

불평형배전계통에서 부하모형을 고려한 분산형전원의 설치 및 운영계획

김규호\* 이우정\*\* 이상봉\*\* 이상근\*\*\* 유석구\*\*  
 \*안산공과대학 \*\*한양대학교 \*\*\*원주대학

Placement and Operation Planning of DG System considering Load Modeling in Unbalanced Distribution Systems

Kyu-Ho Kim\* Yu-Jeong Lee\*\* Sang-Bong Rhee\*\* Sang-Keun Lee\*\*\* Seok-Ku You\*\*  
 \*Ansan College of Tech. \*\*Hanyang Univ. \*\*\*Wonju College

**Abstract** - This paper presents the scheme for load model based dispersed generation system (DGs) installation and operation in unbalanced distribution systems. Groups of each individual load model consist of residential, industrial, commercial, official and agricultural load. The main idea of solving fuzzy nonlinear goal programming is to transform the original objective function and constraints into the equivalent multiple objective functions with fuzzy sets to evaluate their imprecise nature for the criterion of power loss minimization, the number or total capacity of DGs and the bus voltage deviation, and then solve the problem using genetic algorithms. The method proposed was applied to IEEE 13 bus test systems to demonstrate its effectiveness.

피자 Goal Programming으로 모델링 하였으며, GA를 사용하여 다중 목적함수의 최적해를 얻을 수 있다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위하여 모델계통에 적용하였다.

2. 3상 조류계산

2.1 3상 조류계산 흐름도

본 연구에서 불평형 3상 조류계산에 사용한  $Z_{BUS}$  가우스법은 네트워크 방정식을 풀기위하여  $Y_{BUS}$  행렬과 등가 주입전류를 사용하였다[5].  $Z_{BUS}$ 법의 수렴성은 시스템의 구체적인 전압 지정 모선의 수에 크게 영향을 받는다.  $Z_{BUS}$ 법은 빠른 수렴율과 최소의 메모리가 요구되므로 시스템의 변전소만이 전압지정 모선이라면, 배전계통에는  $Z_{BUS}$ 법이 아주 적합한 방법이다. 그림 1은 3상 조류계산 알고리즘의 순서도이다.

1. 서론

현재의 전력계통은 공조부하의 증대에 따른 부하율의 악화, 설비 이용률의 저하 그리고 화력발전소의 CO<sub>2</sub> 배출에 따른 지구 온난화의 가능성 등이 문제점으로 대두되고 있다. 특히 대기오염에 대표되는 환경문제가 현재보다도 심각하게 되면 경제효율만을 우선하는 전원계획을 책정하는 것은 불가능하게 되고, 환경보호에 공헌하는 에너지가 선택되지 않으면 안될 것이다. 따라서 태양전지, 연료전지, 전지저장시스템(BESS), 열병합발전과 같은 분산형전원은 수용가에 밀집해 설치할 수 있으므로 배전계통에 적절히 설치되면 전력손실을 줄이고 대규모 화력발전소 등의 건설을 대신할 수 있으므로 경제효율 뿐만 아니라 환경보호에 공헌할 수 있다[1].

분산형전원을 배전계통에 설치하는 연구가 많이 진행되었다. Griffin과 Tomsovic은 분산형전원 최적설치와 손실감소에 관한 알고리즘을 제시하였고, 특히 배전계통에서 분산형전원의 설치에 영향을 저항손실과 용량감소(capacity savings)에 관련 있음을 강조하였다[2]. Celli와 Pilo는 GA를 이용하여 계통의 노드에서 피더용량의 한계, 전압분포와 3상 단락전류와 같은 기술적 제약을 고려하여 배전계통에 분산형전원 설치하는 새로운 알고리즘을 제안하였다[3]. Nara와 Hayashi는 손실 최소화의 관점에서부터 tabu search를 적용해 분산형전원을 설치하는 방법을 제시하였다[4].

