

# 퍼지추론시스템 기반 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘 개발

論 文

57-2-4

## Fuzzy Inference System Based Distance Relay Algorithm Development for Protecting an Underground Power Cable Systems

鄭彩均\* · 李鍾範<sup>†</sup> · 吳聖權\*\* · 朴建俊\*\*\* · 李在奎<sup>§</sup>

(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee · Sung-Kwun Oh · Keon-Jun Park · Jae-Kyu Lee)

**Abstract** - If the fault occurs on the underground power cable systems, the fault current on the sheath has an influence on all sections of cable because it's returned through earth at the directly grounded point and operation point of SVL(Sheath Voltage Limiter) on each insulated joint box. Therefore, the earth resistance and the operation of SVL have an effect on the zero-sequence current, and then the impedance between relaying point and fault point is increased. That causes the overreach of distance relay. For these reasons, the distance relay algorithm for protecting an underground power cable systems hasn't been developed till now.

In this paper, new distance relay algorithm is developed for protecting a underground power cable system using fuzzy inference system which is the one of ACI(Advanced Computational Intelligence) techniques. This algorithm is verified by EMTP simulation of real power cable system, and proves to effectively advance the errors

**Key Words** : ACI, Distance realy, Fuzzy inference system, Underground power cables

### 1. 서 론

거리계전방식은 계전기에서 취득한 전압과 전류를 활용하여 고장점까지의 거리 즉, 임피던스를 측정하여 동작영역과 비교한 후 사고 판정을 하는 계전기이다. 송전선로의 단위 길이 당 임피던스는 일정하기 때문에 송전선로상에서 고장이 발생하면 계전기가 바라보는 임피던스가 변화하고 이에 따라 전기적 거리가 변화하는 특성을 이용하여 3단계의 단계별 보호영역을 설정한다[1-4]. 거리계전기는 과도상태시 발생하는 직류성분이나 고조파의 영향을 제거하여 임피던스 계측의 정확성을 높여야 한다. 그러나 지락 거리계전기의 정정치는 정상분 임피던스값으로 정정하므로 고장 발생시 고장전류에 의해 결보기 임피던스가 변화하여 언더리치 혹은 오버리치 현상이 발생한다.

실제로 지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 가공선로와는 달리 모두 대지로 흘러가지 않고 시스템을 통해 전 계통의 직접접지 지점과 SVL(Sheath Voltage Limiter)동작 지점에서 대지로 귀로한다[5-6]. 이와 같은 접지저항과 SVL의 동작에 의한 영상분 전류는 보상이 어렵기 때문에

거리계전기의 주요 오동작 원인 중 하나이며, 특히 계전기가 본 임피던스와 실제 고장임피던스 사이에 많은 오차가 발생시키고 있다. 이와 같은 영향으로 지중송전계통에서는 거리계전기가 주보호로 활용되지 못하고 있으며 극히 일부 선로에서 가공송전계통 알고리즘을 적용한 후비보호용 거리계전기가 사용되고 있는 실정으로 현재까지 지중송전계통 보호 전용 거리계전 알고리즘이 개발된 사례가 없다.

따라서 본 논문에서는 지중송전계통 보호를 위한 실시간 보호시스템 구축을 위해 오차를 효과적으로 개선하고 계전기 오동작을 예방하기 위한 방안으로 ACI(Advanced Computational Intelligence)기법인 퍼지추론에 의한 FR-FIS(Fuzzy Relation based Fuzzy Inference System)기법을 도입하였다[7-11]. 먼저, 접지저항에 따라 불규칙적으로 나타나는 임피던스 특성을 개선하였으며 계전기가 수렴하는 내부영역과 그 외를 외부영역으로 입력공간을 분할함으로써 기존의 임피던스 오차를 개선하는 새로운 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘을 개발하였다.

### 2. 지중송전계통 모델링 및 거리계전 알고리즘

#### 2.1 지중송전계통 모델링

지중송전계통 보호를 위한 보호시스템 구축을 위해 새롭게 개발된 디지털 거리계전 알고리즘을 검증하기 위해 현재 국내에서 운전 중인 실제통을 EMTP/ATP를 이용해 모델링하였다. 그림 1은 거리계전기 동작시험을 위한 지중송전계통의 계통도를 나타내었다. 전원은 154kV이며, 총 선로길이가 4.952km인 OF 2000mm<sup>2</sup>이 전력구 방식의 정삼각배열로 포설되어 있다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 圓光大 工大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr

\* 正會員 : 韓電 電力研究院 研究員 · 工博

\*\* 正會員 : 水原大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正會員 : 水原大 工大 電氣工學科 博士課程

§ 正會員 : 大德大 工大 電氣科 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 3月 29日

最終完了 : 2007年 10月 16日

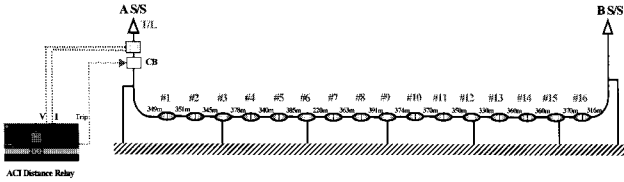


그림 1 지중송전계통 계통도

Fig. 1 System diagram of underground power cable systems

다양한 고장조건 고려를 위해 1선지락 고장위치는 0.9km 지점부터 5km 지점까지 매 km 마다 발생시켰으며, 고장 위상은 0°에서 90° 사이에 매 30° 마다 변화를 주었다. 또한 영상분 전류에 많은 영향을 미치는 접지저항은 1Ω, 3Ω, 6Ω, 10Ω을 적용하였으며, 저항값 마다 고장현상을 분석하여 접지저항에 따른 거리계전기 동작 특성을 검토하였다. 고장의 형태는 케이블의 도체와 시스 사이에 절연이 파괴되면서 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의하였다. 고장데이터의 샘플링 율은 3,840 sampling/sec이다.

