부하불평형 및 부하모형을 고려한 복합배전계통의 분산형전원의 연계 방안

論 文
53A-5-3

Interconnection of Dispersed Generation Systems considering Load Unbalance and Load Model in Composite Distribution Systems

李 有 楨* · 金 圭 浩** · 李 尙 根*** · 劉 錫 九§
(Yu-Jeong Lee · Kyu-Ho Kim · Sang-Keun Lee · Seok-Ku You)

Abstract - This paper presents a scheme for the interconnection of dispersed generator systems(DGs) based on load unbalance and load model in composite distribution systems. Groups of each individual load model consist of residential, industrial, commercial, official and agricultural load. The unbalance is involved with many single-phase line segment. Voltage profile improvement and system loss minimization by installation of DGs depend greatly on how they are placed and operated in the distribution systems. So, DGs can reduce distribution real power losses and replace large-scale generators if they are placed appropriately in the distribution systems. 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 13 bus and 34 bus test systems to demonstrate its effectiveness.

Key Words : Dispersed Generation Systems(DGs), DGs Interconnection, Fuzzy Goal Programming, Load Model, Voltage Profile Improvement, system loss minimization

1. 서 론

최근 미국 북동부, 캐나다 및 영국의 런던에서 대규모 정전으로 시가지가 마비되는 사태가 발생하였고, 말레이시아에서도 전선문제로 정전사태가 발생하였다. 실제로 지난 10년간 전 세계 곳곳에서 수백만 가구 수준의 대규모 정전사태를 겪은 바 있다. 이와 같은 전기공급의 중단은 경제적 손실뿐만 아니라 수도 및 가스공급 중단, 냉·난방 중단 전산망과 통신이 단절되고, 치안 불안 야기 등 국가, 사회적으로 총체적인 마비현상을 일으킨다. 이들 정전의 근본적이고 중요한 문제점은 충분한 예비용량(reserve capacity)을 확보하지 못한 점과 전력분야에 대한 연구투자 및 설비투자가 부족했다는 점이다. 뉴욕 정전의 경우 금융기관, 관공서, 경찰서 등에 설치된 태양전지(Photovoltaic Cell), 연료전지(Fuel Cell), 전지전력저장시스템(Battery Energy Storage Systems : BESS), 열병합발전(Cogeneration) 등과 같은 분산형전원(Dispersed Generation Systems : DGs)이 혼란의 확산을 막는데 결정적 역할을 하였다.

분산형전원은 부하 측에 가까운 위치상의 이점으로 인해 전력손실을 줄일 수 있으며, 변전소나 배전설비, 송전설비에 대한 투자를 지연시킬 수 있다. 또한, 자체기동용량과 순동예비력을 확보할 수 있는 장점이 있어 전력계통의 효율적 운용방안의 하나로 관심이 더욱 높아지고 있으며, 분산형전원의 도입은 대도시권에 있어서는 전력수급의 지역간불평형 및 전력수급의 문제를 완화할 수 있다[1-3].

따라서, 배전계통에서 분산형전원(DG)의 설치 위치 및 운전 방법에 따라 전압의 분포와 계통손실은 크게 영향을 받을 수 있으므로 분산형전원의 설치 위치와 용량을 결정하는 것은 배전계통의 효율적인 운영에 매우 중요하다[1-5].

실제의 배전계통의 부하구성 분포는 상업용 및 산업용 부하에 단상 또는 3상 불평형 부하이고, 보통 연가를 하지 않기 때문에 각 상의 파라메타는 불평형이다. 따라서 송전계통과 달리 3상으로 다루어야 더욱 정확한 해석을 할 수 있다.

분산형전원의 설치 및 운전에 관한 연구동향을 살펴보면 Rau와 Wan은 배전계통에서 손실, 선로조류 및 무효전력 부하 등을 최소화하기 위한 2차 알고리즘을 이용하여 분산형전원의 최적의 설치 위치를 결정하는 방법을 제시하였다[2]. 이 연구에서는 분산형전원의 효용성을 최대로 하기 위하여 계통손실, 무효전력손실 등을 목적함수로 사용하였으며 reduced gradient method의 수렴이 잘 되지 않는 점을 지적하였고, 제안한 방법에 의해 최적해로 빠르게 수렴함을 강조하였다. Griffin과 Tomsovic은 분산형전원의 최적설치와 손실감소에 관한 알고리즘을 제시하였고, 특히 배전계통에서 분산형전원의 설치는 저항손실과 용량감소(capacity savings)에 관련 있음을 강조하였다[3]. 그러나 분산형전원의 위치의 결정에 있

* 正 會 員 : 靑園高等學校 敎師 · 工博
** 正 會 員 : 安山工科大學 副敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 原州大學 副敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 漢陽大學校 電氣工學科 名譽敎授 · 工博
接受日子 : 2004年 2月 9日
最終完了 : 2004年 3月 29日

어 송전선로 및 배전선로의 영향을 고려하지 않았다. Celli와 Pilo는 유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)을 이용하여 계통의 모선에서 피더용량의 한계, 전압분포와 3상 단락전류와 같은 기술적 제약을 고려하여 배전계통에 분산형전원을 설치하는 새로운 알고리즘을 제안하였다[4]. 네트워크의 건설비용, 운용비용 및 손실비용과 같은 전체운용비용을 목적함수로 사용하여 계통의 중장기 성장률 등을 고려하였으나, 계통연계형 분산형전원을 다양하게 고려하지 않았다. Nara와 Hayashi는 손실 최소화의 관점으로부터 Tabu Search(TS)를 적용해 분산형전원을 설치하는 방법을 제시하였으며 Simulated Annealing(SA)과도 비교하여 TS방법의 우수성을 입증하였으며, 부하모형을 고려하기 위하여 각각의 피더를 가정용, 상업용, 산업용 등으로 구분하였다[5]. 또한, 본 연구자들은 분산형전원의 설치에 의한 방사상 배전계통의 경제적인 운전을 위하여 전력손실을 감소하기 위한 목적함수와 분산형전원의 수 또는 총용량 및 모선전압을 제약조건으로 사용하였다[6].

