

ACI 기법을 이용한 지중송전계통 거리계전알고리즘 개발

정 채 균* 이 종 범* 노 석 범* 오 성 권**
*원광대 **수원대

Development of Distance Relay Algorithm Using ACI Technique
on Underground Power Cable System

Chae-Kyun Jung* Jong-Beom Lee* Seok-Beom Roh* Sung-Kwun Oh**
*Wonkwang University **Suwon University

Abstract - In underground power cable system, the apparent impedance at the relaying point can be changed because of the complicated configuration such as the various earth resistance and the operation of sheath voltage limiter (SVL). They have a bad effect on the distance relay operation. Therefore, in this paper, in order to solve this problem, the authors are going to apply the advanced computational technique(ACI) of FR-FIS(Fuzzy Relation-based Fuzzy Inference System).

전원에서 동일 전류가 흐르는 것으로 보아 각 상간의 상호 임피던스 영향을 배제시켜 간략화 시킨 수식으로 다룰 수 있기 때문이다. 또는 이러한 조건이 부합되기 위해서는 시스의 접지 저항이 영이고 크로스본딩이 이상적으로 되어 있다는 가정이 뒷받침 되어야 한다.

시스의 접지저항이 영이고 크로스본딩이 이상적으로 되어 있다고 가정할 케이블의 등가회로에서 정상분 임피던스 계산식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

1. 서 론

최근 전력수요가 해마다 증가하고, 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 있으며, 여러 가지 환경요인으로 인해 지중송전계통의 건설은 점차 증가되고 있다[1].

현재 송전선로에서 디지털 거리계전기는 주보호인 전류차동 계전기의 후비보호로 사용되고 있으며, 거리계전기는 계전기 설치점에서 고장점까지의 선로 임피던스를 정확히 측정하여 이로부터 Zone을 판별하고 트립을 결정하게 된다[2]. 만약 가공송전선로에서 1선지락고장이 발생하면 고장전류는 고장점에서 대부분 방전되기 때문에 고장점까지의 선로 임피던스는 비교적 정확히 측정되며 계전기의 오동작 가능성은 매우 적게 나타난다. 그러나 지중송전계통 구간에서 고장이 발생하면 가공선로와는 달리 계전기에 의해 계산되는 겉보기 임피던스는 실제 임피던스와 많은 오차가 발생하여 거리계전기의 무동작 및 오동작을 유발시키는 원인이 되는 등 계전기 동작의 신뢰성에 많은 문제점이 발생되고 있다[3-5]. 특히 지중송전계통에서 발생하는 지락고장은 케이블의 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되면서 발생하기 때문에 고장전류는 크로스본딩되어 있는 시스를 통해 직접접지 지점이나 절연통보호장치(SVL)를 통해 대지로 방전되게 된다. 따라서 SVL 결선방식 뿐 아니라 접지 저항의 영향을 직접적으로 받게 된다. 그러므로 지중송전계통 보호를 위한 신뢰성 있는 거리계전 알고리즘 개발을 위해서는 위와 같은 오차요인을 극복할 수 있는 신 개념의 계전 기법이 필요하다 할 수 있다.

최근 보호계전 분야에 디지털 거리계전기의 도입과 함께 신경회로망 및 퍼지이론 등을 도입한 새로운 지능형 기법(Advanced Computational Intelligence)을 이용한 계전기 알고리즘이 검토되고 있다. 따라서 본 논문에서는 지중송전계통에서 발생하는 임피던스 오차의 극복과 거리계전기의 신뢰도 향상을 위해 오차가 발생하는 R과 X를 각각 입력으로 하여 이를 보상하는 기법인 FR-FIS(Fuzzy Relation-based Fuzzy Inference System)를 적용해 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘을 검토하였다.

