이 음수가 된다면 이는 곧 VPP에서 전력을 생산하여 계통에 판매한 것으로 그 비용은 VPP의 이익이 된다.

3. VPP 클러스터 운영

VPP 운영자는 각 발전기를 최적으로 운영하여 부하에 적용하고, 그 외 남은 전력은 계통에 판매를 하게 된다. 본 논문에서는 주어진 분산전원들을 하나의 클러스터로 묶어 운영하였을 경우와 그렇지 않을 경우를 비교하였으며 이를 이용하여 2개의 클러스터로 분할하여 구성할 경우에 대한 운영까지 고려해보았다.

분산전원들을 하나의 클러스터들로 묶었을 경우 목적함수는 각 생산비용을 최소화 하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{total} = \sum_i^n C_e(p_i) + \sum_i^n C_h(h_i) + \sum_i^{n_{chp}} C_{chp}(h_{chp,i}) + C_{grid} \quad (5)$$

이와 관련된 전력에너지와 열에너지의 부하 밸런스는

$$\sum_i^n h_i + \sum_i^{n_{chp}} h_{chp,i} - h_{demand} \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_i^n p_i + \sum_i^{n_{chp}} p_{chp,i} + \sum_i^{n_{pv}} p_{pv,i} + p_{grid} - p_{demand} = 0$$

3.1 2개의 클러스터로 분할 구성 및 운영

주어진 분산전원들을 제어상의 이유나 여러 발전 사업자들의 등장으로 하나의 클러스터로 묶어서 운영하지 못할 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 2개의 클러스터(A, B)를 나눌 경우 전체 운영비용을 고려하여 가장 작은 운영비용을 갖도록 분산전원들 나누어 구성하는 방법에 대해 생각해 보았다. 이에 대한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min f_T = f_A + f_B \quad (7)$$

$$f_A = \sum C \cdot x_A$$

$$f_B = \sum C \cdot x_B$$

여기서 C 는 분산전원의 비용함수를 나타내며, x_A 와 x_B 는 각각 A클러스터와 B클러스터의 구성을 나타낸다. 제약 조건으로는 앞서서와 마찬가지로 클러스터 별로 전력에너지와 열에너지 부하 밸런스와 각 분산전원에 대한 용량을 고려하였다.

$$\sum_{i \in k} h_i + \sum_{i \in k} h_{chp,i} - h_{demand,i} \geq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i \in k} p_i + \sum_{i \in k} p_{chp,i} + \sum_{i \in k} p_{pv,i} + p_{grid} - p_{demand,i} = 0$$

$$k = \{A, B\}$$

3.1.1 분산전원 별 운영비용

x_A 와 x_B 를 구성하기 위해 우선 모든 분산전원을 하나의 클러스터로 운영하였을 경우(case 1)와 그렇지 않은 경우(case 2)에 대하여 운영비용을 계산하였다. 그리고 그 결과를 가지고 각 분산전원별로 case 1과 case 2의 운영비용 차를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이를 이용하여 클러스터 구성하는 데 이용하였다.

3.1.2 클러스터 구성 순서

여러 개의 분산전원에 대하여 2개의 클러스터로 나누는 방법은 다음과 같은 절차로 이루어진다.

- 1) 부하와 분산전원의 종류 구성하고 분산전원의 크기에 대한 순서로 {X} 구성
- 2) k=0 : 임의로 초기값 {X} 구성

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
{X}	x_A	1	0	1	0	0	1	0	1	1
	x_B	0	1	0	1	1	0	1	0	0

<그림 4> {X}의 초기구성

- 3) 구성된 {X}를 가지고 24시간에 대한 전체운영비용 계산
- 4) k값을 1 증가 시킨다.
- 5) {X}에서 k 번째 요소 변경해서 새로운 {X}' 구성
- 6) 새로 구성된 {X}'에 대해 운영비용계산
- 7) 운영비용이 감소 시 {X}'를 {X}로 저장 후 단계 3으로 돌아가 반복
- 8) 반대로 운영비용 증가 시 그 변경 요소를 전단계로 되돌리고 다시 단계 3으로 돌아가 반복
- 9) {X} 모든 구성 요소에 대해 위와 같은 단계를 거친다.
- 10) 단계 8에서 얻어진 {X}에 대해 각 요소별 Case 1과 Case 2에 대한 운영비용 차가 큰 것부터 작은 순서로 재배열
- 11) k값을 초기화 시킨 후 다시 단계 3부터 단계 7 반복
- 12) 두 가지 과정을 거쳐 얻어진 {X} 요소에 대해 다시 원래 순서로 재배열 후 최적값으로 선정

4. 사례 연구

사례연구에서는 VPP를 구성하여 최적 운영을 하였을 경우(Case 1)와 그렇지 않은 경우(Case 2)를 비교해 보고 이를 토대로 2개의 클러스터로 나누어 구성하고 그 운영비용을 구하였다. 시스템을 구성하는 분산전원은 각각 디젤발전기, 보일러, CHP 유닛, 그리고 태양광 발전 유닛으로 구성 되어 있으며 이에 대한 데이터는 다음과 같이 표로 나타내었다.