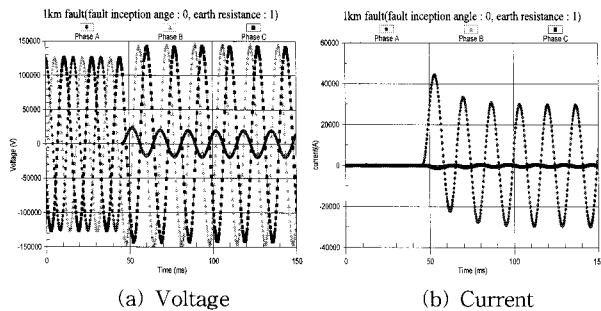


그림 2 1km 지점에서 고장시 전압 및 전류 파형(고장위상 : 0°, 접지저항 : 1Ω)

Fig. 2 Voltage and current wave at 1 km fault(Fault inception angle : 0°, Earth resistance : 1Ω)

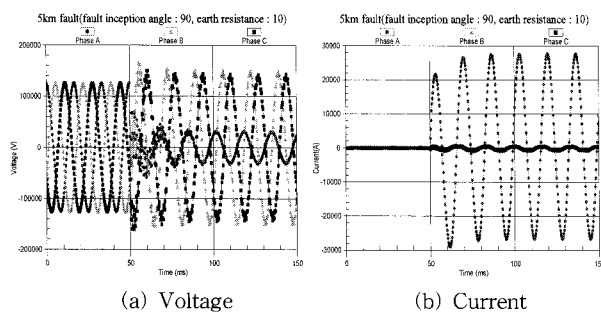


그림 3 5km 지점에서 고장시 전압 및 전류 파형(고장위상 : 90°, 접지저항 : 10Ω)

Fig. 3 Voltage and current wave at 5 km fault(Fault inception angle : 90°, Earth resistance : 10Ω)

그림 2와 그림 3은 계전기 설치점에서 고장거리와 고장위상, 접지저항에 따라 검출되는 전압과 전류파형의 예를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 고장위상에 따라 전압과 전류의 파형에 많은 변화가 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 고장위상이 0°인 경우 전류파형에는 다량의 DC 성분이 포함되

어 있으며 90°에서는 감소되는 경향을 보인다. 또한 전압과 형에서 나타나는 고조파 함유량은 90° 고장의 경우에 가장 많이 나타남을 알 수 있다. 이는 거리계전기의 정확한 동작에 영향을 미친다.

2.2 거리계전 알고리즘

전력계통에서 고장이 발생한 경우 그림 2(b)에서처럼 고장전류에는 고장위상에 따라 과도한 DC 성분이 존재한다. 이와 같은 DC 성분은 거리계전기가 계산한 임피던스에 초기 오차를 발생시키고 계전기의 응답속도를 떨어지게 하는 원인이 되므로 전류성분에 포함된 DC 성분을 제거한 뒤 DFT 필터로 기본파 성분을 추출하여 임피던스를 계산하여야 한다[2-4]. 본 논문에서는 DC 성분을 제거하는 방법으로 FIR 필터를 사용하였으며, 기본파 성분 추출을 위해 RDFT (Recursive DFT)를 사용하였다. 또한 실제계통 모델과 고장조건을 고려하여 1선지락고장 발생시 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘을 검증하였다.

본 논문에서 사례연구를 위해 실제계통의 전원 임피던스, 케이블의 대칭분 임피던스와 파라미터를 사용하였고, 그 데이터는 표 1과 같다. 그림 4는 각 고장위치에서 접지저항에 따른 임피던스 궤적을 나타내었다. 그림에서처럼 임피던스 궤적은 접지저항과 별도로 계전기가 본 임피던스와 알고리즘 출력에 의한 임피던스 사이에 오차가 발생하고 있으며, 접지저항이 증가함에 따라 오차도 커지고 있음을 알 수 있다. 0.5km 지점에서 발생한 경우 계전기가 본 임피던스는 0.0205+j0.035Ω 이었지만 접지저항이 1Ω시에 알고리즘을 통해 출력한 임피던스는 0.335+j0.213Ω이고, 접지저항이 3Ω인 경우에는 0.407+j0.158Ω, 접지저항이 6Ω인 경우에는 0.462+j0.137Ω, 접지저항이 10Ω인 경우에는 0.496+j0.134Ω으로 접지저항이 증가함에 따라 실제임피던스가 계전기가 바라본 임피던스보다 커지는 현상이 심해지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다른 고장지점인 1km, 1.5km, 2km, 2.5km, 3km, 3.4km, 4km, 4.4km, 5km에서도 동일하게 나타났다.

표 1 실제계통 임피던스 데이터

Table 1 Impedance data for real power cable systems

Parameter	Data	
전원 임피던스	A S/S	$Z_{S1} = Z_{S2} = 0.33202 + j2.687[\Omega]$ $Z_{S0} = 1.19765 + j5.91239[\Omega]$
	B S/S	$Z_{S1} = Z_{S2} = 0.34625 + j2.8672[\Omega]$ $Z_{S0} = 1.25694 + j5.97406[\Omega]$
케이블 대칭분 임피던스	영상분( $Z_{c0}$ )	0.0590+j0.0510[Ω/km]
	정상분( $Z_{c1}$ )	0.0438+j0.0711[Ω/km]
	역상분( $Z_{c2}$ )	0.0438+j0.0711[Ω/km]
케이블 임피던스	대지위로 도체임피던스( $Z_{ce}$ )	0.0739+j0.79429[Ω/km]
	대지위로 시스임피던스( $Z_{se}$ )	0.10379+j0.74425[Ω/km]
	도체 상호임피던스( $Z_{cm}$ )	0.0593+j0.68263[Ω/km]
	도체-시스간 상호 임피던스( $Z_{se}$ )	0.0593+j0.74425[Ω/km]

이처럼 지중송전계통에서 고장시 접지저항은 거리계전기 동작에 많은 영향을 미치며, 접지저항에 의해 오차가 발생하는 원인은 1선지락고장이 발생하는 메커니즘에서 찾아볼 수 있다. 즉, 지중송전계통에서 발생하는 1선지락고장은 고장전

류가 모두 대지로 흘러가지 않고 시스를 통해 모든 계통의 직접접지점으로 분산되어 방전되기 때문에 직접접지 지점의 접지저항에 따라 영상분 전류의 분포가 변화하며 이는 거리계전기에 의한 임피던스 계산시 오차요인으로 작용하게 된다. 또한 지중송전계통의 절연접속부 및 종단접속부에 설치된 절연통보호장치(SVL) 동작에 의해 불규칙적으로 변화하는 영상전류를 적절히 보상하기 어렵기 때문에 이것도 거리계전기 응용시 나타나는 주요 오동작 원인 중 하나이다.

