

복합배전계통에서 분산형전원의 설치 및 운영을 위한 Fuzzy-GA 응용

論文

52A-10-5

Fuzzy-GA Application for Allocation and Operation of Dispersed Generation Systems in Composite Distribution Systems

金圭浩* · 李有楨** · 李相奉** · 劉錫九**

(Kyu-Ho Kim, Yu-Jeong Lee, Sang-Bong Rhee, Seok-Ku You)

Abstract - This paper presents a fuzzy-GA method for the allocation and operation of dispersed generator systems(DGs) based on load model in composite distribution systems. Groups of each individual load model consist of residential, industrial, commercial, official and agricultural load. The problem formulation considers an objective to reduce power loss of distribution systems and the constraints such as the number or total capacity of DGs and the deviation of the bus voltage. The main idea of solving fuzzy 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 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 algorithm. The method proposed is applied to IEEE 12 bus and 33 bus test systems to demonstrate its effectiveness.

Key Words : Dispersed Generation Systems(DGs), Composite Distribution Systems, Multi-Objectives, DGs Installation, Fuzzy-GA, Fuzzy Goal Programming, Load Model

1. 서론

현재의 전력계통은 공조부하의 증대에 따른 부하율의 악화, 설비 이용률의 저하 그리고 화력발전소의 CO₂ 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 밀접해 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 연구에 대하여 살펴보면 Rau와 Wan은 배전계통에서 손실, 선로조류 및 무효전력 부하 등을 최소화하기 위한 2차알고리즘을 이용하여 분산형전원의 최적의 설치위치를 결정하는 방법을 제시하였다[2]. Griffin과 Tomsovic은 분산형전원 최적설치와 손실감소에 관한 알고리즘을 제시하였고, 특히 배전계통에서 분산형전원의 설치에 영향을 저항손실과 용량감소(capacity savings)에 관련 있음을 강조하였다[3]. Celli와 Pilo는 GA를 이용하여 계통

의 노드에서 피더용량의 한계, 전압분포와 3상 단락전류와 같은 기술적 제약을 고려하여 배전계통에 분산형전원 설치하는 새로운 알고리즘을 제안하였다[4]. Nara와 Hayashi는 손실 최소화의 관점으로부터 tabu search를 적용해 분산형전원을 설치하는 방법을 제시하였다[5]. 또한, 본 연구자들은 분산형전원의 설치에 의한 방사상 배전계통의 경제적인 운영을 위하여 전력손실을 감소하기 위한 목적함수와 분산형전원의 수 또는 총용량 및 모선전압을 제약조건으로 사용하였다[6].

본 연구에서는 이 목적함수와 제약조건을 다중 목적함수로 변형하여 각각에 대한 부정확한(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였으며, GA를 사용하여 다중 목적함수의 최적해를 얻을 수 있다.

또한, 배전계통 해석의 정확성을 높이기 위하여 부하모형을 고려한 분산형전원의 설치 및 운영을 위한 방안을 제시하였다. 부하모형은 가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하 등의 집단부하로 모형화를 한 후, 각각의 개별부하 구성비를 각 모선별로 구하여 부하특성을 산출하였다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위하여 모델계통에 적용하였다.

2. 조류계산

2.1 부하 모형

본 연구에서 고려한 부하모형은 가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하 등의 집단부하 모형화를 한 다음 이에 대한 부하구성비를 각 모선별로 취사설비, 백열조명, 형광조명, 텔레비전, 냉방설비, 난방설비, 선풍기, 냉장고, 펌프 그리고 다양한 정격의 유도전동기 등으로 구성하는 개별부하모형을 사용하였다. 각 개별부하 요소는 주입전류로 표현되

* 正會員 : 安山工科大学助教授·工博

** 正會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 教授·工博

接受日子 : 2003年 6月 30日

最終完了 : 2003年 9月 1日

는 전압 변동에 관한 4차 방정식으로 표현된다. 각 주입전류와 부하모형은 참고문헌 [7]과 [8]에 자세히 설명되어 있다. 전압의 증분 변화량에 의하여 유효전력과 무효전력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 각 집단부하모형에 대한 개별기기의 구성비율은 표 1에 나타내었다.

$$P_1 = P_0(a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta V^3 + e_p \Delta V^4)$$

$$Q_1 = Q_0(a_q + b_q \Delta V + c_q \Delta V^2 + d_q \Delta V^3 + e_q \Delta V^4) \quad (1)$$

여기서,

P_0, Q_0 : 기본전압에서의 유효·무효전력

P_1, Q_1 : 실제전압에서의 유효·무효전력

$a_p \dots e_p$: 개별부하에서 전압에 대한 P 의 상수

$a_q \dots e_q$: 개별부하에서 전압에 대한 Q 의 상수

표 1 집단부하모형의 개별기기 구성비율

Table 1 Composition rate of individual load model

부하군 구성[%]	가정용	산업용	상업용	사무용	농업용	
	Id = 2	Id = 3	Id = 4	Id = 5	Id = 6	
취사설비	22	0	0	0	0	
백열조명	6	2	4	6	4	
형광조명	10	7	31	25	4	
텔레비전	12	0	0	0	0	
냉방설비	5	0	18	27	0	
전열설비	0	10	0	0	6	
선 풍 기	4	2	0	0	0	
냉 장 고	29	0	0	0	0	
펌 프	5	0	0	0	10	
유도전동기	10kW미만	0	5	20	22	65
	10 - 100kW	0	60	15	8	10
	100-1000kW	0	9	8	0	0
	1,000kW이상	0	5	0	0	0
기 타	7	0	4	12	1	
합 계	100	100	100	100	100	

