

배전계통에서 분산형전원의 최적설치 계획

김규호* 이유정** 이상봉** 이상근*** 유석구**
 *안산공과대학 **한양대학교 ***원주대학

Optimal Allocation Planning of Dispersed Generation Systems in Distribution System

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 a fuzzy-GA method to resolve dispersed generator placement for distribution systems. The problem formulation considers an objective to reduce power loss costs of distribution systems and the constraints with the number or size of dispersed generators and the deviation of the bus voltage. The main idea of solving fuzzy nonlinear goal programming is to transform the original objective function and constraints into the equivalent multi-objectives functions with fuzzy sets to evaluate their imprecise nature and solve the problem using the proposed genetic algorithm, without any transformation for this nonlinear problem to a linear model or other methods. The method proposed is applied to the sample systems to demonstrate its effectiveness.

1. 서론

태양전지, 연료전지, 전지저장시스템(BESS), 열병합발전과 같은 분산형전원의 설치는 수용가에 전력품질과 전압조건에 중요한 영향을 미친다. 분산형전원은 수용가에 밀접해 설치할 수 있으므로 배전계통에 적절히 설치되면 전력손실을 줄일 수 있으며, 대규모 발전소 건설을 대신할 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 관점으로부터 tabu search를 적용해 분산형전원을 설치하는 방법을 제시하였다[4].

본 연구에서는 배전계통의 효율적인 운영을 위하여 전력손실비용을 감소하기 위한 목적함수와 분산형전원의 수와 크기 및 모선전압을 제약으로 고려하였다. 이 목적함수와 제약조건은 다중 목적함수로 변형하였고, 불확실(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 집합으로 모델링하였다. 특히, goal programming과 GA를 사용하여 다중 목적함수의 타협해를 얻을 수 있다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위하여 모델계통에 적용하였다.

2. 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 구간별선형함수(piecewise linear function)로 근사화한다.

2.1 목적함수

분산형전원의 설치 문제에 있어서 목적함수는 각 부하레벨에 대해 전력 손실비용의 합으로 구성한다.

$$Min. objective func. = K_e \sum_{i=1}^{n_i} T^i P_{loss}^i \quad (1)$$

여기서 K_e 는 : \$/KWh 단위의 에너지 비용계수이고, P_{loss}^i 는 부하레벨 i 에서 유효전력손실, T^i 는 부하레벨 i 동안의 지속시간이며, n_i 는 각 부하레벨의 수이다.

2.2 제약조건

조류 방정식

$$F^i(x_i, P_{G,k}^i) = 0 \quad (2)$$

여기서 $P_{G,k}^i$ 는 모선 k 에서 분산형전원의 크기, 즉 제어 변수이고 x 는 부하레벨 i 에 대한 상태변수이다.

문전제약 조건

$$V_{min}^i \leq V^i \leq V_{max}^i \quad (3)$$

여기서 V 는 모선전압크기, max와 min은 각 부하레벨 i 에서 상·하한 값이다.

분산형전원의 수 및 크기에 대한 제약

$$P_{G,k,min}^i \leq P_{G,k}^i \leq P_{G,k,max}^i \quad (4)$$

여기서 $P_{G,k}^i$ 는 부하수준 i 에서 모선 k 에 설치될 분산형전원의 수 또는 크기이다.

3. 분산형전원 설치를 위한 알고리즘

3.1 목적함수와 제약조건 Fuzzy 구성

배전계통의 전력손실 비용을 감소시키고 분산형전원의 수와 모선전압의 편차를 제약조건으로 고려하였다. 이 목적함수와 제약조건을 다중목적함수로 변형하였고, 부정확한 특성을 평가하기 위해 퍼지집합으로 전환하였다[5].

3.1.1 전력손실 비용 최소화

$$Max f_1(X) = K_e \sum_{i=1}^{n_i} T^i (P_{loss}^{i,0} - P_{loss}^{i,max}) \quad (10)$$

f_1 은 전력손실비용의 편차이며, $P_{loss}^{i,0}$ 와 $P_{loss}^{i,max}$ 는 분산형전원을 설치하기 전후의 부하레벨 i 에서 전력손실이다.

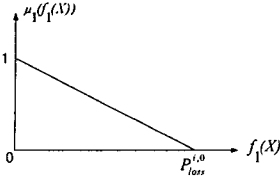


그림 1 전력손실비용의 최소화에 대한 멤버십함수

3.1.2 분산형전원의 수와 크기의 최소화

$$\text{Min } f_2(X) = \max_k |\Delta P_{G,k}^i|, k=1,2,\dots,N_G \quad (11)$$

여기서, $\Delta P_{G,k}^i = P_{G,k}^i - P_{G,k}^{i,\min}$, N_G 는 부하레벨 i 에서 분산형전원의 수이고, f_2 는 분산형전원의 수 또는 크기의 최대편차이다.