이와 같은 접지저항과 SVL 동작 등의 영향으로 인한 거리계전기의 오동작 우려로 거리계전기가 가지고 있는 장점에도 불구하고 실제 지중송전계통에서는 일부 후비보호반을 목적으로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 현상에 의한 오차를 효과적으로 개선하고 계전기 오동작을 예방할 수 있는 새로운 알고리즘 개발을 위해 퍼지 추론 기법인 FR-FIS를 거리계전 알고리즘에 도입하였다.

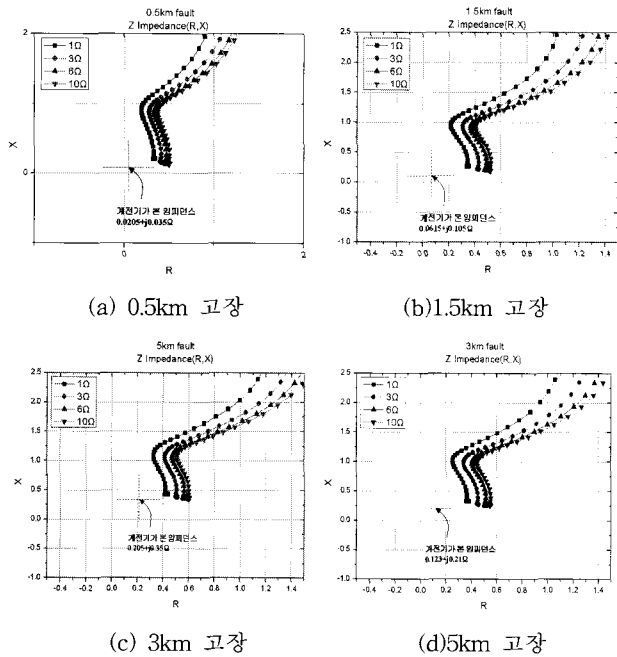


그림 4 고장 위치 및 접지저항에 따른 임피던스 궤적  
Fig. 4 Impedance locus according to earth resistance and fault location

### 3. 퍼지추론시스템

#### 3.1 퍼지추론에 의한 모델링

퍼지모델링이란 if-then 형식으로 플랜트를 기술하는 것으로, 구체적으로 입력력 데이터의 상호관계에 의해 설정된 입력력 변수로부터 확립하는 것이다. 규칙베이스 퍼지모델의 동정은 전반부와 후반부의 동정으로 나누어진다. 전반부 동정은 입력정보, 즉 퍼지규칙의 전반부 변수의 선택과 입력변수 공간의 퍼지분할 결정, 그리고 입력공간의 파라미터 결정이 필요하다. 후반부 동정은 후반부 변수의 선택과 후반부 변수의 파라미터를 결정하는 것이다. 전반부의 입력변수와 퍼지집합의 멤버쉽 함수는 입력변수의 공간을 규칙수 만큼의 퍼지 분할된 부분공간으로 나누는 것과 관련되고, 후반부

의 파라미터는 각각 퍼지 분할된 부분공간에서 입출력 관계를 묘사한다[7-11].

그림 5에서는 본 논문에서 사용한 퍼지 모델링의 전체 구성도를 나타내었다. 전반부 구조로 결정된 입력변수와 규칙을 가지고, 유전자 알고리즘을 이용하여 전반부 파라미터를 동정한다. 후반부 구조는 4가지 형태의 구조로 표현되며, 후반부 파라미터의 동정으로는 최대 피벗팅(maximum pivoting) 알고리즘을 가지는 가우스 소거법에 의한 표준 최소자승법을 사용한다.

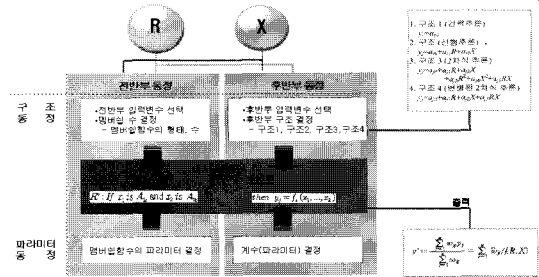


그림 5 퍼지모델링의 전체 구성도  
Fig. 5 Overall scheme of fuzzy modeling

#### 3.2 퍼지추론의 최적화

본 논문에서 제안된 진화론적 최적 퍼지 모델의 설계를 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 구조와 파라미터를 최적으로 동정하고, 하중값을 갖는 합성 목적 함수를 사용하여 근사화와 일반화 사이의 균형을 도모하였다[7-8]. 표 2에서는 본 논문에서 사용할 퍼지추론 시스템을 설계하기 위해 사용되는 최적화 알고리즘을 상세히 보여준다. 퍼지 규칙의 전반부에서 파라미터 동정은 Max\_Min값을 각각 멤버쉽 함수의 초기 정점으로 설정한 후 유전자 알고리즘으로 최적화한다. 또한 퍼지규칙의 후반부에서의 파라미터 동정은 최소자승법을 이용하여 최적화한다.