2.2 Distribution Power Flow(DistFlow)

배전계통은 송전계통과 달리 방사상으로 구성되어 있고 R/X의 값이 매우 크다. 따라서 송전계통에서의 조류계산 방법인 뉴턴-랩슨법이나 fast-decoupled 방법의 경우 배전계통에 적용할 경우 수렴하지 않는 경우가 발생하거나 수렴하더라도 반복계산이 많은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 방사상 평형배전계통의 조류계산 시간을 줄이기 위하여 각 모선에서 순차적으로 유효, 무효전력을 계산하여 손실을 간단히 구할 수 있는 DistFlow 방법을 이용하였다[9].

배전계통이 그림 1과 같이 방사상으로 구성된 n 모선 계통의 substation에서 공급되는 복소전력 S_0 을 알고 있는 경우 모선 1에서의 복소전력 S_1 과 전압 V_1 은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$S_1 = S_0 - S_{loss} - S_{L1} = S_0 - z_1 |S_0|^2 / V_0^2 - S_{L1}$$

$$V_1 < \theta_1 = V_0 - z_1 I_0 = V_0 - z_1 S_0^* / V_0 \quad (2)$$

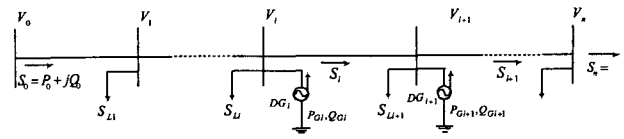


그림 1 방사상 배전계통

Fig. 1 Radial distribution system

순차적으로 나머지 모선에 대하여 적용하면 모든 모선에서의 전압 및 유효·무효전력조류를 계산할 수 있으며 분산형 전원을 고려할 경우 다음과 같이 계산된다.

$$P_{i+1} = P_i - r_{i+1}(P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 - P_{Li+1} + P_{Gi+1}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_{i+1}(P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 - Q_{Li+1} + Q_{Gi+1} \quad (3)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2$$

여기서,

P_i, Q_i : 모선 i 에서 $i+1$ 로 공급되는 유효·무효전력

V_i : 모선 i 의 전압크기

P_{Gi} : 모선 i 에서 분산형전원에 의해 공급되는 유효전력

Q_{Gi} : 모선 i 에서 분산형전원에 의해 공급되는 무효전력

3. 문제의 정식화

배전계통에 있어서 분산형전원의 설치 및 운영을 위하여 부하변동을 이산적으로 근사화시키고 부하는 일정하게 변화된다고 가정하여 부하지속곡선(load duration curve)을 구간별 선형함수(piecewise linear function)로 근사화하였다[10].

3.1 목적함수

분산형전원의 설치 문제에서 목적함수는 각 부하수준의 전력손실과 부하지속시간의 곱에 대한 누적함수로 식(4)와 같이 구성하였다.

$$Min. objective func. = \sum_{i=0}^{nt} T^i P_{loss}^i \quad (4)$$

여기서 P_{loss}^i 는 부하레벨 i 에서 유효전력손실, T^i 는 부하레벨 i 동안의 지속시간이며, nt 는 각 부하레벨의 수이다.

3.2 제약조건

3.2.1 조류 방정식

$$F^i(x^i, P_{G,k}^i) = 0 \quad (5)$$

여기서 $P_{G,k}^i$ 는 모선 k 에서 분산형전원의 크기, 즉 제어변수이고 x 는 전압크기와 같은 상태변수이다.

3.2.2 분산형전원의 수 또는 총용량에 관한 제약

$$P_{G,k,\min}^i \leq P_{G,k}^i \leq P_{G,k,\max}^i \quad (6)$$

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

3.2.3 운전제약 조건

$$V_{\min}^i \leq V^i \leq V_{\max}^i \quad (7)$$

여기서 V 는 모선전압크기, \max 와 \min 은 각 부하레벨 i 에서 전압의 상·하한 값이다.

4. 퍼지 비선형 Goal programming

Goal Programming은 다중목적함수의 해를 구할 수 있는 방법 중 하나이다. Goal Programming은 각 우선 수준에 대해 구체적인 목표를 수립하고 각 목적에 대해 목적함수를 구성한다. 그리고 각각의 목표와 이들 목적함수의 편차를 최소화하는 것이 기본 개념이다. 퍼지 비선형 Goal Programming 해법은 다수의 목적함수의 부정확한 특성을 퍼지이론에 의하여 비선형모델을 선형모델이나 다른 변환을 하지 않고 등가의 다중목적함수로 변환시켜 해를 구하는 것이다[11,12].

