

퍼지추론 시스템을 이용한 지중송전계통 보호용 디지털 거리계전 알고리즘 개발

정채균\* 이종범  
원광대

Development of Digital Distance Relay Algorithm Using Fuzzy Inference System on Underground Power Cable Systems

Chae-Kyun Jung Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - If the fault occurs on the underground power cable system, the fault current on the sheath has the influence on all sections because it's returned through earth at the directly grounded point and operation point of SVL(Sheath Voltage Limiter) at joint box. Therefore, the earth resistance and the operation of SVL have an effect on the zero-sequence current. 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 of the underground power cable systems was developed. It effectively advance the errors using ACI(Advanced Computing Intelligence) technique. In this algorithm, the optimization was performed by fuzzy inference system and genetic algorithm.

1. 서 론

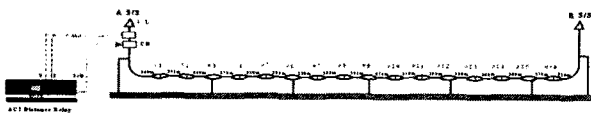
전력계통 보호계전기는 고장상태를 감지하여 차단기를 동작시켜 고장구간을 계통으로부터 분리시키는 기능을 가지며, 거리계전기는 일반적으로 송전선로를 보호하기 위해 사용된다. 거리계전방식은 전압과 전류 데이터로부터 고장점까지의 거리 즉, 임피던스를 측정하여 동작영역과 비교한 후 사고판정을 하는 계전기이다. 송전선로의 단위 길이 당 임피던스는 일정하기 때문에 송전선로상에서 고장이 발생하면 계전기가 바라보는 임피던스가 변화하고 이에 따라 전기적 거리가 변화하는 특성을 이용하여 단계별 보호영역을 설정한다[1-3]. 일반적으로 계전기의 Zone 1 설정치를 85%로 설정하였다면 많은 Zone 1의 내부사고에 대해 거리계전기는 외부사고로 판단하여 트립하지 않는 결과를 가져온다. 따라서 선로의 85% 영역을 보호하지 못하고 85%보다 짧은 영역을 보호하므로 실제 자기 보호영역을 짧게 해버리는 결과를 가져온다. 이를 언더리치 현상이라 한다. 또한 이와 같은 현상은 정상분 임피던스보다는 영상분 임피던스에 의해 많은 영향을 받으며, 영상분 임피던스에 의해 지락고장전류의 크기가 영향을 받으므로 정확히 거리를 측정할 수 없다[1-3].

실제로 지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 가공선로와는 달리 모두 대지로 흘러가지 않고 시스를 통해 전 계통의 직접접지 지점과 SVL 동작 지점에서 대지로 귀로한다. 따라서 직접접지 지점의 접지저항 및 SVL 동작은 고장전류에 많은 영향을 미치며 이로 인해 계전기가 본 임피던스와 실제 고장임피던스 사이에 많은 오차가 발생하여 오버리치 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 영향으로 지중송전계통에서는 거리계전기가 주보호로 활용되지 못하고 현재까지 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘이 개발된 사례가 없다.

따라서 본 논문에서는 오차를 효과적으로 개선하고 계전기 오동작을 예방하기 위한 방안으로 ACI(Advanced Computational Intelligence) 기법인 퍼지추론에 의한 FR-FIS기법을 도입하여 새로운 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘을 개발하였다.

2. 지중송전계통 모델링

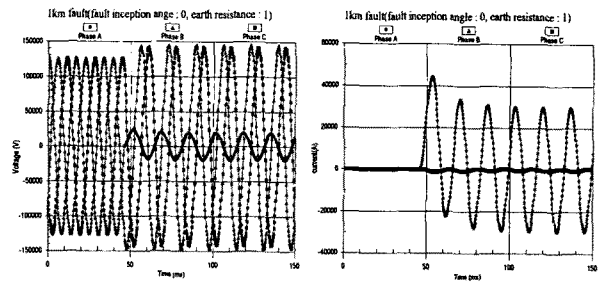
지중송전계통 보호를 위해 새롭게 개발한 디지털 거리계전 알고리즘을 검증하기 위해 현재 국내에서 운전중인 실제통을 EMTP/ATP를 이용해 모델링 하였다. <그림 1>은 거리계전기 알고리즘 테스트를 위한 지중송전선로의 계통도이다. 전원은 154kV 이며, 총 선로길이가 4.952km인 OF 2000mm<sup>2</sup>이 전력구 방식의 정삼각배열로 포설되어 있다. 또한 SVL 결선방식은 교락비접지 방식을 사용하고 있다.