표 2 퍼지추론 시스템의 방법론

Table 2 Taxonomy of fuzzy inference systems

퍼지추론 시스템 모델	퍼지추론시스템(FIS)에 사용되는 파라미터 동정 및 최적화 알고리즘	
퍼지규칙	퍼지규칙의 전반부	퍼지규칙의 후반부
동정파라미터	전반부 멤버쉽함수의 정점	후반부 다항식계수
최적화방법	유전자알고리즘	최소자승법

그림 6은 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘에 적용한 퍼지추론 시스템의 최적화 과정을 나타낸 것이다. 저항(R)과 리액턴스(X)를 입력으로 하여 전반부에서 입력데이터의 Max\_Min값으로 멤버쉽 함수를 정의하고 후반부에서 4가지 구조에 대한 모델 출력을 평가한 후 전반부 멤버쉽 함수의 정점을 유전자 알고리즘을 이용하여 동조하고 후반부 계수를 최소자승법으로 최적화한다. 또한 전반부에서는 세대수에 따라 성능지수를 평가하여 퍼지추론 시스템을 최적화한다.

#### 4. 퍼지추론시스템을 이용한 거리계전 알고리즘 개선

##### 4.1 거리계전기 적용을 위한 퍼지추론시스템 구축

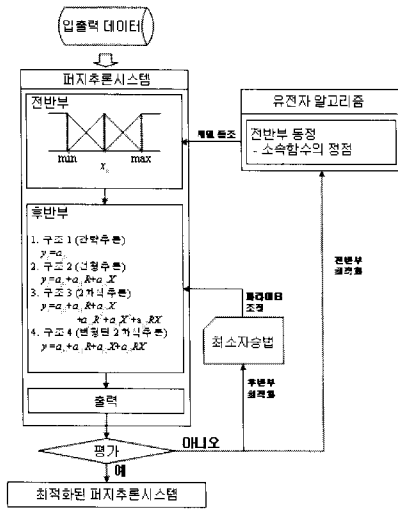
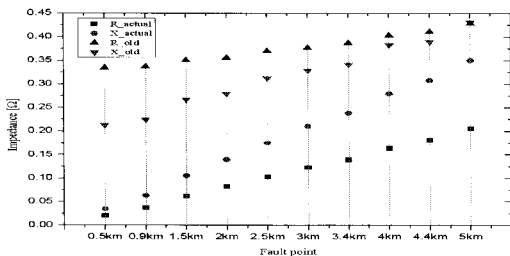
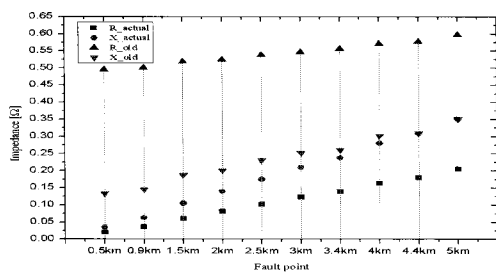


그림 6 퍼지추론 시스템의 최적화 과정  
Fig. 6 Optimization process for fuzzy inference system



(a) 접지저항 : 1Ω



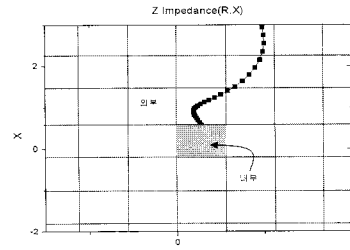
(b) 접지저항 : 10Ω

그림 7 실제값과 알고리즘에 의한 임피던스 비교  
Fig. 7 Comparison of impedance by actual value and algorithm

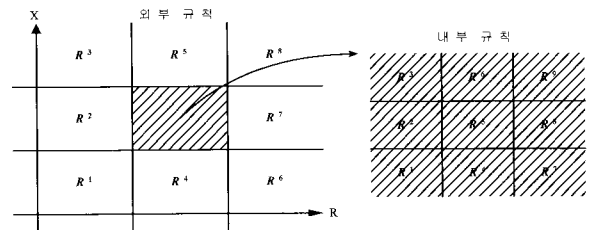
그림 7은 각각 1Ω과 10Ω의 접지저항에서 계전기 실제값의 임피던스( $R_{actual}$ ,  $X_{actual}$ )와 기존의 알고리즘에 의해 산출된 임피던스( $R_{old}$ ,  $X_{old}$ ) 사이의 오차를 비교한 그래프를 나타내었다. 그림에서처럼 저항성분에서 발생하는 오차는 접지저항이 증가함에 따라 커지며, 고장 위치에 관계없이 일정하게 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 리액턴스 성분도 실제값과 알고리즘 출력값 사이에서 오차가 발생하고 있으며, 리액턴스는 접지저항이 작을수록 오차의 폭이 커지고 고장 위치가 길어질수록 오차는 조금씩 감소하는

특성을 보이고 있다.

본 논문에서는 이처럼 접지저항에 따라 불규칙적으로 나타나는 임피던스 특성을 개선하기 위해 유전자 알고리즘에 의해 최적화된 퍼지추론 시스템을 도입하였다. 그러나 임피던스가 수렴하는 목표값만 설정하여 퍼지추론 시스템에 적용하면 수렴값 내에서의 임피던스는 목표값에 매우 근접하나 그 외의 영역에서는 랜덤한 특성을 보여 실제 임피던스의 궤적이 계전기 동작 영역 내를 지나서 수렴하고 있는 것을 확인하였다. 이는 계전기 동작에 있어 오동작을 일으킬 수 있는 원인이 될 수 있다. 따라서 그림 8(a)와같이 계전기가 수렴하는 영역의 내부영역과 그 외의 외부영역으로 입력공간을 분할하여 퍼지추론 시스템에 적용시킴으로써 문제점을 개선하였다. 즉, 그림 8(b)와 같이 계전기가 보는 임피던스 저항( $R$ )과 리액턴스( $X$ )가 수렴하는 공간에서는 각각 내부 규칙을 적용하고 수렴 공간 외에서는 외부 규칙을 분할 적용함으로써 변화하는 임피던스 궤적에 따라 퍼지추론 시스템이 유연하게 적응하도록 하는 새로운 입력 공간 분할방식을 적용하였다. 그림 8에서 R1~R9는 내부와 외부에서 분할된 입력공간의 규칙(Rule)을 나타낸 것이다.