퍼지 Goal을 최소화하는 퍼지 비선형 Goal Programming의 전형적인 형식화는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_k(X) < \approx b_k, & \quad k=1,2,\dots,q_0 \\ f_k(X) > \approx b_k, & \quad k=q_0+1,\dots,q_1 \\ f_k(X) = \approx b_k, & \quad k=q_1+1,\dots,q_2 \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$g_i(X) \leq G_i, \quad i=1,2,\dots,m$$

여기서 X 는 n 차원의 결정 벡터이고, 심볼 $< \approx$ (fuzzy-min) 은 결정자가 어떤 여유한계에 내에서 기대치 b_k 보다 클지라도 만족하는 것을 의미하고, 심볼 $> \approx$ (fuzzy-max) 은 어떤 여유한계에 내에서 기대치 b_k 보다 작을지라도 만족하는 것을 의미한다. 또한, 심볼 $= \approx$ (fuzzy-equal) 은 어떤 여유한계 안에서 b_k 보다 크거나 또는 작아도 만족하는 것을 의미한다. $f_k(X)$ 는 k 번째 비선형 목표제약이고 $g_i(X)$ 는 i 번째 비선형 시스템 제약이다. b_k 는 목표 k 에 따른 도달 목표값이고, G_i 는 시스템 제약 i 의 한계이다. q_0 는 fuzzy-min 목표제약의 수이고 $q_1 - q_0$ 는 fuzzy-max 목표제약의 수이다. $q_2 - q_1$ 는 fuzzy-equal 목표제약의 수이고 m 은 시스템 제약의 수이다. 각각에 대한 멤버십 함수는 다음과 같이 정의된다.

fuzzy-min에 대해

$$\mu_k(f_k(X)) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_k(X) < b_k, \\ 1 - \frac{f_k(X) - b_k}{t_k^R} & \text{if } b_k \leq f_k(X) \leq b_k + t_k^R, \\ 0 & \text{if } f_k(X) > b_k + t_k^R \end{cases} \quad (9)$$

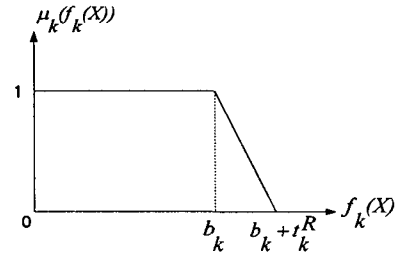


그림 2 fuzzy-min의 멤버십 함수
Fig. 2 The membership function of fuzzy-min

fuzzy-max에 대해

$$\mu_k(f_k(X)) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_k(X) < b_k + t_k^L \\ \frac{f_k(X) - (b_k + t_k^L)}{t_k^L} & \text{if } b_k + t_k^L \leq f_k(X) \leq b_k \\ 1 & \text{if } f_k(X) > b_k \end{cases} \quad (10)$$

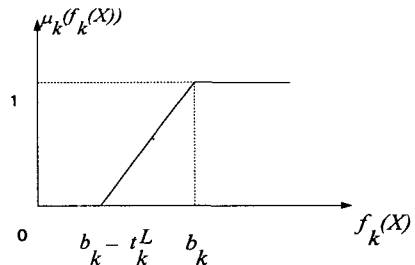


그림 3 fuzzy-max의 멤버십 함수
Fig. 3 The membership function of fuzzy-max

fuzzy-equal에 대해

$$\mu_k(f_k(X)) = \begin{cases} 0 & \text{if } f_k(X) < b_k - t_k^L \\ \frac{f_k(X) - (b_k - t_k^L)}{t_k^L} & \text{if } b_k - t_k^L \leq f_k(X) \leq b_k \\ 1 & \text{if } f_k(X) = b_k \\ 1 - \frac{f_k(X) - b_k}{t_k^R} & \text{if } b_k \leq f_k(X) \leq b_k + t_k^R \\ 0 & \text{if } f_k(X) > b_k + t_k^R \end{cases} \quad (11)$$

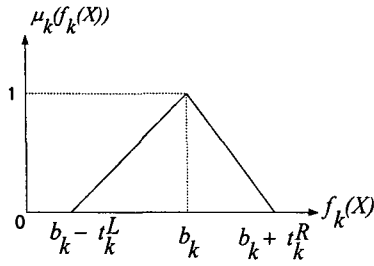


그림 4 fuzzy-equal의 멤버십 함수
Fig. 4 The membership function of fuzzy-equal

여기서 멤버십 함수는 단조감소(또는 증가)하고 $f_k(X)$ 에 대해 연속함수라고 가정한다. t_k^L 와 t_k^R 는 b_k 에 대한 허용 한계 최대치이다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^{q_2} \omega_k \mu_k(f_k(X)) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(X) \leq G_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & 0 \leq \mu_k(f_k(X)) \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, q_2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 ω_k 는 의사결정자에 의해 정해지는 가중치 요소이다.