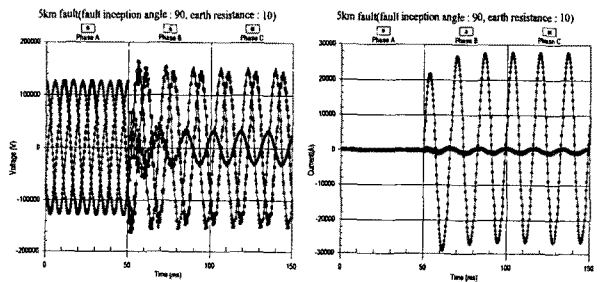
<그림 1> 지중송전계통 계통도

다양한 고장조건 고려를 위해 1선지락 고장위치는 500m 지점부터 5000m

지점까지 매 500m 마다 발생시켰으며, 고장 위상은 0도에서 90도 사이에 매 10도 마다 변화를 주었다. 또한 영상분 전류에 많은 영향을 미치는 접지저항은 1Ω부터 10Ω까지 매 저항 값 마다 고장현상을 분석하여 접지저항에 따른 거리계전기 동작특성을 검토하였다. 고장의 형태는 케이블 도체와 시스 사이에 절연이 파괴되면서 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의하였다. 고장데이터의 샘플링 주파수는 3,840Hz 이다.



<그림 2> 1km 고장시 전압전류 파형(고장위상: 0도, 접지저항: 1Ω)



<그림 3> 5km 고장시 전압전류 파형(고장위상: 90도, 접지저항: 10Ω)

<그림 2>와 <그림 3>은 계전기 설치점에서 고장거리 및 고장위상, 접지저항에 따라 검출되는 전압 및 전류파형의 예를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 고장 위상에 따라 전압 및 전류 파형에 많은 변화가 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 고장위상이 0도인 경우 전류파형에는 다량의 DC성분을 포함하고 있으며 90도로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 또한 전압파형에 나타나는 고조파 함유량은 90도 고장에서 가장 많이 나타남을 알 수 있다.

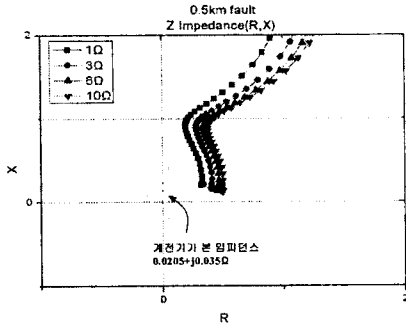
3. 기존 거리계전 알고리즘 사례연구를 통한 문제점 거트

계전기 설치점에서 추출한 전압과 전류는 고장위상에 따라 고조파 및 DC 유효성을 포함하고 있다. 특히 0도 고장에서 전류는 다량의 DC 성분을 포함하고 있으며 90도 고장의 전압에는 많은 고조파 성분을 포함하고 있다. 따라서 FIR 필터는 전류에 포함된 DC 성분을 제거하는데 사용되며, Recursive DFT 알고리즘이 기본과 성분 추출을 위해 활용된다. 이처럼 기존의 거리계전 알고리즘은 지락고장 발생시 계전기 설치점에서 전압과 전류를 샘플링하여 FIR 필터 및 RDFT필터를 거쳐 거리계전 임피던스 계산 알고리즘에 적용 후 계산되어진 값에 따라 고장사에는 차단기로 트립신호를 보내도록 하고 있다[2].