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \left[w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \times 10^3 \right] \quad (1)$$

여기서,

$Z_1(Z_2)$: 케이블 정상(역상)분 임피던스 [Ω/km]

R_c : 도체 교류저항 [Ω/km]

GMR_{1c} : 도체간 기하학적 평균반경 [mm]

$$GMR_{1c} = e^{(-1/4)} \times (d/2)$$

d : 케이블 도체 외경[mm]

GMD_{3c} : 도체간 기하학적 평균거리 [mm]

$$GMD_{3c} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$$

μ_0 : 자유공간의 투자율 [H/m] ($4\pi \times 10^{-7}$)

국내 케이블은 도체를 시스가 감싸고 있고 또한 지락고장은 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되면서 발생하며 고장전류는 시스를 통해 대지로 흐르는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 그림 1과 같이 고장전류가 시스를 통해 대지로 귀로 하는 경우의 등가회로를 이용해 케이블 정상분 임피던스를 계산하였다. 정상분 임피던스는 식 (2) ~ 식 (4)의 Z_{co} (케이블 도체만의 정상분 임피던스), Z_{so} (케이블 시스만의 정상분 임피던스), Z_{mo} (케이블 도체와 시스간 상호임피던스)를 각각 계산한 후 식 (5)를 이용해 계산할 수 있다.

$$Z_{co} = R_c + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3c}} \times 10^3 \right] \quad (2)$$

$$Z_{so} = R_s + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (3)$$

$$Z_{mo} = R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (4)$$

$$Z_0 = Z_{co} - \frac{Z_{mo}^2}{Z_{so}} \quad (5)$$

여기서,

R_e : 등가대지저항 [Ω/km]

R_s : 시스 교류저항 [Ω/km]

GMR_{3s} : 시스의 평균반경 [mm]

GMR_{3c} : 3상 케이블도체 전체를 하나의 단도체로 간주한 경우 그 단도체의 GMR[mm]

D_e : 등가 대지 귀로한 거리 [m]

2. 케이블 임피던스 계산 및 지중송전계통 모델링

2.1 케이블 임피던스 계산

본 논문에서는 케이블의 정상(역상)분 임피던스와 영상분 임피던스로 분리하여 계산식을 제시하고자 한다. 이는 정상(역상)분 임피던스는 등가적인 하나의 상에 대한 해석으로 간략화시킬 수 있으며, 영상분 임피던스를 계산할 경우는 3상이 동일

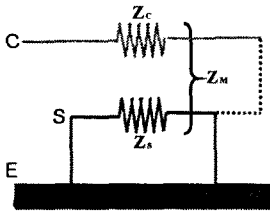


그림 1. 케이블 등가회로

2.2 지중송전계통 모델링

그림 2는 본 논문에서 모델링한 지중송전선로의 계통도를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 전원은 154kV 이며, 총 선로길이는 5.952km 이다. 지중송전케이블은 2000V OF 케이블이 전력구 방식의 정삼각배열로 포설되어 있다. 또한 계전기 설치점에서 2km, 3km, 4km 지점에서 각각 고장용 모의 하였으며 고장 위상도 0, 30, 60, 90도, 접지저항은 1, 3, 6, 10Ω으로 다양하게 적용하였다. 고장의 형태는 케이블의 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되면서 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의하였다. 고장데이터의 샘플링 주파수는 3,840Hz 이다.

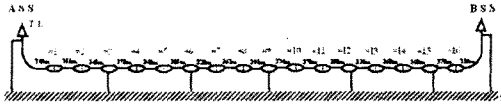


그림 2. 지중송전선로 모델계통도

3. Fuzzy Identification

본 논문에서는 지중송전계통 거리계전 알고리즘의 신뢰도 향상을 위해 FR-FIS(Fuzzy Relation-based Fuzzy Inference System)를 적용하였다. 이와 같은 퍼지시스템의 도입은 조건부의 최적화 문제 해결 능력과 결론부 부분의 추정 능력의 향상을 시킬 수 있다[6].

규칙의 전반부에서는 가우시안과 삼각함수로 국한되나 이 함수들의 파라미터들을 변화시킴으로써 폭 넓은 경우의 수를 포함하게 된다. 또한 규칙의 결론부 동정은 타입의 선택 및 각 함수의 파라미터들을 결정하는 것이다.