5. 분산형전원의 설치 및 운영을 위한 알고리즘

5.1 목적함수와 제약조건의 멤버십 함수 변형

배전계통에서 분산형전원의 설치 및 운영을 위하여 전력손실 비용을 감소시키고 분산형전원의 수와 모선전압의 편차를 제약조건으로 고려하였다. 목적함수와 제약조건을 Fuzzy Goal Programming으로 전환하기 위하여 제약조건들을 목적함수로 변형하였고, 각각의 목적함수의 부정확한 특성을 퍼지 집합을 이용하여 멤버십 함수로 변환하였다. 또한, 정식화된 퍼지 멤버십 함수를 선형모델이나 다른 방법들을 이용하여 어떠한 변형 없이 GA를 사용하여 해를 구하는 것이다.

퍼지집합은 일반적으로 멤버십 함수로 나타내며 멤버십 함수의 값이 클수록 해가 보다 크게 만족된다. 결국, 멤버십 함수의 값이 증가함에 따라 각각의 목적함수의 최적해도 향상됨을 의미한다[11,12].

5.1.1 전력손실 최소화

$$\text{Max. } f_1(X) = \sum_{i=0}^{n_i} T^i |P_{loss}^{i,0} - P_{loss}^i| \quad (13)$$

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

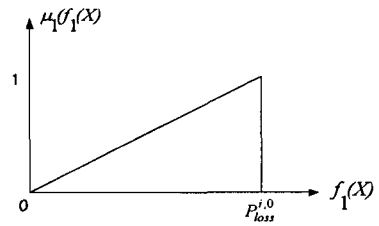


그림 5 전력손실의 최소화에 대한 멤버십 함수
Fig. 5 The membership function for the minimization of power loss

5.1.2 분산형전원의 설치 수 또는 총용량의 최소화

$$\text{Min. } f_2(X) = |\Delta P_G^i| \quad (14)$$

여기서, $\Delta P_G^i = P_G^i - P_{G,\min}^i$ 이고 $P_{G,\min}^i$ 는 0이다. f_2 는 분산형전원의 수 또는 총용량의 편차이다. 그림 6에서 $\Delta P_{G,\min}^i$ 과 $\Delta P_{G,\max}^i$ 는 계통내에 설치되는 분산형전원의 설치 수 또는 총용량에 대한 최소 및 최대 편차이다.

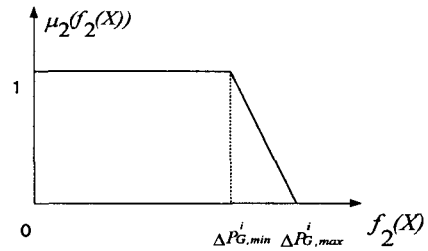


그림 6 분산형전원의 수 또는 총용량의 최소화에 대한 멤버십 함수
Fig. 6 The membership function for the minimization of the number or size of DGs

5.1.3 모선 전압편차의 최소화

$$\text{Min. } f_3(X) = \max |\Delta V_j| \quad j=1, 2, \dots, N_B \quad (15)$$

여기서 $\Delta V_j = 1.0 - V_j$ 이고 f_3 는 모선전압의 최대편차이다. V_j 는 모선 j 에서의 전압이며 N_B 는 계통모선의 수이다. 그림 7에서 $\Delta V_{j,\min}$ 와 $\Delta V_{j,\max}$ 는 모선 j 에서 전압의 최소 및 최대 편차이다.

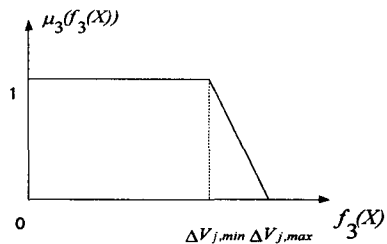


그림 7 전압편차의 최소화에 대한 멤버십 함수
Fig. 7 The membership function for the minimization of the deviation of voltage

목적함수 식 (13), (14) 및 (15)는 Goal Programming을 이용하여 식 (16)과 같이 나타낼 수 있으며, GA를 이용하여 다중목적함수의 부정확한 정보에 대한 타협해를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^3 \omega_k \mu_k(f_k(X)) \\ \text{s.t.} \quad & \\ & 0 \leq \mu_k(f_k(X)) \leq 1 \quad k = 1, 2, 3 \end{aligned} \tag{16}$$

5.2 유전 알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 자연선택과 자연 유전학의 원리에 근거한 강력한 탐색 알고리즘이다[13]. GA는 최적화문제의 목적함수로부터 적합도를 구해 적합도에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것이다. GA는 미분계수나 다른 보조지식을 필요로 하지 않으며 이 알고리즘의 절차는 다음과 같다.

절차 1 초기화

각각의 부하레벨에 할당된 N개의 개체군을 초기화시킨다. 그림 8과 같이 각 부하레벨에 해당하는 sub-population으로 구성한 것이다. 각 부하레벨에 할당된 sub-population N 개를 초기화 하고, N 개의 sub-population에서 각각의 유전자는 각 변수의 최대값과 최소값 사이에서 임의로 발생시킨다. 각각의 개체(individual)는 분산형전원을 설치할 모선의 위치와 용량으로 구성하였다.