본 연구에서는 배전계통의 효율적인 운영을 위하여 전력손실을 감소하기 위한 목적함수와 분산형전원의 수 또는 총용량 및 모선전압크기를 제약으로 고려하였다. 이 목적함수와 제약조건을 다중 목적함수로 변형하였고, 각각에 대한 부정확한(imprecise) 성질을 평가하기 위하여

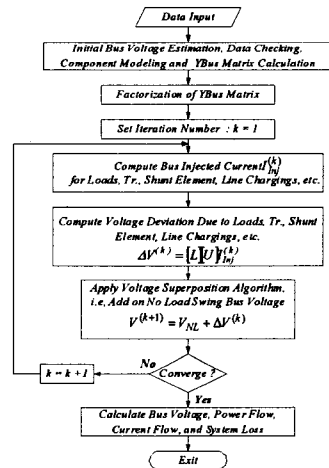


그림 1 3상조류계산 알고리즘 순서도

2.2 부하 모델

각 개별부하 요소는 주입전류로 표현되는 전압 변동에 관한 4차 방정식으로 표현된다. 각 주입전류와 부하모델은 참고문헌 [5]에 자세히 설명되어 있다. 전압의 증분 변화량에 의하여 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P_1 = P_0(a_0 + b_0\Delta V + c_0\Delta V^2 + d_0\Delta V^3 + e_0\Delta V^4) \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_0(a_0 + b_0\Delta V + c_0\Delta V^2 + d_0\Delta V^3 + e_0\Delta V^4)$$

여기서  $P_0, Q_0$  : 기본전압에서의 유효·무효전력

$P_1, Q_1$  : 실제전압에서의 유효·무효전력  
 $a_p \cdots e_p$  : 개별부하에서 전압에 대한 P의 상수  
 $a_q \cdots e_q$  : 개별부하에서 전압에 대한 Q의 상수

본 연구에서 고려한 개별부하 모델그룹은 주거용, 상업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하로 구성하였으며 각 부하는 주방설비, 백열전등 조명, 형광등 조명, 텔레비전, 냉난방 설비, 냉각 팬, 냉장고, 펌프 그리고 다양한 정격의 유도전동기 등으로 구성하였다.

### 3. 분산형전원 설치를 위한 문제의 정식화

배전계통의 전력손실을 최소화하기 위하여 주어진 시간 동안의 부하변동을 고려할 필요가 있다. 부하변동을 이산적으로 근사화시키고 부하는 일정하게 변화된다고 가정하여 부하지속곡선(load duration curve)을 구간별 선형 함수(piecewise linear function)로 근사화한다[6].

#### 3.1 목적함수와 제약조건의 Fuzzy 구성

배전계통의 전력손실 비용을 감소시키고 분산형전원의 수와 크기 및 모선전압을 제약으로 고려하였다. 이 목적함수와 제약조건은 다중 목적함수로 변형하였고, 각각에 대한 부정확한(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였다. 퍼지집합은 일반적으로 멤버십 함수로 나타내며 멤버십 함수의 값이 증가함에 따라 각 함수의 최적해는 향상된다.

#### 전력손실 최소화

$$\text{Max. } f_1(X) = \sum_{i=0}^n T^i |P_{loss}^i - P_{loss}^0| \quad (7)$$

$f_1$ 은 전력손실의 편차이며,  $P_{loss}^0$ 와  $P_{loss}^i$ 는 각각 분산형전원 설치 전후의 부하레벨  $i$ 에서 전력손실이다.

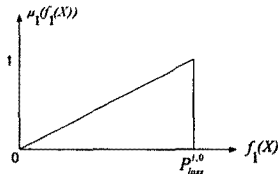


그림 2 전력손실 최소화에 대한 멤버십함수

#### 분산형전원의 수 또는 총용량의 최소화

$$\text{Min. } f_2(X) = |\Delta P_G^c| \quad (8)$$

여기서,  $\Delta P_G^c = P_G^c - P_{G,\min}^c$ 이고  $P_{G,\min}^c$ 는 0이다.  $f_2$ 는 분산형전원의 수 또는 총용량의 편차이다. 그림 3에서  $\Delta P_{G,\min}^c$ 과  $\Delta P_{G,\max}^c$ 는 계통내에 설치되는 분산형전원의 설치 수 또는 총용량에 대한 최소 및 최대 편차이다.