지금까지 언급한 여러 연구들은 분산형전원을 설치하는데 있어 분산형전원을 설치할 계통의 모든 모선을 후보모선으로 결정하거나, 분산형전원 설치에 대한 전력손실의 감도를 이용하여 감도가 큰 모선 중에서 몇 개의 모선을 후보모선으로 지정하여 gradient 방법, GA, TS, SA 등과 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 분산형전원의 설치위치와 설치될 용량을 결정하였다. 그러나 모든 모선을 분산형전원을 설치할 후보모선으로 선정하는 방법은 최적화 알고리즘에 의해서 탐색할 공간을 너무 크게 설정하게 되어 탐색시간이 너무 많이 소요되며, 또한 감도에 의하여 후보모선을 일부의 모선 몇 개로 한정하는 것은 계통상황의 변동에 적합하지 않다. 계통의 부하레벨이 변화하면 미리 정해진 수보다 많아질 수도 있고 적어질 수도 있기 때문이다. 따라서 탐색공간의 크기를 줄이면서 계통상황 변동에 적합한 정식화 및 알고리즘을 응용할 필요가 있다. 이러한 계통상황 변동 및 부정확한 성질(imprecise)은 퍼지집합 이론을 적용하여 해결할 수 있다[7].

본 연구에서는 단상 또는 3상 불평형 부하로 구성되어 있는 배전계통에 대하여 실제 부하구성 분포인 상업용 및 산업용 부하 등의 부하모형을 고려하여 분산형전원의 계통 연계 방안을 제시하였다. 또한, 목적함수로는 계통 유효전력손실을 사용하였고 분산형전원의 수 또는 총용량 및 모선전압을 제약조건으로 사용하였다. 이 목적함수와 제약조건을 다중 목적함수로 변형하여 각각에 대한 부정확한(imprecise) 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였으며, GA를 사용하여 최적해를 탐색하였다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위하여 불평형이 잘 반영된 IEEE 13 모선 및 34 모선 계통에 적용하였다. 또한, 기존의 GA를 사용한 몇 개의 방법과 실행 결과를 비교하여 본 논문에서 사용한 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

2. 3상 조류계산

부하 불평형을 반영하기 위하여 3상 조류계산 방법으로 대칭좌표법으로 선로, 병렬커패시터 및 리액터, 변압기, 부하와 같은 제반 설비와 해석 모형을 하는 대신 상좌표계로 표현하여 계통조류와 전압 등을 계산한다. 계통 내 요소모델의 수학적 표현과 해법절차는 참고문헌 [8,9]에 상세히 제시되어 있으며, 본 논문에서는 부하모형과 해법절차만 간단히 설명하였다.

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 개별부하 모형을 사용하였다. 각 개별부하 요소는 주입전류로 표현되는 전압 변동에 관한 4차 방정식으로 식 (1)과 같이 나타내었다. 이식은 전압의 증분 변화량에 의하여 유효전력과 무효전력을 표현한 것이다. 각 상수는 개별부하의 전압에 대한 유·무효전력의 특성을 의미한다. 각 주입전류와 부하모형은 참고문헌 [10]에 자세히 설명되어 있다. 각 집단부하모형에 대한 개별기기의 구성비율은 표 1에 나타내었다.

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0(a_p + b_p\Delta V + c_p\Delta V^2 + d_p\Delta V^3 + e_p\Delta V^4) \\ Q_1 &= Q_0(a_q + b_q\Delta V + c_q\Delta V^2 + d_q\Delta V^3 + e_q\Delta V^4) \end{aligned} \quad (1)$$

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

표 1. 집단부하모형의 개별기기 구성비율

Table 1. Composition rate of individual load model

구성[%] \ 부하군		가정용 Id = 2	산업용 Id = 3	상업용 Id = 4	사무용 Id = 5	농업용 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 3상 조류계산 순서도

본 논문에서는 3상 조류계산을 위하여 Z_{BUS} 를 이용한 가

우스 해법을 사용하였다. Z_{BUS} 가우스 방법은 전력방정식의 반복적 해를 구하기 위하여 계통내 구성요소의 축약 Y_{BUS} 행렬과 이와 관계된 등가 주입전류를 이용하는 방법이다[8].

Z_{BUS} 를 이용한 방법은 해를 결정하는데 빠른 수렴율과 적은 메모리를 필요로 하는 특징을 갖고 있으며, 특히 수렴성은 계통내의 전압 지정 모선의 수에 크게 영향을 받는다. 따라서 일반적으로 전압 지정 모선을 하나만 정해서 구성된 배전계통에서는 Z_{BUS} 가우스 방법이 최선의 해법으로 사용되어 진다. 그림 1은 이러한 Z_{BUS} 가우스 방법의 3상 조류계산 알고리즘 순서도 이다.