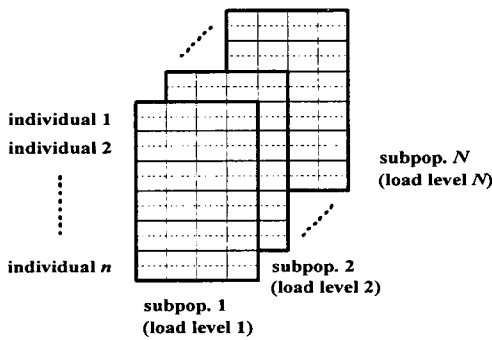


그림 8 다중 개체군 Fig. 8 Multi-population

절차 2 적합도 평가

N개의 sub-population에서 개체의 유전자를 이용하여 배전계통 조류계산을 행한 후 식 (16)을 식 (17)과 같이 변형하여 적합도를 평가한다.

$$Fitness\ func. = \sum_{k=1}^3 \omega_k \mu_k(f_k(X)) \tag{17}$$

절차 3 수렴판정

최대세대이면 종료하고 그렇지 아니면, 절차 4로 간다.

절차 4 개체의 스트링 조작

유전알고리즘의 복제, 교차 및 돌연변이 같은 유전작용자 [13]를 이용하여 각 개체를 향상시킨 후, 절차 2로 간다.

6. 사례연구

본 연구에서는 배전계통에 있어서 분산형전원의 최적설치에 의한 손실감소 및 효율적인 운전을 위한 방안을 제시하였다. 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 IEEE 12 모선 및 33 모선 계통에 적용하였다.

정확한 배전계통 해석에 의한 효과적인 분산형전원의 설치 및 운영을 위하여 다음과 같이 집단부하별로 각각의 개별부하의 전압특성 영향을 나타내는 부하모델을 고려하였다. 집단부하 모델그룹은 가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하로 구성하였으며 각 부하는 취사설비, 백열조명, 형광조명, 텔레비전, 냉방설비, 난방설비, 선풍기, 냉장고, 펌프 그리고 다양한 정격의 유도전동기 등으로 구성하였다. 집단부하 모형의 개별기기 구성비율은 표 1에 나타내었다.

- Case 1 : 모선부하는 부하모델을 고려하고, 분산형전원의 유·무효전력 출력은 부하레벨에 따라 제어가 가능하다.
- Case 2 : 모선부하는 부하모델을 고려하지 않는 PQ 일정부하이고, 분산형전원의 유·무효전력 출력은 부하레벨에 따라 제어가 가능하다.
- Case 3 : 모선부하는 부하모델을 고려하고, 분산형전원의 유효전력 출력만 부하레벨에 따라 제어가 가능하고, 무효전력 출력은 무시한다.
- Case 4 : 모선부하는 부하모델을 고려하지 않는 PQ 일정부하이고, 분산형전원의 유효전력 출력만 부하레벨에 따라 제어가 가능하고, 무효전력 출력은 무시한다.

6.1 Test System - 12 모선

- 12 모선 계통에 사용된 상수는 다음과 같다.
- DGs의 용량[kW]: 10, 20, 30, 40, 50
- $\Delta P_{G, min}^i$: 1개, 10[kW](Total capacity)
- $\Delta P_{G, max}^i$: 6개, 300[kW](Total capacity)
- $\Delta V_{j, min}$: 0.04[p.u.]
- $\Delta V_{j, max}$: 0.15[p.u.]
- Time period [h]: 8(9:00 ~ 17:00)
- Test years: 10

12 모선 계통도와 데이터는 그림 8과 표 2에 각각 나타내었다[14]. 표 2에서 Model Id는 표 1의 집단부하에 대한 부하군을 의미한다. 각 부하레벨에 따른 부하지속시간은 표 3에 나타내었다. 표 4와 5는 분산형전원 설치 및 운영을 위한 목적함수와 제약조건을 4장과 5장에서 제시한 퍼지 Goal Programming을 이용하여 변형하였고 유전알고리즘을 이용하여 각 Case 별로 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 크기를 결정한 것이다. 표 4의 Case 1과 Case 2를 표 5의 Case 3과 Case 4와 비교해 보면, 부하모형의 고려와 상관없이 유·무효전력 출력을 부하변동에 따라 제어한 경우(모선

10과 11)와 유효전력 출력만을 제어한 경우(모선 10, 11과 12)에 있어서 분산형전원의 설치 수에 있어서 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 설치될 분산형전원의 무효전력 출력을 제어 할 수 있는 경우에 무효전력출력의 영향을 받아 설치 수에 영향을 미치고 경제적으로 계통을 운전할 수 있다는 것을 의미한다.

substation

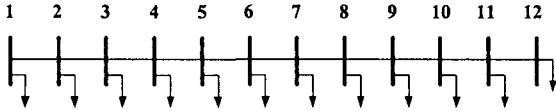


그림 8 방사상 12 모선 계통
Fig. 8 Radial 12 bus system

표 2 12 모선 계통의 부하 및 선로 데이터

Table 2 Load and Line Data of 12 Bus System

Sending End Bus	Receiving End Bus	R[Ω]	X[Ω]	Receiving End Bus Load		
				Model Id	PL [kW]	QL [kVAR]
1	2	1.093	0.455	2	60	60
2	3	1.184	0.494	5	40	30
3	4	2.095	0.873	3	55	55
4	5	3.188	1.329	2	30	30
5	6	1.093	0.455	4	20	15
6	7	1.002	0.417	3	55	55
7	8	4.403	1.215	3	45	45
8	9	5.642	1.597	3	40	40
9	10	2.890	0.818	4	35	30
10	11	1.514	0.428	3	40	30
11	12	1.238	0.351	5	15	15