(a) 입력공간 분할



(b) 내부 규칙과 외부 규칙

그림 8 입력공간 분할에 따른 내부 규칙과 외부 규칙  
Fig. 8 Internal rule and external rule according to division of input space

저항( $R$ )과 리액턴스( $X$ )의 입력변수에 대해 변수들 간의 상호 관계 공간을 이용한 퍼지추론 시스템을 설계하였다. 각 저항과 리액턴스 입력에 대해 멤버쉽 함수 2개 또는 3개를 설정하였고 후반부에서는 4가지의 구조를 사용하였다. 그리고 전반부 멤버쉽 함수의 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 최적으로 동조하였다. 또한 외부 규칙에서 저항과 리액턴스에 대한 모델은 입력과 출력이 동일하도록 설정하였다. 그리고 내부 규칙의 저항에 대한 모델에서는 입력변수에 대해 3개의 멤버쉽 함수와 구조 1의 간략 퍼지추론을 선정하였으며, 리액턴스에 대한 모델에서는 입력변수에 대해 3개의 멤버쉽 함수와 구조 2의 선형 퍼지추론을 선정

하였다.

그림 9에서는 저항과 리액턴스 외부규칙에 대한 멤버십 함수 파라미터를 나타내었다. 그림에서처럼 내부 규칙과 외부 규칙에서 경계 설정 및 경계 부분의 애매성을 다루기 위해 실험을 통해 경계 부분을 설정하였다. 외부 규칙에서 입력 R과 입력 X에 대하여 각 입력의 최소값과 최대값을 기준으로 하여 계전기 동작에 관련된 임피던스 궤적을 고려하여 결정하였다. 즉 R에 대하여 0.3과 0.65로, X에 대하여 0.12와 0.5로 설정하였고, 경계 부분의 애매성을 다루기 위해 여분을 0.01로 설정하여 그림 9와 같이 외부 규칙에 대한 멤버십 함수를 정의 하였고, 내부 규칙에 해당되는 R에서 A<sub>12</sub>와 X에서 A<sub>22</sub>는 외부 규칙상에서 범종형의 멤버십 함수를 사용하였다.

외부규칙에 대한 저항의 퍼지규칙은 식 (1)과 같고 리액턴스에 대한 규칙은 식 (2)와 같다. 각각의 퍼지규칙에서 R에서 A<sub>12</sub>와 X에서 A<sub>22</sub>는 내부 규칙에 해당되는 공간이므로 외부규칙에서는 생략되었다.

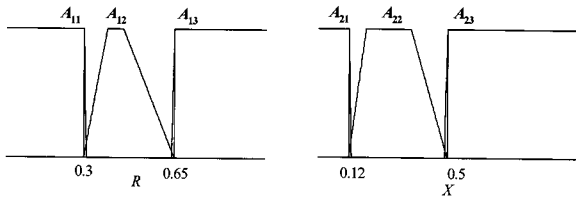


그림 9 외부규칙에서 저항과 리액턴스의 멤버십 함수  
Fig. 9 Membership function parameters of R and X for external rule

$$\begin{aligned}
 R^1: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_1 = R \\
 R^2: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_2 = R \\
 R^3: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_3 = R \\
 R^4: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_4 = R \\
 R^5: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_5 = R \\
 R^6: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_6 = R \\
 R^7: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_7 = R \\
 R^8: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_8 = R
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 R^1: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_1 = X \\
 R^2: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_2 = X \\
 R^3: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_3 = X \\
 R^4: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_4 = X \\
 R^5: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_5 = X \\
 R^6: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_6 = X \\
 R^7: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_7 = X \\
 R^8: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_8 = X
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

그림 10에서는 내부규칙에서 저항 모델의 R과 X에 대한 멤버십 함수 파라미터를 나타내었다. 점선은 Max\_Min값에 의한 멤버십 함수를 보여주며, 실선은 유전자 알고리즘에 의해 동조된 멤버십 함수를 보여준다.

내부 규칙에서 대한 저항 모델의 퍼지규칙은 식 (3)과 같고, 입력변수에 대해 3개의 멤버십 함수와 구조 1의 간략 퍼지추론의 9개 퍼지규칙을 가진다.

그림 11에서는 내부규칙에서 리액턴스 모델의 R과 X에 대한 멤버십 함수 파라미터를 나타내었다. 점선은 Max\_Min

값에 의한 멤버십 함수를 보여주며, 실선은 유전자 알고리즘에 의해 동조된 멤버십 함수를 보여준다.

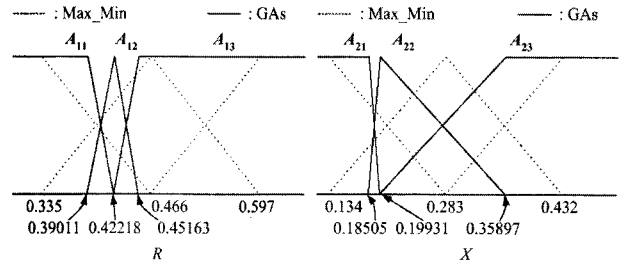


그림 10 내부규칙에서 저항의 멤버십 함수 파라미터  
Fig. 10 Membership function parameters of R for internal rule

$$\begin{aligned}
 R^1: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_1 = 0.02146 \\
 R^2: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_2 = 0.013911 \\
 R^3: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_3 = 0.14861 \\
 R^4: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_4 = 0.015786 \\
 R^5: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_5 = 0.041652 \\
 R^6: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_6 = 0.18851 \\
 R^7: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_7 = 0.032648 \\
 R^8: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_8 = 0.080567 \\
 R^9: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_9 = 0.21048
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