<표 1> 디젤 발전기와 보일러

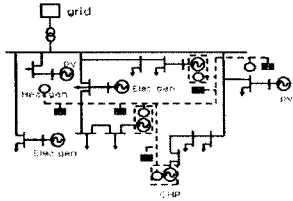
	p_{min} (kW)	p_{max} (kW)	h_{min} (kW)	h_{max} (kW)	
p_1	0	1200	h_1	0	800
p_2	0	700	h_2	0	500

<표 2> CHP 유닛

	$h_{chp min}$ (kW)	$h_{chp max}$ (kW)	$hc(kW_e/kW_h)$
h_{chp1}	0	1300	1.3
h_{chp2}	0	500	0.7
h_{chp3}	0	800	1.1

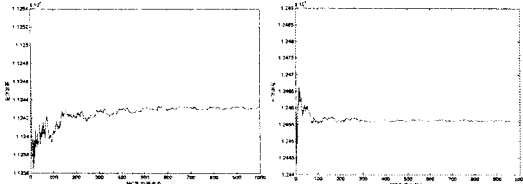
<표 3> 태양광 발전 평균 출력

평균출력 (kW)	
P_{PV1}	100
P_{PV2}	150



<그림 5> 사례연구에 사용된 계통 형태

시간당 전력/열에너지 부하는 주거용, 상업용 부하 패턴을 따른다고 가정하였으며 태양광의 경우 설치 지역의 일사량에 따라 그 출력이 결정되기 때문에 모의법(MCS)을 이용하여 시뮬레이션 하였다.



<그림 6> case 1과 case 2의 운영비용에 대한 MCS 결과

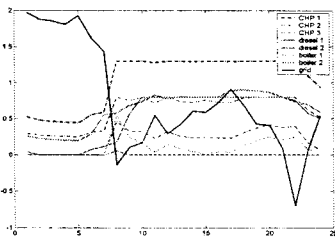
이 결과를 이용하여 앞에서 사용된 분산전원들을 2개의 클러스터로 나누어 구성(case 3)하고 그 운영비용을 계산하였으며 A클러스터와 B클러스터의 경우 그 구성과 클러스터 별 시간당 운영비용을 다음 표로 나타내었다.

<표 4> 2개의 클러스터 구성

	구성
A 클러스터	2개의 PV, 디젤 J
B 클러스터	CHP 등 나머지 유닛

<표 5> 클러스터 시간별 운영비용

시간	A 클러스터 운영비용	B 클러스터 운영비용	시간	A 클러스터 운영비용	B 클러스터 운영비용
1	108.68	253.95	13	207.36	376.96
2	99.54	240.91	14	207.25	394.98
3	95.53	236.94	15	214.4	396.63
4	93.42	233.91	16	208.46	409.5
5	92.53	237.82	17	233.92	420.56
6	102.52	252.01	18	233.26	411.68
7	116.93	259.2	19	228.51	391.58
8	124.28	368.53	20	224.05	397.81
9	164.38	350.92	21	206.28	361.46
10	190.31	369.87	22	187.36	273.440
11	214.88	379.16	23	168.23	272.44
12	202.97	380.24	24	151.9	275.77



<그림 7> 24시간에 대한 case 3 유닛별 출력

모든 case의 운영비용 결과를 비교해보면, 클러스터를 구성하는 것이 따로 개별적으로 운영하는 방식에 비해 경제적으로 이익임을 알 수 있다. 하지만 앞에서 말한 것과 같이 제어상의 문제나 분산전원 소유자간의 문제로 하나의 클러스터를 구성할 수 없을 경우 2개의 클러스터로 구성하여 운영한다면 전체 비용을 고려하여 다음과 같이 나누어 구성할 수 있을 것이다. 그 때의 운영비용을 살펴보면 개별적 운영방식보다 더 이익임을 알 수 있고 이를 토대로 클러스터별 확장 계획에도 적용 가능할 것이다.

<표 6> 운영비용

	운영비용(\$)
case 1	11243.23
case 2	12456.04
case 3	12026.02

5. 결 론

본 논문에서는 VPP를 구성하는 분산전원들에 대한 클러스터 구성과 그에 대한 운영을 살펴보았다. 이는 시스템을 구성하는 분산전원의 비용함수를 배경으로 부하의 종류와 크기에 맞게 분산전원의 출력을 24시간에 대해 결정하고 그 운영비용을 최소화하는 것을 목적으로 하여 최종 운영비용을 구하였으며 태양광 발전의 경우 불확실성을 고려하기 위해 모의법을 통해 결과를 얻을 수 있었다. 또한 단일 클러스터가 아닌 2개의 클러스터를 운영해야 하는 경우 전체 운영비용이 최소화 하도록 클러스터를 구성하였다.

앞으로 분산전원의 수가 증가하고 이들 유닛들에 대한 통합운영 등에 관심이 높아 질 것이다. 향후 미래 전력 산업에 있어 이런 VPP의 개념을 도입하여 분산전원의 운영이나 확장 계획 등에 적용할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Dielmann, Alwin van der Velden, "Virtual power plants (VPP) - a new perspective for energy generation?", Modern Techniques and Technologies, Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists 7-11, pp.18-20, 2003
- [2] Tao Guo, Mark I. Henwood, and Marieke van Ooijen, "An algorithm for combined heat and power economic dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, pp. 1778 - 1784, 1996
- [3] Wenyuan Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, pp. 918-923, 2002
- [4] Wilhelm Durisch, Dierk Tille, A. Worz, Waltraud Plapp, "Characterisation of Photovoltaic Generator", Solar Energy, pp. 273-284, 2000
- [5] R. Caldon, A. Rossi Patria, R. Turri, "Optimal Control of a Distribution System with a Virtual Power Plant", Bulk Power System Dynamics and Control, pp. 22-27, 2004.