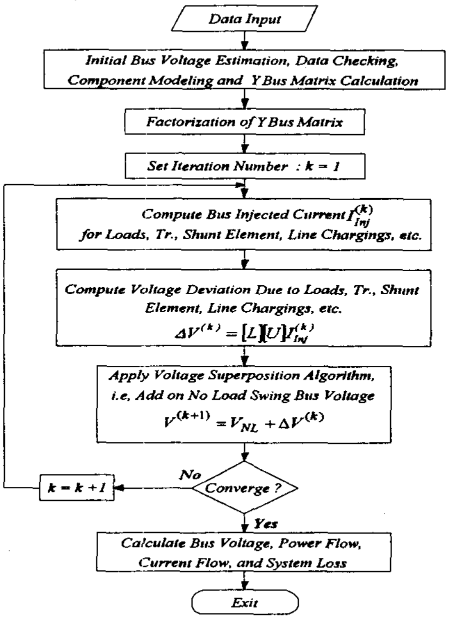


그림 1 3상 조류계산 알고리즘 흐름도
Fig. 1 Flowchart for Three-Phase Power Flow Algorithm

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[6].

3.1 목적함수

분산형전원의 설치 문제에서 목적함수는 각 부하레벨의 전력손실과 부하지속시간의 곱에 대한 누적합으로 식 (2)와 같이 구성하였다. 분산형전원의 설치위치와 용량에 계통 유효전력손실은 크게 영향을 받기 때문에 중요한 지표가 될 수 있다.

$$Min.objective\ func. = \sum_{i=1}^{nt} T^i P_{loss}^i \qquad (2)$$

여기서 P_{loss}^i는 부하레벨 i에서 유효전력손실, T^i는 부하레벨 i 동안의 지속시간이며, nt는 각 부하레벨의 수이다.

3.2 제약조건

제약조건은 전력조류 방정식, 네트워크 제약인 분산형전원의 수 및 총용량과 운전제약인 전압크기로 표현할 수 있다.

3.2.1 조류 방정식

분산형전원을 설치함으로써 전력조류의 변화가 발생하기 때문에 각 부하레벨에 대한 전력조류는 다음의 식 (3)을 만족되어야 한다.

$$F^i(x^i, P_{G,k}^i) = 0 \qquad (3)$$

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

3.2.2 분산형전원의 수 또는 총용량에 관한 제약

계통 유효전력손실은 분산형전원의 설치 수와 용량에 비례하여 감소되므로 설치 수를 증가시키고 용량을 크게 할수록 전력손실을 감소시킬 수 있다. 그러나 분산형전원의 설치비용이 증가되기 때문에 다음의 식 (4)와 같이 설치 수 또는 총용량을 제한할 필요가 있다.

$$P_{G,k,\min}^i \le P_{G,k}^i \le P_{G,k,\max}^i \qquad (4)$$

여기서 $P_{G,k}^i$ 는 부하레벨 i 에서 모선 k에 설치될 분산형전원의 수 또는 총용량이다. 또한, 식 (4)에서 분산형전원의 설치 수 또는 총용량을 제한할 필요는 있으나, 구체적으로 몇 개의 수 또는 얼마의 총용량을 정하는 것은 기준이 애매하다. 따라서, 계통 파라메타들의 부정확한(imprecise) 성질을 고려할 필요가 있다[11].

3.2.3 운전제약 조건

배전계통은 대부분 방사상으로 구성되기 때문에 계통부하가 말단으로 갈수록 계통의 전체 전력손실은 증가하고 전압은 감소하게 된다. 따라서, 분산형전원을 계통 말단에 설치할수록 계통손실은 감소되고 전압도 향상시킬 수 있다. 그러므로 다음의 식 (5)와 같은 제약에 의하여 분산형전원의 설치위치가 최적으로 결정될 수 있다.

$$V_{\min}^i \le V^i \le V_{\max}^i \qquad (5)$$

여기서 V^i는 각 부하레벨 i에서 모선전압의 크기이며, max와 min은 상·하한 값이다. 또한, 식 (5)에서 계통의 모선전압 또는 선로조류와 같은 파라메타들은 실제 계통 운전시 미리 정해진 제한치를 조금 벗어나도 큰 문제가 발생하

지 않는다. 따라서 이러한 위반 정도를 얼마만큼 허용할 것인지가 애매하기 때문에 모선전압 및 선로조류 등과 같은 계통 파라메타들의 부정확한(imprecise) 성질을 고려할 필요가 있다[10].

4. 분산형전원의 설치 및 운영을 위한 알고리즘

4.1 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 구할 수 있다[10,11].

4.2 목적함수와 제약조건의 멤버쉽 함수 변형

배전계통에서 분산형전원의 설치에 의한 계통 연계 방안 수립을 위하여 전력손실 감소를 목적함수로 하였다. 또한, 분산형전원의 설치 수 또는 총용량을 제약으로 하였으며, 운전제약조건으로 모선전압의 크기를 고려하였다. 목적함수와 제약조건을 Fuzzy Goal Programming으로 전환하기 위하여 제약조건들을 목적함수로 변형하였고, 각각의 목적함수의 부정확한 특성을 퍼지집합을 이용하여 멤버쉽 함수로 변환하였다. 또한, 정식화된 퍼지 멤버쉽 함수는 선형모델이나 다른 방법들을 이용하여 어떠한 변형 없이 GA를 사용하여 해를 구할 수 있다. 퍼지집합은 일반적으로 멤버쉽 함수로 나타내며 멤버쉽 함수의 값이 클수록 해가 보다 크게 만족된다. 결국, 멤버쉽 함수의 값이 증가함에 따라 각각의 목적함수의 최적해도 향상된다는 것을 알 수 있다[7,11].