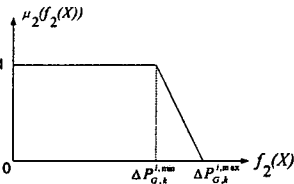


그림 2 분산형전원의 수 또는 크기의 최소화에 대한 멤버 함수

3.1.3 전압편차의 최소화

$$\text{Min } f_3(X) = \max_i |\Delta V_i|, i=1,2,\dots,N_L \quad (12)$$

여기서 $\Delta V_i = V_i - 1.0$, N_L 는 모선의 수이고 V_i 는 모선 i 에서의 전압, f_3 는 모선전압의 최대편차이다. 그림 6에서 max와 min은 전압편차의 상·하한치를 의미한다.

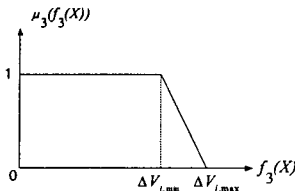


그림 3 전압편차의 최소화에 대한 멤버십 함수

퍼지 비선형 goal programming 해법의 주된 이론은 원래의 목적함수와 제약조건들을 퍼지이론을 이용하여 등가인 다중목적함수로 변형하여 부정확한 특성을 평가하는 것이다. 또한, 정식화된 비선형문제를 선형모델이나 다른 방법들을 이용하여 어떠한 변형 없이 GA를 사용하여 해를 구하는 것이다.

3.2 유전 알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 자연선택과 자연 유전학의 원리에 근거한 최적점탐색 알고리즘이다. GA는 최적화문제의 목적함수로부터 적합도를 구해 적합도에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것이다(6). 알고리즘 절차와 자세한 설명은 다음과 같다.

절차 1 초기화

각각의 부하레벨에 할당된 N 개의 개체군을 초기화시킨다. 각 개체군에서 유전자는 각 변수의 최대값과 최소값 범위내에서 임의로 발생시킨다.

절차 2 적합도 평가

N 개의 개체군에 대하여 각각의 개체의 유전자를 이용하여 배전계통 조류계산을 행한 후, 제약조건에 대하여

페널티함수를 적용하고, 식 (13)과 같이 적합도를 평가한다.

$$\text{Fitness func.} = \sum_{k=1}^3 \omega_k \mu_k(f_k(X)) \quad (13)$$

$$0 \leq \lambda_k \leq 1 \quad k = 1,2,3$$

절차 3 수렴판정

가. 최대세대이면, 종료

나. 아니면, 절차 4로 간다.

절차 4 개체의 스트링 조작

유전알고리즘의 복제, 교차 및 돌연변이 같은 유전작용자를 이용하여 각 개체를 향상시킨 후, 절차 2로 간다(8).

4. 사례연구

본 연구에서는 배전계통에 있어서 분산형전원의 최적 설치에 의한 손실감소 및 효율적인 운영을 위한 방안을 제시하였다. 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 12모선 11선로 모델계통에 적용하였다. 각각의 상수는 다음과 같다.

에너지 비용상수 $K_e = \$0.06/\text{kWh}$,

DGs의 설치 수 : 4

DGs의 용량 : 10, 20, 30, 40, 50

$\Delta P_{G,k}^{i,\min}$: DGs의 최소용량

$\Delta P_{G,k}^{i,\max}$: DGs의 설치 수 \times 50

$\Delta V_{i,\min}$: 0.03

$\Delta V_{i,\max}$: 0.05

Time period [h]: 8(9:00 ~ 17:00)

Year : 10

모델계통 데이터는 표 1과 2에 나타내었으며, 그림 4에 계통도를 나타내었다. 각 부하레벨에 따른 부하지속시간은 표 3에 나타내었다. 표 4는 제안한 알고리즘에 의하여 각 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 크기를 나타낸 것이다. 표의 결과로부터 모선 11과 12에 분산형전원이 설치될 필요가 있음을 알 수 있다. 모선 11에는 50kW 크기의 분산형전원이 설치되어 각 부하레벨에 대하여 가변적으로 동작하여야 한다. 즉, 110% 부하시 50kW가 전부 투입되어야 하고, 90%와 70% 부하의 경우는 분산형전원을 동작시킬 필요가 없다. 모선 12의 경우, 110%, 90% 및 70% 부하레벨에서 50kW가 전부 투입되어야 효율적임을 알 수 있다. 그림 8은 세대가 변화함에 따라 손실비용 및 페널티함수의 값의 변화를 나타낸 것이다.