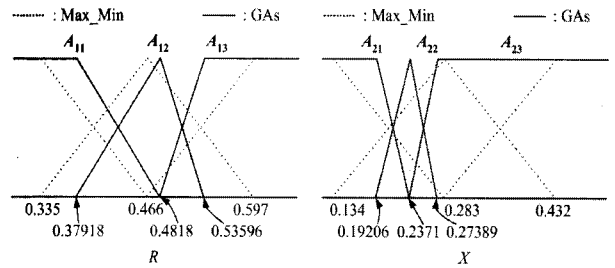


그림 11 내부규칙에서 리액턴스의 멤버십 함수 파라미터  
Fig. 11 Membership function parameters of X for internal rule

$$\begin{aligned}
 R^1: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_1 = -0.27538 + 0.80133R + 0.040249X \\
 R^2: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_2 = -0.094075 - 0.13929R + 1.0064X \\
 R^3: & \text{If } R \text{ is } A_{11} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_3 = -0.56255 + 0.92936R + 1.2626X \\
 R^4: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_4 = -0.66338 + 1.1044R + 1.2444X \\
 R^5: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_5 = 0.9377 - 1.0206R - 1.1439X \\
 R^6: & \text{If } R \text{ is } A_{12} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_6 = -0.31343 + 0.58609R + 1.0026X \\
 R^7: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{21} \text{ then } y_7 = -0.76495 + 1.1446R + 1.3862X \\
 R^8: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{22} \text{ then } y_8 = 0.37397 - 0.76192R + 0.91999X \\
 R^9: & \text{If } R \text{ is } A_{13} \text{ and } X \text{ is } A_{23} \text{ then } y_9 = -0.021654 + 0.12227R + 0.83907X
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

내부 규칙에서 대한 리액턴스 모델의 퍼지규칙은 식 (4)와 같고, 입력변수에 대해 3개의 멤버십 함수와 구조 2의 선형 퍼지추론의 9개 퍼지규칙을 가진다.

#### 4.2 개선된 거리계전 알고리즘

그림 12는 퍼지추론 시스템을 이용해 개선된 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘의 흐름도이다. 본 논문에서 개발한 새로운 거리계전 알고리즘은 계전점에서 추출한 전압과 전류를 입력으로 하여 DC 성분 제거 필터인 FIR 필터와 고조파 제거를 위해 RDFT 알고리즘을 거쳐 거리계전기 임피던스 계산알고리즘에 적용한 후 출력된 임피던스를 퍼지추론 시스템의 최적화 알고리즘에 재입력하여 최종적으로

개선된 임피던스를 재 출력하는 구조를 가지고 있다. 새롭게 개발한 알고리즘은 기존의 거리계전방식에서 문제점으로 지적되었던 접지저항이나 SVL 동작에 의해 나타났던 임피던스 오차를 계전기가 수렴하는 영역을 각각 내부영역과 외부영역으로 입력공간을 분할하고 퍼지추론 시스템의 전반부는 최소자승법으로 최적화하여 동정하며, 후반부는 유전 알고리즘을 적용해 최적화하는 새로운 기법으로 최초로 지중송전계통에서 적용 가능하도록 개발된 거리계전 알고리즘이다.

5. 개선된 거리계전 알고리즘 사례 연구

본 논문에서는 개선된 알고리즘의 검증용 위해 개선 전후의 알고리즘에서 출력되는 임피던스를 비교함으로써 퍼지추론 시스템을 적용해 새롭게 개발한 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘의 성능을 평가하였다.

표 3 ~ 표 5는 접지저항 별 알고리즘 개선 전후의 임피던스를 비교하여 상세히 나타내었다. 표에서처럼 접지저항 변화에 따라 오차의 폭이 증가했던 개선 전과는 달리 모든 경우에서 접지저항에 관계없이 실제값인 계전기가 본 임피던스에 정확히 근접함을 알 수 있다. 여기서, 오차 1은 실제값과 개선 전 임피던스 사이의 오차이며, 오차 2는 실제값과 개선 후 임피던스 사이의 오차이다.

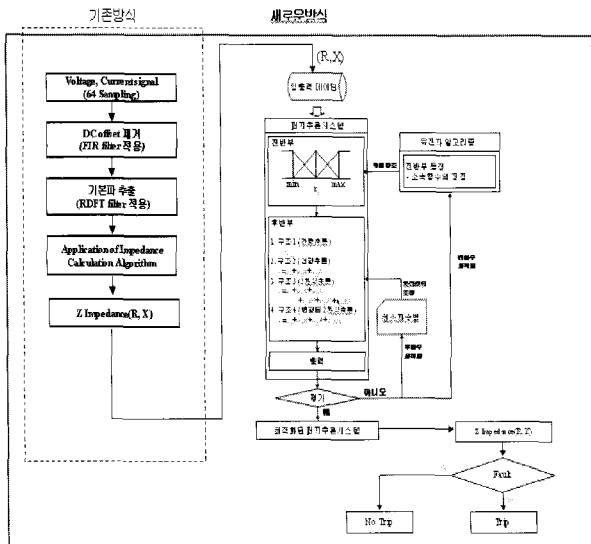


그림 12 개선된 거리계전 알고리즘 흐름도  
Fig. 12 Advanced distance relay algorithm flow chart

6. 결 론

본 논문에서는 지중송전계통 보호를 위한 시스템 구축을 위해 ACI 기법인 퍼지추론 시스템을 도입하여 최초로 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘을 개발하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 문제점

· 지중송전계통에서 지락고장 발생시 고장전류는 시스템 통해 직접접지 지점에서 접지저항에 따라 영상분 전류의 분포가 다르게 나타나며, SVL 동작에 의해 영상분 전류가 불

표 3 계전기 설치점에서의 임피던스(접지저항 : 1Ω)

Table 3 Impedance at the relay point(Earth resistance:1Ω)