4.2.1 전력손실 최소화

3.1절의 문제의 정식화에서 목적함수인 식 (2)는 계통 유효전력손실의 최소화문제이다. 이식을 Fuzzy Goal Programming의 장점인 최대화 및 최소화 등의 다양한 목적함수를 각각의 멤버쉽 함수의 최대화 문제로 변형하기 위하여 식 (6)과 같이 변형하였다. 여기서, $\overline{X}$는 모선에 설치되는 분산형전원의 용량이다. 최대화 문제로 변형한 이유는 원래의 최소화 문제처럼 최소화의 형태로 나타낼 수 있으나 Fuzzy goal programming의 특성을 잘 나타내기 위함이다. 따라서 식 (6)을 fuzzy-max 형태의 멤버쉽 함수인 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 멤버쉽 함수의 만족도가 커질수록 계통 유효전력손실은 감소된다는 것을 알 수 있다.

$$Max.\ f_1^i(\overline{X}) = T^i\,|\Delta P^i_{loss}| \qquad i=1 \cdots nt \tag{6}$$

$$\mu_1(f_1^i(\overline{X})) = \begin{cases} 0 & \text{if } f_1^i(\overline{X}) < 0 \\ \dfrac{f_1^i(\overline{X})}{T^i P^{i,0}_{loss}} & \text{if } 0 \le f_1^i(\overline{X}) \le T^i P^{i,0}_{loss} \\ 0 & \text{if } f_1^i(\overline{X}) > T^i P^{i,0}_{loss} \end{cases} \tag{7}$$

여기서, $\Delta P^i_{loss} = |P^{i,0}_{loss} - P^i_{loss}|$이고 $P^{i,0}_{loss}$와 P^i_{loss}는 각각 분산형전원 설치 전후의 부하레벨 i에서 전력손실이다. $f_1^i(\overline{X})$은 전력손실의 편차이고, $0(=f^i_{1,\min})$와 $T^i P^{i,0}_{loss}(=f^i_{1,\max})$는 분산형전원 설치에 관한 전력손실의 최소 및 최대 편차이다. 그림 2는 전력손실의 최소화 즉 멤버쉽 함수의 최대화를 나타낸 것이다.

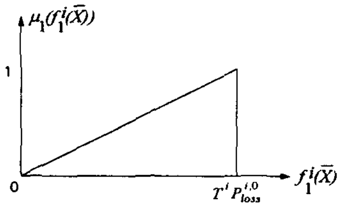


그림 2 전력손실의 최소화에 대한 멤버쉽 함수

Fig. 2 The membership function for the minimization of power loss

4.2.2 분산형전원의 설치 수 또는 총용량의 최소화

문제의 정식화에서 분산형전원의 설치 수 또는 총용량의 최소화에 대한 제약조건인 식 (4)를 식 (8)로 변형한 후, Fuzzy goal programming으로 전환하기 위하여 식 (9)와 같이 fuzzy-min의 형태인 멤버쉽 함수로 변형하였다.

$$Min.\ f_2^i(X) = |\Delta P^i_G| \qquad i=1 \cdots nt \tag{8}$$

$$\mu_2(f_2^i(\overline{X})) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_2^i(\overline{X}) < \Delta P^i_{G,\min}, \\ 1 - \dfrac{f_2^i(\overline{X}) - \Delta P^i_{G,\min}}{\Delta P^i_{G,\max} - \Delta P^i_{G,\min}} & \text{if } \Delta P^i_{G,\min} \le f_2^i(\overline{X}) \le \Delta P^i_{G,\max}, \\ 0 & \text{if } f_2^i(\overline{X}) > \Delta P^i_{G,\max} \end{cases} \tag{9}$$

여기서, $\Delta P^i_G = P^i_G - P^i_{G,\min}$이고 $P^i_{G,\min}$는 0이다. f_2^i는 분산형전원의 수 또는 총용량의 편차이다. 그림 3은 계통내에 설치되는 분산형전원의 수 또는 총용량의 최소화에 대한 멤버쉽 함수이며, $\Delta P^i_{G,\min}(=f^i_{2,\min})$과 $\Delta P^i_{G,\max}(=f^i_{2,\max})$는 계통내에 설치되는 분산형전원의 설치 수 또는 총용량에 대한 최소 및 최대 편차이다. 따라서 멤버쉽 함수의 만족도가 커질수록 P^i_G 즉 분산형전원의 수 또는 총용량이 감소된다는 것을 알 수 있다.