표 3 부하수준과 부하지속시간

Table 3 Load Level and Load Duration Time

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

또한, 부하모형을 고려한 Case 1과 Case 3은 부하모형을 고려하지 않은 Case 2와 Case 4 보다 분산형전원의 총용량에 있어 용량이 비교적 적다는 것을 알 수 있다. 이것은 표 6과 7에서 알 수 있듯이 Case 1과 Case 3에서 유도전동기와 같은 다양한 산업용 부하의 영향을 받아 모선전압이 상대적으로 부하모형을 고려하지 않은 Case 2와 Case 4 경우 보다 높기 때문이다. 결국, 최대 및 최소편차 $\Delta V_{j,max}$ 와 $\Delta V_{j,min}$ 의 영향을 받아 부하모형을 고려하는 경우는 부하모형을 고려하지 않는 경우 보다 전반적으로 계통전압이 높고 계통손실이 적기 때문에 설치될 분산형 전원의 용량이 적어도 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 배전계통의 정확한 해석을 위하여 부하모형을 고려하는 것이 분산형전원의 설치 및 운영에 있어서 계통의 실제적인 특성을 반영한 것이라 사료된다.

표 4 분산형전원의 설치 위치(Case 1과 Case 2)

Table 4 Placement Location of DGs(Case 1 and Case 2)

Optimal location	Case 1 [kW]			Case 2 [kW]		
	110%	90%	70%	110%	90%	70%
10	50	30		50	40	
11	50	50	50	50	50	50
Total	100	80	50	100	90	50

표 5 분산형전원의 설치 위치(Case 3과 Case 4)

Table 5 Placement Location of DGs(Case 3 and Case 4)

Optimal location	Case 3 [kW]			Case 4 [kW]		
	110%	90%	70%	110%	90%	70%
10	50	50		40		
11	50	50	40	50	50	50
12	20			40	40	
Total	120	100	40	130	90	50

표 6 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교

Table 6 Comparison of Voltage Magnitude and Loss between Without and With DGs Placement

	Load level	Case 1		Case 2	
		Without DGs	With DGs	Without DGs	With DGs
Real power losses [kW]	110%	172,015	72,772	184,742	75,724
	90%	228,731	99,166	242,622	102,570
	70%	68,772	35,732	72,026	36,860
Total losses [kW]		469,519	207,671	499,390	215,156
V_{min} [p.u.]	110%	0.9396	0.9663	0.9373	0.9657
	90%	0.9508	0.9722	0.9493	0.9716
	70%	0.9619	0.9755	0.9610	0.9751
V_{ave} [p.u.]	110%	0.9642	0.9776	0.9630	0.9771
	90%	0.9708	0.9815	0.9700	0.9811
	70%	0.9774	0.9841	0.9769	0.9838
V_{max} [p.u.]	110%	0.9939	0.9953	0.9937	0.9952
	90%	0.9950	0.9961	0.9949	0.9960
	70%	0.9961	0.9968	0.9961	0.9968

또한, 표 6과 7에서 분산형 전원의 설치 전과 후의 계통손실과 전압크기를 비교하여 나타내었다. 계통손실의 경우 Case 1에서는 분산형전원 설치 전에는 469,519[kW]이었으나 설치 후에는 207,671[kW]가 되었고, 결국 테스트 기간을 10년으로 하였을 때 261,848[kW]가 감소된다는 것을 알 수 있다. V_{min} , V_{ave} 와 V_{max} 는 분산형전원 설치 전 보다 상당히 향상되었고, V_{min} 은 부하레벨 110%와 90%에서 전압크기의 제약을 0.96을 기준으로 하였을 때 분산형전원을 설치 후에 있어서 제약을 모두 만족한다는 것을 알 수 있다. Case 2, Case 3 및 Case 4에서도 유사한 결과를 나타내고 있다.

표 7 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교
 Table 7 Comparison of Voltage Magnitude and Loss between Without and With DGs Placement

	Load level	Case 3		Case 4	
		Without DGs	With DGs	Without DGs	With DGs
Real power losses [kW]	110%	172,015	114,394	184,742	117,967
	90%	228,731	151,061	242,622	161,181
	70%	68,772	54,548	72,026	53,281
Total losses [kW]		469,519	320,004	499,390	332,430
V_{min} [p.u.]	110%	0.9396	0.9632	0.9373	0.9628
	90%	0.9508	0.9702	0.9493	0.9682
	70%	0.9619	0.9699	0.9610	0.9715
V_{ave} [p.u.]	110%	0.9642	0.9756	0.9630	0.9753
	90%	0.9708	0.9803	0.9700	0.9792
	70%	0.9774	0.9812	0.9769	0.9819
V_{max} [p.u.]	110%	0.9939	0.9950	0.9937	0.9949
	90%	0.9950	0.9959	0.9949	0.9958
	70%	0.9961	0.9965	0.9961	0.9966

6.2 Test System - 33 모선

33 모선 계통에 대한 계통도는그림 9에 나타내었다[15]. 사용된 상수는 다음과 같고 나머지는 12 모선 계통에서 사용한 상수와 같다. 또한, 부하레벨의 경우 침두부하는 기준부하의 100% 부하를 사용하였다.

- DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150
- $\Delta P_{G,min}^i$: 1개, 30[kW](Total capacity)
- $\Delta P_{G,max}^i$: 10개, 1,500[kW](Total capacity)
- $\Delta V_{j,min}$: 0.05[p.u.]
- $\Delta V_{j,max}$: 0.15[p.u.]

표 8과 9는 분산형전원 설치 및 운영을 위한 목적함수와 제약조건을 12 모선 계통의 경우와 같이 퍼지 Goal Programming을 이용하여 변형하였고 유전알고리즘을 이용하여 각 Case 별로 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 크기를 결정 한 것이다. 표 8의 Case 1과 Case 2를 표 9의 Case 3과 Case 4와 비교해 보면, 부하모형의 고려와 상관없이 유·무효전력 출력을 부하변동에 따라 제어한 경우와 유효전력 출력만을 제어한 경우에 있어서 유효전력 출력만을 제어할 때 분산형전원을 많이 설치해야 함을 알 수 있다. 이것은 12 모선의 결과처럼 설치될 분산형전원의 무효전력 출력을 제어 할 수 있는 경우에 무효전력출력의 영향을 받아 설치 수에 영향을 미치고 경제적으로 계통을 계획 및 운전할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 부하모형을 고려한 Case 1과 Case 3은 부하모형을 고려하지 않은 Case 2와 Case 4 보다 분산형전원의 총용량에 있어 용량이 비교적 적다는 것을 알 수 있다. 이것은 다양한 정격의 유도전동기와 같은 부하의 구성비율이 높은 산업용 및 농업용 부하의 영향 때문이며, 결국 배전계통의 정확한 해석을 위하여 부하모형을 고려하는 것이 분산형전원의 설치 및 운영에 있어서 계통의 실제적인 특성을 반영한 것이라 사료된다.

또한, 표 10과 11에서 분산형 전원의 설치 전과 후의 계통 손실과 전압크기를 비교하여 나타내었다. 계통손실의 경우 Case 1에서는 테스트 기간을 10년으로 하였을 때 분산형전원 설치 후에 2,384,000[kW]가 감소된다는 것을 알 수 있다. V_{min} , V_{ave} 와 V_{max} 는 분산형전원 설치 전 보다 상당히 향상되었고, V_{min} 은 부하레벨 100%, 90% 그리고 70%에서 전압크기의 제약을 0.95를 기준으로 하였을 때 분산형전원을 설치 후에 있어서 제약을 모두 만족한다는 것을 알 수 있다. Case 2, Case 3 및 Case 4에서도 유사한 결과를 나타내고 있다.

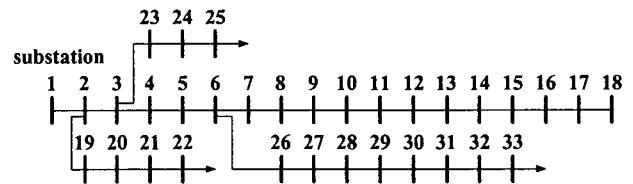


그림 9 방사상 33 모선 계통
 Fig. 9 Radial 33 bus system

표 8 분산형전원의 설치 위치(Case 1과 Case 2)
 Table 8 Placement Location of DGs(Case 1 and Case 2)

Optimal location	Case 1 [kW]			Case 2 [kW]		
	100%	90%	70%	100%	90%	70%
14	150	150	150	120		
15				90		
16				150	150	150
17	90			150	150	
18	120	120				
30	150	120				
31	150	150		150	150	
32	90			150	150	
33	150	150	150	150	150	150
Total	900	690	300	960	750	300

표 9 분산형전원의 설치 위치(Case 3과 Case 4)
 Table 9 Placement Location of DGs(Case 3 and Case 4)

Optimal location	Case 3 [kW]			Case 4 [kW]		
	100%	90%	70%	100%	90%	70%
13	60			150		
14	90	120		120		
15	120	150				
16	150	150	150	150	150	
18				150	150	120
29				90		
30	150			120	90	
31	150	150		150	150	
32	150	150		150	150	
33	150	150	150	150	150	150
Total	1,020	870	300	1,230	840	270

표 10 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교
Table 10 Comparison of Voltage Magnitude and Loss between Without and With DGs Placement