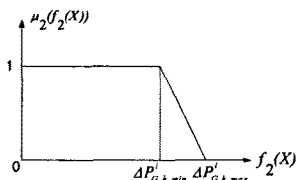


그림 3 분산형전원의 수 또는 총용량의 최소화에 대한 멤버십 함수

#### 전압편차의 최소화

$$\text{Min. } f_3(X) = \max |\Delta V_j| \quad j=1,2,\dots,N_b \quad (9)$$

여기서  $\Delta V_j = 1.0 - V_j$ 이고,  $f_3$ 는 모선전압의 최대편차이고,  $V_j$ 는 모선  $j$ 에서의 전압이며  $N_b$ 는 모선의 총수이다. 그림 4에서  $\Delta V_{j,\min}$ 와  $\Delta V_{j,\max}$ 는 모선  $j$ 에서 전압의 최소 및 최대편차이다.

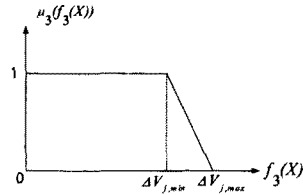


그림 4 전압편차의 최소화에 대한 멤버십 함수

3개의 목적함수 식(7), (8)과 (9)를 Goal Programming을 이용하여 다음 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며, GA를 이용하여 다중목적함수의 부정확한 정보에 대한 타협해를 얻을 수 있다[7,8].

$$\begin{aligned} &\max \sum_{k=1}^3 \omega_k \mu_k(f_k(X)) \\ &s.t \\ &0 \leq \mu_k(f_k(X)) \leq 1 \quad k = 1,2,3 \end{aligned} \quad (10)$$

### 4. 사례연구

본 연구에서는 배전계통에 있어서 분산형전원의 최적 설치에 의한 손실감소 및 효율적인 운영을 위한 방안을 제시하였다. 제한한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 IEEE 13모선 계통에 적용하였다. 각각의 상수는 다음과 같다.

- DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150
- $\Delta P_{G,\min}^c$ : 3개, 90[kW](Total capacity)
- $\Delta P_{G,\max}^c$ : 6개, 900[kW](Total capacity)
- $\Delta V_{j,\min}$ : 0.03[p.u.]
- $\Delta V_{j,\max}$ : 0.15[p.u.]
- Time period [h]: 8(9:00 17:00)
- Test years: 5

각각의 개별부하의 전압특성을 고려한 분산형전원의 설치 및 운영계획을 위하여 다음과 같이 부하모델을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하였다.

Case 1: 각 모선에서 부하모형을 고려하였다. 개별부하 모델그룹은 주거용, 상업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하로 구성하였으며 각 부하는 주방설비, 백열전등 조명, 형광등 조명, 텔레비전, 냉난방 설비, 냉각 팬, 냉장고, 펌프 그리고 다양한 정격의 유도전동기 등으로 구성하였다. 또한, 분산형전원의 출력은 부하변동에 따라 제어가 가능하다.

Case 2: 모든 부하는 PQ 일정부하이고, 분산형전원의 출력은 부하변동에 따라 제어가 가능하다.

모델계통의 모선 데이터는 표 1에 나타내었으며 선로데이터는 참고문헌 [9]에 상세히 제시되어 있다. 그림 4에 계통도를 나타내었다. 각 부하레벨에 따른 부하지속시간은 표 2에 나타내었다. 표 3은 제한한 알고리즘에 의하여 각 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 크기를

나타낸 것이다. 표의 결과로부터 모선 611, 652, 675, 692에 분산형전원이 설치되어야 함을 알 수 있다.