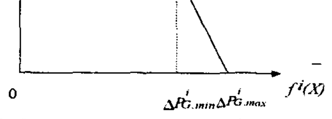


그림 3 분산형전원의 수 또는 총용량의 최소화에 대한 멤버쉽 함수

Fig. 3 The membership function for the minimization of the number or size of DGs

4.2.3 모선 전압편차의 최소화

4.2.2절에서와 같이 계통운전 제약조건을 만족시키기 위해 식 (5)의 모선 전압크기에 관한 제약조건을 식 (10)과 같이 변형한 후, Fuzzy goal programming으로 전환하기 위하여 식 (11)과 같이 fuzzy-min의 형태인 멤버쉽 함수로 변형하였다.

$$\textbf{Min. } f_3^i(X) = \max\left[\,|\Delta V_j^i|\,\right] \qquad j = 1 \cdots N_B \tag{10}$$

$$\mu_3(f_3^i(\overline{X})) = \begin{cases} 1 & \text{if } \ f_3^i(\overline{X}) < \Delta V_{j,\min}^i, \\ 1 - \dfrac{f_3^i(\overline{X}) - \Delta V_{j,\min}^i}{\Delta V_{j,\max}^i - \Delta V_{j,\min}^i} & \text{if } \ \Delta V_{j,\min}^i \le f_3^i(\overline{X}) \le \Delta V_{j,\max}^i, \\ 0 & \text{if } \ f_3^i(\overline{X}) > \Delta V_{j,\max}^i \end{cases} \tag{11}$$

여기서, $\Delta V_j^i = 1.0 - V_j^i$이고 $f_3^i(\overline{X})$은 모선전압의 최대편차이다. V_j^i는 부하레벨 i에서 모선 j의 전압이며 N_B는 계통모선의 수이다. 그림 4는 전압편차의 최소화에 대한 멤버쉽 함수이며, $\Delta V_{j,\min}^i (= f_{3,\min}^i)$와 $\Delta V_{j,\max}^i (= f_{3,\max}^i)$는 모선 j에서 전압의 최소 및 최대 편차이다. 따라서 식 (11)에서 멤버쉽 함수의 만족도가 커질수록 기준전압 1.0에 대하여 편차가 가장 큰 모선의 전압이 감소된다는 것을 알 수 있다.

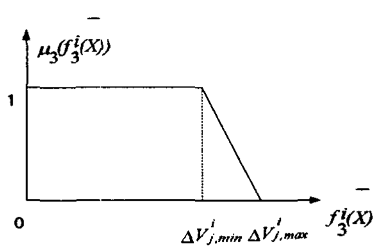


그림 4 전압편차의 최소화에 대한 멤버쉽 함수

Fig. 4 The membership function for the minimization of the deviation of voltage

결국 식 (7), (9) 및 (11)은 Goal Programming을 이용하여 식 (12)와 같이 멤버쉽 함수의 합으로 나타낼 수 있다. 식 (12)에서 멤버쉽 함수의 합을 최대화하면 각각의 목적함수는 최적화된다는 것을 알 수 있으며, GA를 이용하여 다중목적함수의 부정확한 정보에 대한 타협해를 얻을 수 있다. 여기서 ω_k는 가중치이다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^{3} \omega_k \mu_k(f_k^i(\overline{X})) \\ = \ & \omega_1 \mu_1(T^i\,|P_{loss}^{i,0} - P_{loss}^i|) \\ & + \omega_2 \mu_2(|P_G^i - P_{G,\min}^i|) \\ & + \omega_3 \mu_3(\max[|1.0 - V_j^i|]) \\ & \quad i = 1 \cdots nt \end{aligned} \tag{12}$$

$s.t$

$$0 \le \mu_k(f_k^i(\overline{X})) \le 1 \qquad k = 1,2,3$$

4.3 유전 알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 자연선택과 자연 유전학의 원리에 근거한 강력한 탐색 알고리즘이다[12]. 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

탐색공간을 줄이기 위해 기존의 simple-GA와는 달리 각 부하레벨에 해당하는 sub-population으로 구성한다. 각각의 부하레벨에 할당된 N개의 개체군의 유전자는 각 변수의 최대값과 최소값 사이에서 임의로 발생시킨다. 각각의 개체(individual)는 분산형전원을 설치할 모선의 위치와 용량으로 구성하였다.

절차 2 적합도 평가

각각의 부하레벨별로 구성된 N개의 개체군에 대하여 각 개체의 유전자를 이용하여 3상 조류계산을 하고 식 (10)과 같이 적합도를 평가한다.

$$\textit{Finitness func.} = \sum_{k=1}^{3} \omega_k \mu_k(f_k^i(X)) \qquad i = 1 \cdots nt \tag{10}$$

절차 3 수렴판정

최대세대이면 종료하고 그렇지 아니면, ***절차 4***로 간다.

절차 4 개체의 스트링 조작

유전알고리즘의 확률적 Simplex 연산자와 복제, 교차 및 돌연변이 같은 유전작용자를 이용하여 각각의 부하레벨별로 구성된 개체군을 독립적으로 향상시킨 후, ***절차 2***로 간다.

5. 사례연구

본 연구에서는 불평형 배전계통에 대하여 실제 부하구성 분포인 상업용 및 산업용 부하 등의 부하모형을 고려하여 분산형전원의 계통 연계 방안을 제시하였다. 제안된 방법의 효율성을 입증하기 위하여 불평형이 잘 반영된 IEEE 13 모선 및 34 모선 계통에 적용하였다.

제안한 알고리즘은 기존의 GA를 사용하는 몇 개의 방법과 실행결과를 비교하였다. 비교한 방법은 Sensitivity와 GA를 혼합한 방법으로서 분산형전원의 출력의 변화에 대한 손실의 변화를 계산하여 분산형전원을 설치할 모선을 선정한 후에 GA를 이용하여 분산형전원의 용량을 결정하는 방법이다. 이것은 탐색공간을 축소하여 최적화할 수 있다는 장점이 있으나 감도계산을 위하여 미분을 해야 한다는 단점이 있다. 또한, 기존의 간단한 GA 방법인 Simple-GA 방법과도 비교하였으며, 이 방법은 가장 기본적인 연산자만을 사용하기 때문에 최적해의 탐색에 있어서 시간과 정확성면에서 다소 뒤질 수 있다.