본 논문에서는 <그림 1>의 실제통 모델과 고장조건을 고려하여 1선지락 고장 발생시 기존 거리계전 알고리즘을 검증하였다. <그림 4>는 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 지락고장이 발생한 경우 계전기가 본 임피던스는

0.0205+0.035j이었지만 접지저항이 1Ω시에 알고리즘을 통해 출력한 임피던스는 0.335+j0.213Ω이고, 접지저항이 3Ω인 경우에는 0.407+j0.158Ω, 접지저항이 6Ω인 경우에는 0.462+0.137Ω, 접지저항이 10Ω인 경우에는 0.496+0.134Ω으로 접지저항이 증가함에 따라 실제 임피던스가 계전기가 바라본 임피던스보다 커지는 오버리치 현상이 심해지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다른 고장 지점에서도 동일하게 나타났다.

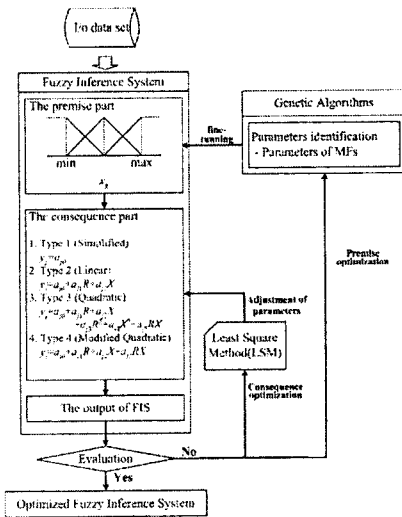


〈그림 4〉 0.5km 고장시 접지저항에 따른 임피던스 궤적

#### 4. 퍼지추론 시스템을 적용한 알고리즘 개발

##### 4.1 퍼지추론 시스템의 최적화

〈그림 5〉는 지중송전계통 보호를 위한 거리계전 알고리즘에 적용한 퍼지추론 시스템의 최적화 과정을 나타낸 것이다. 저항(R)과 리액턴스(X)를 입력으로 하여 전반부에서 입력데이터의 Max\_Min값으로 멤버십 함수를 정의하고 후반부에서 4가지 구조에 대한 모델 출력을 평가한 후 전반부 멤버십 함수의 정점을 유전자 알고리즘을 이용하여 동조하고 후반부 계수를 최소사승법으로 최적화 한다. 또한 전반부에서는 세대수에 따라 성능지수를 평가하여 퍼지추론 시스템을 최적화 한다.

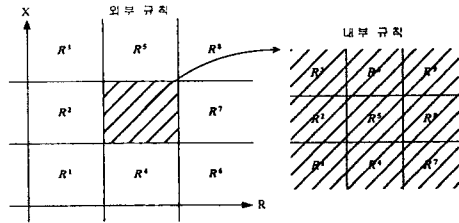


〈그림 5〉 퍼지추론 시스템의 최적화 과정

##### 4.2 퍼지추론 시스템을 이용한 알고리즘 개발 및 검증

〈그림 5〉에서 제시한 최적화 과정은 임피던스가 수렴하는 목표값만 설정하여 적용함으로써 수렴값 내에서의 임피던스는 목표값에 매우 근접하나 그 외의 영역에서는 랜덤한 특성을 보여 실제 임피던스 궤적이 계전기 동작 영역 내를 지나서 수렴하고 있는 것을 확인하였다. 이는 계전기 동작에 있어 오동작을 일으킬 수 있는 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 〈그림 6〉과 같이 계전기가 수렴하는 영역의 내부영역과 외부영역으로 입력공간을 분할하여 퍼지추론 시스템에 적용시킴으로써 문제점을 개선하였다. 즉, 계전기가 보는 임피던스 저항과 리액턴스가 수렴하는 공간에서는 각각 내부 규칙을 적용하고 수렴 공간 외에서는 외부 규칙을 분할 적용함으로써 변화하는 임피던스 궤적에 따라 퍼지추론 시스템이 유연하게 적용하도록 하였다.