고장 위치	고장 위상[°]	실제값	알고리즘 출력값[Ω]				오차1[Ω] [actual-old]		오차2[Ω] [actual-new]	
			R <sub>old</sub>	X <sub>old</sub>	R <sub>new</sub>	X <sub>new</sub>	R	X	R	X
0.9 km	0	R <sub>actual</sub>	0.337	0.225	0.035	0.062	0.3001	0.162	0.0019	0.001
	30	0.0369Ω	0.336	0.224	0.035	0.062	0.2991	0.161	0.0019	0.001
	60	X <sub>actual</sub>	0.336	0.225	0.036	0.063	0.2991	0.162	0.0009	0.000
	90	0.063Ω	0.336	0.224	0.035	0.062	0.2991	0.161	0.0019	0.001
2km	0	R <sub>actual</sub>	0.356	0.280	0.082	0.122	0.274	0.140	0.0000	0.018
	30	0.082Ω	0.356	0.282	0.084	0.125	0.274	0.142	0.0020	0.015
	60	X <sub>actual</sub>	0.356	0.282	0.083	0.125	0.274	0.142	0.0010	0.015
	90	0.14Ω	0.355	0.281	0.082	0.122	0.273	0.141	0.0000	0.018
3km	0	R <sub>actual</sub>	0.377	0.329	0.123	0.203	0.254	0.119	0.0000	0.007
	30	0.123Ω	0.376	0.329	0.124	0.203	0.253	0.119	0.0010	0.007
	60	X <sub>actual</sub>	0.376	0.322	0.117	0.193	0.253	0.112	0.0009	0.017
	90	0.21Ω	0.376	0.321	0.117	0.193	0.253	0.111	0.0009	0.017
4km	0	R <sub>actual</sub>	0.403	0.383	0.164	0.298	0.239	0.103	0.0000	0.018
	30	0.164Ω	0.403	0.382	0.164	0.298	0.239	0.102	0.0000	0.018
	60	X <sub>actual</sub>	0.403	0.382	0.164	0.298	0.239	0.102	0.0000	0.018
	90	0.28Ω	0.403	0.382	0.164	0.298	0.239	0.102	0.0000	0.018
5km	0	R <sub>actual</sub>	0.429	0.432	0.193	0.376	0.224	0.082	0.012	0.026
	30	0.205Ω	0.429	0.431	0.193	0.376	0.224	0.081	0.012	0.026
	60	X <sub>actual</sub>	0.429	0.431	0.193	0.376	0.224	0.081	0.012	0.026
	90	0.35Ω	0.429	0.431	0.193	0.376	0.224	0.081	0.012	0.026

표 4 계전기 설치점에서의 임피던스(접지저항 : 6Ω)

Table 4 Impedance at the relay point(Earth resistance:6Ω)

고장 위치	고장 위상[°]	실제값	알고리즘 출력값[Ω]				오차1[Ω] [actual-old]		오차2[Ω] [actual-new]	
			R <sub>old</sub>	X <sub>old</sub>	R <sub>new</sub>	X <sub>new</sub>	R	X	R	X
0.9 km	0	R <sub>actual</sub>	0.466	0.149	0.0327	0.0475	0.4291	0.086	0.0042	0.0155
	30	0.0369Ω	0.466	0.149	0.0326	0.0474	0.4291	0.086	0.0043	0.0155
	60	X <sub>actual</sub>	0.466	0.149	0.0326	0.0475	0.4291	0.086	0.0043	0.0155
	90	0.063Ω	0.466	0.149	0.0326	0.0476	0.4291	0.086	0.0043	0.0153
2km	0	R <sub>actual</sub>	0.489	0.202	0.083	0.139	0.407	0.120	0.001	0.057
	30	0.082Ω	0.488	0.202	0.083	0.140	0.406	0.120	0.001	0.058
	60	X <sub>actual</sub>	0.489	0.202	0.083	0.140	0.407	0.120	0.001	0.058
	90	0.14Ω	0.491	0.203	0.083	0.142	0.409	0.130	0.001	0.060
3km	0	R <sub>actual</sub>	0.510	0.251	0.123	0.202	0.387	0.041	0.000	0.098
	30	0.123Ω	0.509	0.250	0.122	0.199	0.386	0.040	0.001	0.011
	60	X <sub>actual</sub>	0.509	0.252	0.124	0.204	0.386	0.042	0.001	0.006
	90	0.21Ω	0.511	0.249	0.121	0.199	0.388	0.039	0.002	0.011
4km	0	R <sub>actual</sub>	0.535	0.304	0.166	0.299	0.371	0.024	0.002	0.019
	30	0.164Ω	0.535	0.304	0.165	0.298	0.371	0.024	0.001	0.018
	60	X <sub>actual</sub>	0.535	0.303	0.166	0.298	0.371	0.023	0.002	0.018
	90	0.28Ω	0.535	0.304	0.166	0.299	0.371	0.024	0.002	0.019
5km	0	R <sub>actual</sub>	0.560	0.354	0.206	0.344	0.355	0.004	0.001	0.005
	30	0.205Ω	0.560	0.355	0.207	0.345	0.355	0.005	0.002	0.005
	60	X <sub>actual</sub>	0.560	0.355	0.207	0.345	0.355	0.005	0.002	0.005
	90	0.35Ω	0.560	0.354	0.206	0.344	0.355	0.004	0.001	0.006

규칙적으로 변화하기 때문에 영상전류의 적절한 보상이 어려워 실제 임피던스가 계전기가 바라본 임피던스보다 커지는 현상이 발생한다.

2) 알고리즘 개선 결과

· 지중송전계통에서 발생할 수 있는 오차를 효과적으로 개선하고 계전기 오동작을 예방할 수 있는 퍼지추론 시스템을 이용한 새로운 거리계전 알고리즘을 개발하였다. 새로운 알고리즘은 저항과 리액턴스를 입력으로 하며, 퍼지추론 시스템에서 전반부 파라미터 동정은 Max\_Min 값을 각각 멤버십 함수의 초기 정점으로 설정한 후 유전자 알고리즘으로 최적화 하였으며, 후반부의 파라미터 동정은 최소자승법을 이용해 최적화 하였다.

· 계전기가 보는 임피던스가 수렴하는 공간에서는 내부 규칙을 적용하고 수렴 공간 외에서는 외부규칙을 분할하여 적용함으로써 변화하는 임피던스 궤적에 따라 퍼지추론 시

스택이 유연하게 적용하도록 새로운 입력 공간 분할 방식을 적용하였다.

· 새롭게 개발된 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘은 접지저항에 관계없이 실제값이 계전기가 본 임피던스에 정확히 근접하고 있으며, 기존의 접지저항과 SVL 동작에 의한 오차 요인을 개선하여 지중송전계통에서 정확히 동작하였다.