정확한 배전계통 해석에 의한 효과적인 분산형전원의 연계를 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. 집단부하모형의 개별기기 구성비율은 표 1에 나타내었다.

Case 1: 모선부하는 부하모델을 고려하고, 분산형전원의 유·무효전력 출력은 부하변동에 따라 제어가 가능하다.

Case 2: 모선부하는 부하모델을 고려하지 않는 PQ 일정부하이고, 분산형전원의 유·무효전력 출력은 부하변동에 따라 제어가 가능하다.

또한, 문제해석을 상수와 여러 가지 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 평가기간 : 5년
- 개체의 수 : 30개(13 모선계통), 50개(34 모선계통)
- 세대수 : 100세대
- 교차확률 : 0.1, 0.2, …, 0.9, 0.95(10개)
- 돌연변이 확률 : 0.01, 0.02, …, 0.09, 0.095(10개)
- 총 실행 수 : 100(10×10)회
- Time period[h] : 8(9:00 ~ 17:00)

5.1 Test System - 13 모선

그림 5는 IEEE 13 모선 12 선로에 대한 계통도이며, 부하데이타는 표 2에 나타내었으며 선로구성 코드는 참고문헌 [13]에 상세히 나타내었다.

13 모선 계통에 사용된 상수는 다음과 같다.

DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150

$\Delta P^i_{G,\min}$: 1개, 30[kW](최소설치 수 및 용량)

$\Delta P^i_{G,\max}$: 6개, 900[kW](최대설치 수 및 용량)

$\Delta V^i_{j,\min}$: 0.07[p.u.]

$\Delta V^i_{j,\min}$: 0.15[p.u.]

표 2에서 Load Model Id는 표 1에서 집단부하에 대한 부하군을 의미하며, Id=1인 경우는 $P-Q$ 일정부하로 고려한 것이다. 각 부하레벨에 따른 부하지속시간은 표 3에 나타내었다. 표 4는 제안한 알고리즘에 의하여 각 Case 별로 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 용량을 나타낸 것이다. 표 4의 부하모형을 고려한 Case 1은 고려하지 않은 Case 2 보다 분산형전원의 총용량에 있어 용량이 11.1% 정도 감소됨을 알 수 있다. 이것은 다한 정격의 유도전동기와 같은 부하의 구성비율이 높은 산업용 및 농업용 부하의 영향이 잘 나타난 것을 알 수 있다. 따라서, 배전계통을 정확히 해석하고 경제적인 분산형전원의 설치 및 운영을 하기 위하여 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 특성을 반영하는 것이라 사료된다. 또한, 표 5에서 분산형 전원의 설치 전과 후의 계통손실과 전압크기를 비교하여 나타내었다. 계통손실의 경우 Case 1에서는 분산형전원 설치 전에는 1,340,689[kWh]이었으나 설치 후에는 867,041[kWh]가 되었고, 결국 테스트 기간을 5년으로 하였을 때 473,648[kWh]가 되어 35% 정도 감소된다는 것을 알 수 있다. $V_{\min}$와 V_{ave}는 분산형전원 설치 전 보다 상당히 향상되었고, $V_{\min}$은 부하레벨 100%와 90%에서 전압크기의 제약을 0.93을 기준으로 하였을 때 분산형전원을 설치 후에 있어서 제약을 모두 만족한다는 것을 알 수 있다. Case 2에서도 유사한 결과를 나타내고 있다.

표 6은 각각의 알고리즘 별로 Case 1에 대하여 100번의 실행결과를 비교 분석하여 최적해를 찾은 실행수와 세대수를 나타내었다. 최적해를 찾은 실행수에 있어서 제안한 알고리즘이 확률적 Simplex 연산자를 사용하기 때문에 우수함을 확인하였다. 표에서 최적해를 찾은 세대는 수렴되기 시작한 세대를 의미하는 것으로서 최적해 탐색 시간에 있어서는 제안한 방법이 다른 방법 보다 빨리 수렴함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 제안한 알고리즘은 감도계산을 위한 미분계산 절차가 필요 없어 매우 효율적인 방법임을 확인 할 수 있었다.

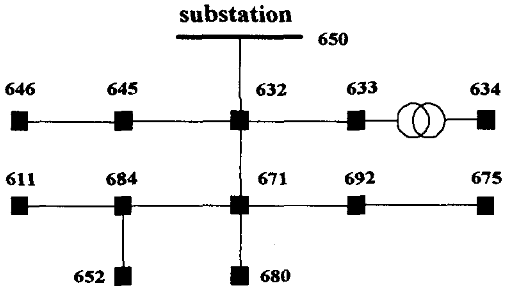


그림 5 IEEE 13 모선 테스트 시스템
Fig. 5 IEEE 13 bus test systems

표 2. 13 모선 계통의 부하데이타
Table 2. Load Data of 13 Bus System

Send Bus	End Bus	Load Id	Ph-1 kW	Ph-1 kVAR	Ph-2 kW	Ph-2 kVAR	Ph-3 kW	Ph-3 kVAR	Length (ft)	Conf. Code
632	645	5	0	0	170	125	0	0	500	603
632	633	1	0	0	0	0	0	0	500	602
633	634	3	160	116	120	87	120	87	0	XFM
645	646	4	0	0	230	132	0	0	300	603
650	632	1	0	0	0	0	0	0	2000	601
684	652	2	128	86	0	0	0	0	800	607
671	684	1	0	0	0	0	0	0	300	604
671	680	1	0	0	0	0	0	0	1000	601
632	671	3	385	220	385	220	385	220	2000	601
671	692	4	0	0	0	0	170	151	0	switch
684	611	2	0	0	0	0	170	80	300	605
692	675	3	485	190	68	60	290	212	500	606
Total Load			1,158	612	973	624	1,135	750		