본 논문에서는 새롭게 개발된 알고리즘의 검증에 위해 모든 고장조건을 고려하여 개선 전후의 알고리즘에서 출력되는 임피던스를 비교함으로써 퍼지추론 시스템을 적용해 새롭게 개발한 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘의 성능을 평가하였다. 〈표 1〉에서는 성능평가 결과 중 대표적으로 접지저항이 1Ω일 때 계전기 설치점에서의 임피던스 비교 표를 나타내었다. 여기서, 오차 1은 실제값과 기존 알고리즘 임피던스 사이의 오차이며, 오차 2는 실제값과 개발된 알고리즘 임피던스 사이의 오차이다. 표에서처럼 오차



〈그림 6〉 입력공간 분할 방식에 따른 내부 규칙과 외부 규칙

〈표 1〉 계전기 설치점에서의 임피던스(접지저항 1Ω)

고장 위치	고장 위상 [°]	실제값	알고리즘 출력값[Ω]				오차1[Ω]		오차2[Ω]	
			R <sub>old</sub>	X <sub>old</sub>	R <sub>new</sub>	X <sub>new</sub>	R	X	R	X
0.5km	0	R <sub>actual</sub>	0.335	0.213	0.025	0.036	0.3415	0.178	0.0045	0.001
	30	0.0205Ω	0.335	0.213	0.025	0.036	0.3415	0.178	0.0045	0.001
	60	X <sub>actual</sub>	0.334	0.213	0.025	0.034	0.3135	0.178	0.0045	0.001
	90	0.035Ω	0.334	0.213	0.026	0.036	0.3135	0.178	0.0055	0.001
1.5km	0	R <sub>actual</sub>	0.351	0.267	0.071	0.106	0.2895	0.162	0.0095	0.001
	30	0.0615Ω	0.351	0.267	0.071	0.106	0.2895	0.162	0.0095	0.001
	60	X <sub>actual</sub>	0.351	0.267	0.071	0.106	0.2895	0.162	0.0095	0.001
	90	0.105Ω	0.351	0.267	0.071	0.106	0.2895	0.162	0.0095	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	0.356	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	0.0060	0.017
	90	0.21Ω	0.376	0.321	0.117	0.193	0.253	0.111	0.0060	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

의 폭이 증가했던 개선 전과는 달리 개선 후에는 실제값이 계전기가 바라본 임피던스에 정확히 근접하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 모든 접지저항에서도 동일하게 나타나 본 논문에서 새롭게 개발한 지중송전계통 보호용 퍼지추론 시스템을 이용한 거리계전 알고리즘의 우수성을 검증할 수 있었다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘 개발을 위해 퍼지추론 시스템을 적용하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지중송전계통에서 지락고장 발생시 고장전류는 시스를 통해 직접접지 지점에서 접지저항에 따라 영상분 전류의 분포가 다르게 나타나며, SVL 동작에 의해 영상분 전류가 불규칙적으로 변화하기 때문에 영상전류의 적절한 보상이 어려워 오버리치 현상이 나타난다.
- 2) 퍼지추론 시스템을 이용한 새로운 거리계전 알고리즘은 저항과 리액턴스 값을 입력으로 하며, 전반부 동정은 Max\_Min 값을 각각 멤버십 함수의 초기 정점으로 설정한 후 유전자 알고리즘으로 최적화 하였으며, 후반부 파라미터 동정은 최소사승법을 이용하여 최적화 하였다.
- 3) 임피던스 궤적에 따라 퍼지추론 시스템이 유연하게 적용하도록 새로운 입력공간 분할 방식을 적용하였다.
- 4) 새롭게 개발된 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘은 접지저항에 관계없이 실제값이 계전기가 본 임피던스에 정확히 근접하고 있으며, 기존의 오차요인을 개선하여 지중송전계통에서 정확히 동작할 수 있는 새로운 거리계전 알고리즘을 개발하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R 2003 B 274) 주관으로 수행된 과제임

#### 〈참 고 문 헌〉

- [1] Working Group D12 of the Line Protection Subcommittee, "Protective Relaying Considerations for Transmission Lines With High Voltage AC Cables", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 1, pp83-96 Jan. 1997.
- [2] 이재규, "실시간 디지털 거리계전 시스템의 신뢰성 향상", 한양대학교 대학원 전기공학과 박사학위 논문, 2003
- [3] KEPRI Technical Report, "직접접지계통 송전선로 고저항 지락보호 대책 연구" 1997