표 5 계전기 설치점에서의 임피던스(접지저항 : 10Ω)  
Table 5 Impedance at the relay point(Earth resistance:10)

고장 위치	고장 위상[°]	실제값	알고리즘 출력값[Ω]				오차1[Ω] [actual-old]		오차2[Ω] [actual-new]	
			R <sub>old</sub>	X <sub>old</sub>	R <sub>new</sub>	X <sub>new</sub>	R	X	R	X
0.9km	0	R <sub>actual</sub>	0.501	0.145	0.0326	0.048	0.4641	0.082	0.0043	0.015
	30	0.0369Ω	0.501	0.145	0.0326	0.048	0.4641	0.082	0.0043	0.014
	60	X <sub>actual</sub>	0.501	0.146	0.0326	0.050	0.4641	0.083	0.0043	0.013
	90	0.063Ω	0.501	0.145	0.0326	0.049	0.4641	0.082	0.0043	0.014
2km	0	R <sub>actual</sub>	0.524	0.201	0.078	0.127	0.442	0.061	0.004	0.013
	30	0.082Ω	0.524	0.199	0.078	0.127	0.442	0.059	0.004	0.013
	60	X <sub>actual</sub>	0.525	0.198	0.078	0.127	0.443	0.058	0.004	0.013
	90	0.14Ω	0.525	0.200	0.081	0.132	0.4423	0.06	0.001	0.008
3km	0	R <sub>actual</sub>	0.546	0.250	0.122	0.212	0.423	0.04	0.001	0.002
	30	0.123Ω	0.546	0.250	0.122	0.212	0.423	0.04	0.001	0.002
	60	X <sub>actual</sub>	0.550	0.233	0.122	0.213	0.427	0.043	0.001	0.003
	90	0.21Ω	0.546	0.251	0.122	0.214	0.423	0.041	0.001	0.004
4km	0	R <sub>actual</sub>	0.572	0.301	0.163	0.300	0.408	0.021	0.001	0.02
	30	0.164Ω	0.572	0.301	0.163	0.300	0.408	0.021	0.001	0.02
	60	X <sub>actual</sub>	0.572	0.301	0.163	0.300	0.408	0.021	0.001	0.02
	90	0.28Ω	0.572	0.301	0.163	0.300	0.408	0.021	0.001	0.02
5km	0	R <sub>actual</sub>	0.596	0.352	0.205	0.346	0.391	0.002	0.000	0.004
	30	0.205Ω	0.596	0.352	0.205	0.346	0.391	0.002	0.000	0.004
	60	X <sub>actual</sub>	0.596	0.352	0.205	0.346	0.391	0.002	0.000	0.004
	90	0.35Ω	0.596	0.352	0.205	0.346	0.391	0.002	0.000	0.004

참 고 문 헌

- [1] 이재규, "실시간 디지털 거리계전 시스템의 신뢰성 향상", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 2003
- [2] 정창호, "최소자승법을 이용한 송전선로 보호용 디지털 적응형 거리계전기 개발", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 2005
- [3] KEPRI Technical Report, "직접접지계통 송전선로 고저항 지락보호 대책연구(최종보고서)", 1997
- [4] Y. Liao, S. Elangovan, "Digital Distance Relaying Algorithm for First Zone Protection for Parallel Transmission Lines", IEE Proc. Generation, Transmission & Distribution, Vol. 145, No. 5, 1999. 9
- [5] J. A. Williams, P. L. Ostermann, "Underground Transmission Systems Reference Book", EPRI Underground Transmission Program Electrical Systems Division, 1992 Edition
- [6] 한국전력공사 기술연구원, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산 기법 연구(최종보고서)", 1991. 1
- [7] 박건준, "정보 Granules 기반 진화론적 최적화 퍼지추론 시스템의 설계에 관한 연구", 원광대학교 대학원 제어계측공학과 석사학위 논문, 2004
- [8] 박병준, "진화론적 최적 규칙베이스 퍼지다항식 뉴럴네트워크: CI 기술의 합성", 원광대학교 대학원 전기공학과 박사학위 논문, 2002
- [9] 오성권, 박건준, 이동윤, "데이터 정보입자 기반 퍼지추론시스템의 최적화", Korean Institute of Electrical Engineering(KIEE), Vol 53D, No. 6, 2004. 6
- [10] S. K Oh, W. Pedrycz, "Identification of Fuzzy Systems by means of an Auto Tuning Algorithm

and Its Application to Nonlinear System", Fuzzy Sets and Syst., Vol. 115, No. 2, 2000

[11] B. J. Park, W. Pedrycz, S. K. Oh, "Identification of Fuzzy Models with the Aid of Evolutionary Data Granulation", IEE Proc. Control Theory and Applications, Vol. 148, Issue 05, 2001

저 자 소 개



정 체 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2006년~2007년 독일 University of Siegen, Post-doc 연구원. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 송전기술그룹 연구원, Tel : (042)865-7595, E-mail : chekyun@kepri.re.kr



이 중 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수. Tel : (063)850-6735, E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



오 성 권 (吳 聖 權)

1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983~1989년 금성산전연구소(선임연구원). 1993년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996~1997년 캐나다 Manitoba 대학 전기 및 컴퓨터공학과 Post-Doc. 1993~2005년 원광대 전기전자 및 정보공학부 교수 2005년~현재 수원대 공대 전기공학과 교수. Tel : (031) 229-8162 E-mail : ohsk@suwon.ac.kr



박 건 준 (朴 建 俊)

2003년 원광대 공대 전기전자공학부 졸업 2005년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2005~현재 수원대 대학원 전기공학과 박사과정. Tel : (031) 222-6544, E-mail : birds@suwon.ac.kr



이 재 규 (李 在 奎)

1989년~1999년 LG산전연구소 선임연구원, 2003년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학), 1999년~현재 대덕대학 전기과 교수, Tel : (042) 866-0374, E-mail : leejg@ddc.ac.kr