Id = 1부하모형을 고려하지 않는 $P-Q$ 일정부하를 의미

표 3. 부하레벨과 부하지속시간
Table 3. Load Level and Load Duration Time

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

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]		
	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 5. 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교
Table 5. 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 [kWh]	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 [kWh]		1,340,689	867,041	1,502,568	918,450
V_{min}[p.u.]	100%	[redacted]			
	90%				
	70%	0.9311	0.9619	[redacted]	
V_{ave}[p.u.]	100%	0.9434	0.9566	0.9388	0.9558
	90%	0.9494	0.9624	0.9456	0.9611
	70%	0.9610	0.9721	0.9587	0.9697
V_{max}[p.u.]	100%	0.9658	0.9752	0.9650	0.9793
	90%	0.9692	0.9797	0.9685	0.9810
	70%	0.9760	0.9859	0.9755	0.9840

표 6. 각 방법에서 최적해를 찾은 실행수와 세대수
Table 6. Number of Runs and Best Generation found Optimum in Each Approach

	Proposed-GA	Sensitivity-GA	Simple-GA
최적해를 찾은 수 / 전체 실행수	17/100 (17%)	10/100 (10%)	2/100 (2%)
최적해를 찾은 세대	52	66	84
전체 손실[kW]	867,041		

5.2 Test System - 34 모선

그림 6은 34 모선 33 선로로 구성된 IEEE 불평형 테스트 계통에 적용하였다. 시스템의 부하 데이타와 선로구성 데이타는 본 논문에서는 생략하였고 참고문헌 [13]에 상세히 나타나 있다. 사용된 상수는 다음과 같고 나머지는 13 모선 계통에서 사용한 상수와 같다.

DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150

$\Delta P^i_{G,min}$: 1개, 30[kW](최소설치 수 및 용량)

$\Delta P^i_{G,max}$: 10개, 1,500[kW](최소설치 수 및 용량)

$\Delta V^i_{j,min}$: 0.05[p.u.]

$\Delta V^i_{j,min}$: 0.15[p.u.]

Test System - 13 모선의 경우와 마찬가지로 표 7은 각 Case 별로 부하레벨에 대하여 분산형전원의 설치 위치와 크기를 나타낸 것이다. 표 7의 부하모형을 고려한 Case 1은 고려하지 않은 Case 2 보다 분산형전원의 총용량에 있어 용량이 6.2% 정도 감소됨을 알 수 있다. 이것은 13 모선의 경우처럼 배전계통을 정확히 해석하고 경제적인 분산형전원의 설치 및 운영을 하기 위하여 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 특성을 반영하는 것이라 사료된다.

또한, 표 8은 분산형전원을 설치하기 전과 설치한 후의 계통손실과 전압크기를 비교하여 나타내었다. 계통손실의 경우 Case 1에서는 분산형전원을 설치하기 전에는 509,295[kWh] 이었으나 설치한 후에는 181,840[kWh]가 되었고, 결국 347,455[kWh]가 감소되어 68%가 감소되었음을 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 0.95을 기준으로 하였을 때 분산형전원을 설치 후에 있어서 제약을 모두 만족한다는 것을 알 수 있다. Case 2도 유사한 결과를 나타내고 있다.

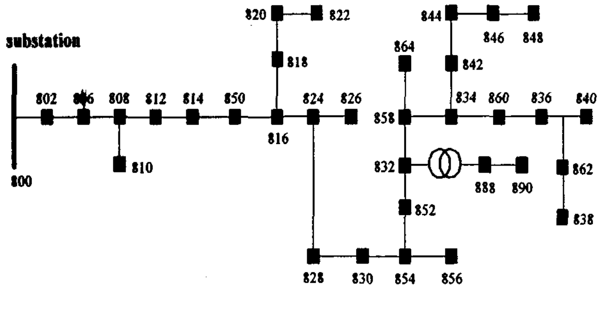


그림 6 IEEE 34 모선 테스트 시스템
Fig. 6 IEEE 34 bus test systems

표 7. 분산형전원의 설치 위치(Case 1과 Case 2)
Table 7. Placement Location of DGs(Case 1 and Case 2)

Optimal location	Case 1 [kW]			Case 2 [kW]		
	100%	90%	70%	100%	90%	70%
834	150	150	120	150	150	120
840	60					
844	150	150	120	150	150	120
862				120		
Total	360	300	240	420	300	240