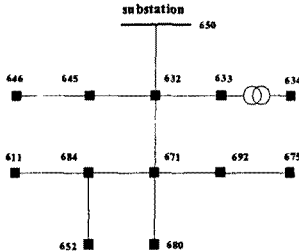


그림 4 IEEE 13모선 계통

표 1 IEEE 13모선 시스템의 부하 데이터

Node	Load Model ID	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
611	2	0	0	0	0	170	80
634	3	160	116	120	87	120	87
645	5	0	0	170	125	0	0
646	4	0	0	230	132	0	0
652	2	128	86	0	0	0	0
671	3	385	220	385	220	385	220
675	3	485	190	68	60	290	212
692	4	0	0	0	0	170	151

표 2 부하수준과 부하지속시간

Load Level(%)	100	90	70
Time interval(hours)	3,650	7,300	3,650

표 3 시뮬레이션 결과

Optimal location	Case 1[kW]			Case 2 [kW]		
	100%	90%	70%	100%	90%	70%
611	90	90	90	90	60	0
652	120	120	90	150	150	120
675	150	150	150	120	120	90
692	90	60		150	150	150
Total	450	420	330	510	480	360

표 4 분산형전원 설치 전후의 전압크기 및 손실의 비교

	Load level	Case 1		Case 2	
		Without DGs	With DGs	Without DGs	With DGs
Real power losses [kW]	100%	434,229	290,175	492,780	302,080
	90%	698,028	448,521	782,118	473,434
	70%	208,431	128,344	227,669	142,934
Total losses [kW]		1,340,689	867,041	1,502,568	918,450
$V_{min}$ [p.u.]	100%	0.8999	0.9411	0.8884	0.9364
	90%	0.9105	0.9510	0.9012	0.9470
	70%	0.9311	0.9619	0.9255	0.9595
$V_{ave}$ [p.u.]	100%	0.9434	0.9566	0.9388	0.9568
	90%	0.9494	0.9624	0.9456	0.9611
	70%	0.9610	0.9721	0.9587	0.9697

최적설치 용량은 부하레벨에 따라 다르게 부하레벨에 대하여 가변적으로 동작될 필요가 있다고 사료된다. 부하모형을 고려한 Case 1과 부하모형을 고려하지 않는 Case 2에 있어서 분산형전원의 용량은 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 유도전동기와 같은 다양한 산업용 부하의 영향 때문이다. 따라서 분산형전원의 설치 및 운영에 있어서 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 영향을 반영하는 것이라 사료된다.

또한, 표 3에서는 분산형 전원의 설치 전과 후의 손실 비용과 전압크기를 비교하여 나타내었다.  $V_{max}$ ,  $V_{ave}$  와  $V_{min}$ 는 분산형전원 설치 전 보다 상당히 개선되었고 각 부하레벨에서의 손실은 감소되었다. 손실의 경우 분산형전원 설치 전에는 Case 1의 경우 1,340,689(kW)이었으나, 설치 후에는 867,041(kW)가 되었고 결국 5년 간 473,648(kW)가 감소됨을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 불평형 배전계통에서 부하모형을 고려한 분산형 전원의 설치 및 운영계획에 대한 방안을 제시하였다. 실제적인 배전계통 해석을 위해 배전계통의 부하를 주거, 산업, 상업, 사무 및 농업부하로 그룹화하고 부하모델로 다르게 나타내는 전압특성을 고려하였다.

부하모형을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 있어서 분산형전원의 용량은 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 유도전동기와 같은 다양한 산업용 부하의 영향 때문이다. 따라서 분산형전원의 설치 및 운영에 있어서 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 영향을 반영하는 것이라 사료된다. 또한, 목적함수와 제약조건에 대한 불확실(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였고, GA를 사용하여 최적해를 얻을 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] R. C. Dugan and S. A. Thomas et. al. "Integrating Dispersed Storage and Generation (DGS) with An Automated Distributed System", IEEE Trans. PAS, pp.1142-1146, 1984.
- [2] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrestand and A. Law, "Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses", Proceedings of the 3rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, pp.1446-1454
- [3] G. Celli, and F. Pilo, "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks", 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 2001, pp.81-86.
- [4] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda and T. Ashizawa, "Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators", Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, IEEE, Vol. 2, pp.918-923
- [5] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas and E. A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis A Rigid Approach." IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp.1146-1152, 1991
- [6] J. J. Grainger and S. H. Lee, "Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp.1105-1116, March, 1981
- [7] M. Gen, K. Ida and J. Kim, "Fuzzy Goal Programming using Genetic Algorithm", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp.413-418, 1997
- [8] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [9] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-9, 1991