	Load level	Case 1		Case 2	
		Without DGs	With DGs	Without DGs	With DGs
Real power losses [kW]	100%	1,340,293	478,780	1,479,409	475,108
	90%	2,158,100	876,718	2,359,814	858,170
	70%	645,858	404,753	692,824	424,492
Total losses [kW]		4,144,252	1,760,252	4,532,049	1,757,771
V_{min} [p.u.]	100%	0.9183	0.9627	0.9131	0.9617
	90%	0.9267	0.9631	0.9224	0.9645
	70%	0.9432	0.9595	0.9407	0.9584
V_{ave} [p.u.]	100%	0.9511	0.9749	0.9485	0.9779
	90%	0.9561	0.9747	0.9540	0.9761
	70%	0.9661	0.9743	0.9648	0.9738
V_{max} [p.u.]	100%	0.9971	0.9979	0.9970	0.9980
	90%	0.9974	0.9981	0.9973	0.9981
	70%	0.9980	0.9983	0.9980	0.9982

표 11 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교
Table 11 Comparison of Voltage Magnitude and Loss between Without and With DGs Placement

	Load level	Case 3		Case 4	
		Without DGs	With DGs	Without DGs	With DGs
Real power losses [kW]	100%	1,340,293	734,382	1,479,409	723,543
	90%	2,158,100	1,264,272	2,359,814	1,370,404
	70%	645,858	501,486	692,824	543,109
Total losses [kW]		4,144,252	2,500,141	4,532,049	2,637,057
V_{min} [p.u.]	100%	0.9183	0.9503	0.9131	0.9519
	90%	0.9267	0.9524	0.9224	0.9508
	70%	0.9432	0.9532	0.9407	0.9515
V_{ave} [p.u.]	100%	0.9511	0.9686	0.9485	0.9698
	90%	0.9561	0.9699	0.9540	0.9679
	70%	0.9661	0.9709	0.9648	0.9695
V_{max} [p.u.]	100%	0.9971	0.9978	0.9970	0.9978
	90%	0.9974	0.9979	0.9973	0.9979
	70%	0.9980	0.9982	0.9980	0.9981

7. 결 론

본 연구에서는 배전계통에서 분산형 전원의 설치 및 운영에 대한 새로운 방안을 제시하였다.

배전계통 해석의 정확성을 높이기 위하여 부하모형을 고려하였다. 부하모형은 가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 부하 등의 집단부하로 모형화를 한 후, 각각의 개별부하 구성비를 각 모선별로 취사설비, 백열조명, 형광조명, 텔레비전, 냉방설비, 난방설비, 선풍기, 냉장고, 펌프 그리고 다양한 정격의 유도전동기 등으로 구성하는 개별부하 모형을 사용하였다. 부하모형을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 있어서 분산형전원의 설치 수 및 총용량은 크게 차이가 났으며,

이것은 유도전동기와 같은 부하의 구성비율이 높은 산업용 및 농업용 부하의 영향 때문이라는 것을 알 수 있다. 따라서 분산형전원의 설치 및 운영에 있어서 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 영향을 반영하는 것이라 사료된다.

또한, 효율적인 분산형전원의 설치 및 운영을 위하여 전력 손실, 분산형 전원의 설치 수 또는 총용량 및 각 모선전압에 대한 불확실(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였고, GA를 사용하여 최적해를 얻을 수 있었다.

향후 연구로는 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] N. S. Rau and Y. H. Wan, "Optimum Location of Resources in Distributed Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp.2014-2020, Nov. 1994
- [3] 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, pp.1446-1454, 2000
- [4] G. Celli, and F. Pilo, "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks", 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference, pp.81-86, 2001
- [5] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda and T. Ashizawa, "Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, pp.918-923, 2001
- [6] K. H. Kim, Y. J. Lee, S. B. Rhee, S. K. Lee and S. K. You, "Dispersed Generator Placement using Fuzzy-GA in Distribution", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp.1148-1153, 2001
- [7] 황갑주의 2인, "배전계통 해석을 위한 모형개발", 대한전기학회 논문지, 제42권, 제5호, pp42-51, 1993
- [8] 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
- [9] H. D. Chiang, and M. E. Baran, "On the Existence and Uniqueness of Load Flow Solution for Radial Distribution Power Networks," IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 37, No. 3, pp.410-416, March, 1990
- [10] 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

- [11] M. Gen, K. Ida and J. Kim, "Fuzzy Goal Programming using Genetic Algorithm", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp.413-418, 1997
- [12] Y. T. Hsiao and C. Y. Chen, "Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems using a Combination Fuzzy-GA Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. pp.1394-1404, 2000
- [13] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [14] D. Das, H. S. Nagi, and D. P. Kothari, " Novel method for Solving Radial Distribution Network," IEE Proceeding of Generation Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 4, pp.291-298, July, 1994
- [15] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon and M. I. Buhari, "A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks," International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp.251-256, 2000

저 자 소 개



김규호 (金圭浩)
 1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 안산공과대학 전기과 조교수
 E-mail : kyuh@ansantc.ac.kr



이유정 (李有楨)
 1962년 7월 24일생. 1986년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 2000년 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료
 E-mail : leeyjeong@ihanyang.ac.kr



이상봉 (李相奉)
 1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료
 E-mail : rrsd@ihanyang.ac.kr



유석구 (劉錫九)
 1938년 10월 31일생. 1961년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 1996년 당학회 회장
 E-mail : skyou@mail.hanyang.ac.kr