표 8. 분산형전원 설치 전후의 전압 및 손실 비교

Table 8. 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 [kWh]	100%	164,580	52,250	209,113	62,636
	90%	265,158	83,592	327,892	85,510
	70%	79,556	25,996	93,511	26,229
Total losses [kWh]		509,295	161,840	630,518	174,376
V_{min} [p.u.]	100%	[redacted]			
	90%				
	70%				
V_{ave} [p.u.]	100%	0.9390	0.9995	0.9325	1.0069
	90%	0.9452	0.9950	0.9401	0.9940
	70%	0.9575	0.9972	0.9545	0.9966
V_{max} [p.u.]	100%	0.9992	1.0309	0.9992	1.0297
	90%	0.9993	1.0210	0.9993	1.0171
	70%	0.9995	1.0195	0.9994	1.0170

표 9. 각 방법에서 최적해를 찾은 실행수와 세대수

Table 9. Number of Runs and Best Generation found Optimum in Each Approach

	Proposed-GA	Sensitivity-GA	Simple-GA
최적해를 찾은 수 / 전체 실행수	4/100 (4%)	2/100 (2%)	0/100 (0%)
최적해를 찾은 세대	70	76	36
전체 손실[kW]	161,840		167,786

표 9는 각각의 알고리즘 별로 Case 1에 대하여 13모선의 경우처럼 100번의 실행결과를 비교 분석하여 최적해를 찾은 실행수와 세대수를 나타내었다. 표에서 최적해를 찾은 세대는 수렴되기 시작한 세대를 의미한다. 계통이 다소 크고 복잡하기 때문에 최적해를 찾은 실행수와 세대수가 13 모선 계통의 결과에 비해 다소 떨어지나 비교한 알고리즘 보다 우수함을 알 수 있다. 특히, Simple-GA의 경우 다른 알고리즘에서 탐색한 최적해를 찾지 못하였으며, 조기수렴하는 것을 알 수 있다. 이것은 제안한 알고리즘이 확률적 Simplex 연산자의 특성을 사용하고, 감도계산을 위한 미분계산 절차가 필요 없어 매우 효율적인 방법임을 확인 할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 복합 배전계통에서 부하불평형 및 부하모형을 고려한 분산형전원의 계통 연계 방안을 제시하였다.

분산형전원의 계통 연계 방안을 합리적이며 실제적으로 수립하기 위하여 부하불평형 및 부하모형 등을 고려하였으며, 이 경우 분산형전원의 용량 및 설치수를 테스트 계통에 따라 약 6~11% 정도 감소시킬 수 있었다. 따라서 배전계통을 정확히 해석하고 경제적인 분산형전원의 설치 및 운영을 하기 위하여 부하모형을 고려하는 것이 계통의 실제적인 특성을 반영하는 것이라 사료된다.

또한, 분산형전원의 설치 및 운영 문제에서 전력손실, 분산형 전원의 설치 수 또는 총용량 및 각 모선전압에 대한 불확실(imprecise) 성질을 고려하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였고 최적화 알고리즘의 탐색공간의 크기를 줄이면서 계통상황 변동에 적합하게 정식화를 하였다. 정식화된 문제의 최적해를 구하는 방법으로 GA를 사용하였다. 제안한 알고리즘은 실행횟수와 최적해를 찾는 경우를 기준으로 Sensitivity-GA 및 Simple-GA와 비교하여 최적해를 찾는 경우가 상당히 우수 하였다. 이것은 제안한 알고리즘이 확률적 Simplex 연산자의 특성을 사용하며 감도계산을 위한 미분계산 절차가 필요 없기 때문에 매우 효율적인 방법임을 확인 할 수 있었다.

앞으로 많은 나라에서 분산형전원의 개발에 힘을 쏟고 있으며, 2010년까지 총 전력발전의 20% 이상을 분산형전원이 담당할 것이라는 예상이 나오고 있는 등 이 분야에 대한 연구가 더욱 활발해지리라 기대된다.

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

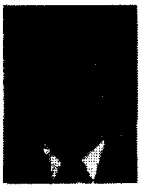
[6] K. H. Kim, Y. J. Lee, S. B. Rhee, S. K. Lee and S. K. You, "Dispersed Generator Placement using Fuzzy-GA in Distribution", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp.1148-1153, 2001

[7] M. Gen, K .Ida and J. Kim, "Fuzzy Goal Programming using Genetic Algorithm", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 413-418, 1997

[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] K. H. Kim, S. B. Rhee, S. N. Kim and S. K. You, "Application of ESGA Hybrid Approach for Voltage Profile Improvement by Capacitor Placement", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, No. 4, pp.1516-1522, Oct. 2003
[10] 황갑주외 2인, "배전계통 해석을 위한 모형개발", 대한전기학회 논문지, 제42권, 제5호, pp42-51, 1993
[11] 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
[12] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
[13] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders", IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-985, August, 1991

저 자 소 개



이 유 정(李 有 楨)

1962년 7월 24일생. 1986년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 2000년 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료

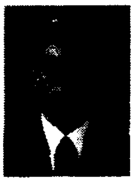
E-mail : leeyjeong@ihanyang.ac.kr

이 상 근 (李 尙 根)

1961년 4월 13일생. 1986년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1989~1995년 한국전력기술(주) 전기기술처. 현재 원주대학 전기과 부교수.

Tel : (033) 760-8422

E-mail : sklee@sky.wonju.ac.kr



김 규 호 (金 圭 浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 안산공과대학 전기과 부교수

Tel : (031) 490-6058

E-mail : kyuho@act.ac.kr

유 석 구 (劉 錫 九)

1938년 10월 31일생. 1961년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 1996년 당학회 회장

E-mail : skyou@mail.hanyang.ac.kr