표 1 12모선과 11분기선 시스템의 선로 데이터

Branch no.	Sending end	Receiving end	R (ohms)	X (ohms)
1	1	2	1.093	0.455
2	2	3	1.184	0.494
3	3	4	2.095	0.873
4	4	5	3.188	1.329
5	5	6	1.093	0.455
6	6	7	1.002	0.417
7	7	8	4.403	1.215
8	8	9	5.642	1.597
9	9	10	2.89	0.818
10	10	11	1.514	0.428
11	11	12	1.238	0.351

또한, 표 5에서는 분산형 전원의 설치 전과 후의 손실비용과 전압기기를 비교하여 나타내었다. V_{\max} , V_{ave} 와

V_{min} 는 분산형전원 설치 전 보다 상당히 개선되었고 각 부하레벨에서의 손실은 감소되었다.

이었으나, 설치 후에는 \$22,743.87가 되었고 결국 10년 간 \$7,554.55가 절약됨을 알 수 있다.



그림 4 12모선과 11선로 계통

표 2 12모선 시스템의 부하 데이터

Node no. of Receiving end	PL (kW)	QL (kVAR)
1	0	0
2	60	60
3	40	30
4	55	55
5	30	30
6	20	15
7	55	55
8	45	45
9	40	40
10	35	30
11	40	30
12	15	15

표 3 부하수준과 부하지속시간

Load Level(%)	110	90	70
Time interval(hours)	7300	14600	7300

표 4 시뮬레이션 결과

Total capacity of DGs [kW]	Load Level(%)	Bus no. 11	Bus no. 12
	110	50	50
	90	0	50
70	0	50	

표 5 분산형전원 설치 전후의 전압크기, 손실, 비용의 비교

Comparison between pre and post installation		
	Pre installation	Post installation
Load level - 110%		
V_{max}	0.9937	0.9984
V_{avr}	0.9654	0.9761
V_{min}	0.9367	0.9604
Sys. Loss[kW]	25.59	16.89
Load level - 90%		
V_{max}	0.9949	0.9954
V_{avr}	0.9720	0.9764
V_{min}	0.9488	0.9587
Sys. Loss[kW]	16.80	13.49
Load level - 70%		
V_{max}	0.9961	0.9964
V_{avr}	0.9784	0.9818
V_{min}	0.9606	0.9682
Sys. Loss[kW]	9.97	8.03
Total loss cost[\$] of 10 years	\$30,298.37	\$22,743.87

손실비용의 경우 분산형전원 설치 전에는 \$30,298.37

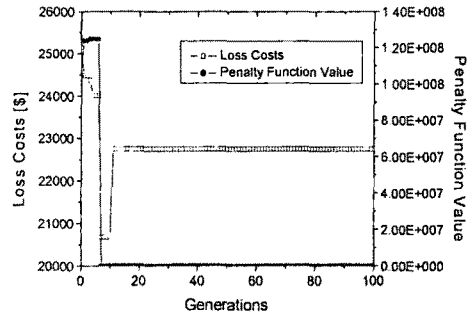


그림 5 손실비용과 페널티 함수값

5. 결론

본 연구에서는 방사상 배전계통에 있어서 fuzzy-GA를 이용하여 분산형전원을 설치하는 방안을 제시하였다. 배전계통의 효율적인 운전을 위하여 전력손실비용을 감소하기 위한 목적함수와 분산형전원의 수와 크기 및 모선 전압을 제약으로 고려하였다. 이 목적함수와 제약조건은 다중 목적함수로 변형하였고, 불확실(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 집합으로 모델링하였다. 특히, goal programming과 GA를 사용하여 계통 계획입안자는 다중 목적함수의 타협해 또는, 가장 만족스런 해를 얻을 수 있었다. 향후 연구로는 3상 불평형 배전계통에서 부하모형을 고려한 분산형전원 설치와 그 영향에 대하여 해석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [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] Griffin, T, Tomsovic, K, Secret, D and Law, A, "Placement of dispersed generations systems for reduced losses", System Sciences, 2000. Proceedings of the 3rd Annual Hawaii International Conference on, 2000, pp.1446-1454
- [3] Celli, G and Pilo, F, "Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks", 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 2001, pp.81-86.
- [4] Nara, K, Hayashi, Y, Ikeda, K and Ashizawa, T, "Application of tabu search to optimal placement of distributed generators", Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, IEEE, Vol. 2, pp.918-923
- [5] Gen, M, Ida, K and Kim, J, "Fuzzy goal programming using genetic algorithm, Evolutionary Computation", 1997, IEEE International Conference on, pp.413-418
- [6] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992