규칙이 상수 결론부를 가지는 간략화된 추론 메카니즘의 결론부 부분은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{1i}, \dots, \text{ and } x_k \text{ is } A_{ki}, \text{ then } y = a_i \quad (6)$$

모델의 출력은 식 (7)과 같은 형태로 계산 된다.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i a_i}{\left(\sum_{i=1}^n \mu_i\right)} = \sum_{i=1}^n \mu_i a_i \quad (7)$$

여기서, R^i 는 i 번째 퍼지 규칙이고, x_0 는 입력변수, A_0 는 멤버쉽 함수, a_i 는 상수이다. 또한 n 은 퍼지 규칙의 수를 나타내며 y^* 는 추론 값, μ_i 는 R^i 의 일반화 이다. 만약 전반부의 입력변수와 파라미터들이 결론부에서 주어진다면, 최적화된 결과 파라미터들을 실행 Index가 최소가 되도록 결정할 수 있다. 식 (8)과 같이 실행 Index는 여러 제곱의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I = (I/m) \sum_{i=1}^m (y(k) - y^0(k))^2 \quad (8)$$

여기서, y^0 는 퍼지모델의 출력, k 는 입력변수의 수, m 은 총 데이터 수이다. 또한 $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}, x_{k0}, y_i$ ($i=1,2,3,\dots,m$)은 입력/출력 데이터 집합이며, 후반부 파라미터 a_i 는 최소자승법으로 결정되어진다.

$$\text{Min}_a V(a, m),$$

여기서,

$$V(a, m) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \epsilon_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (y_i - y^0)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [y_i - \sum_{j=1}^m a_j \mu_{ji}]^2$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [y_i - x_i^T a]^2 = \frac{1}{2} \|E\|^2 \quad (9)$$

여기서, j 는 규칙수, i 는 데이터 수, m 은 총 데이터 수, k 는 입력 퍼지 변수의 수를 나타낸다. 식 (9)에서 실행 Index를 구성하기 위해서는 최소자승법을 이용해 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (10)$$

4. 디지털 거리계전 알고리즘

지중송전계통에서 지락고장이 발생하였을 때 고장 임피던스를 계산하기 위한 등가회로는 그림 3과 같다.

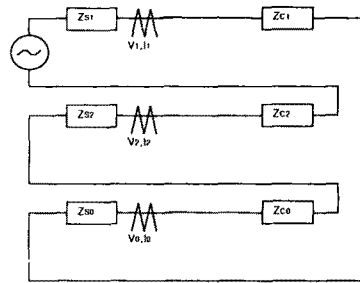


그림 3. 지중송전계통 등가회로

여기서,

- Z_{s0}, Z_{s1}, Z_{s2} : 전원단의 대칭분 임피던스[Ω]
- Z_{c0}, Z_{c1}, Z_{c2} : 지중케이블선로의 대칭분임피던스[Ω/km]
- V_0, V_1, V_2 : 계전기 설치점에서의 측정전압[kV]
- I_0, I_1, I_2 : 계전기 설치점에서의 측정전류[kA]

거리계전기는 전압과 전류 데이터로부터 고장점까지의 거리 즉, 임피던스를 계산하여 동작영역과 비교한 후 고장판정을 하는 계전기로서 지중송전계통에 1선지락고장이 발생하였을 때 계전점에서 측정된 전압과 전류를 이용한 임피던스 계산식은 식 (11)과 같다.

$$Z_{cable} = \frac{V_A}{I_A + I_0 \left(\frac{Z_{c0} - Z_{c1}}{Z_{c1}} \right)} \quad (11)$$

여기서, V_A 는 계전점에서의 측정전압이고, I_A 는 계전점에서의 측정전류이다.

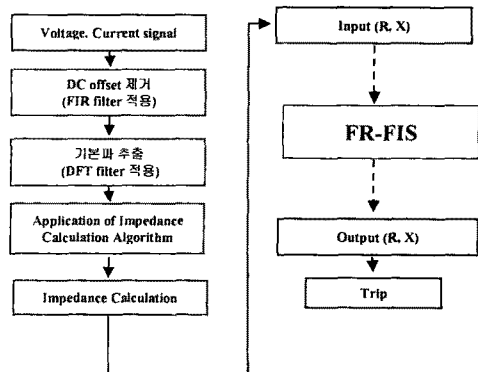


그림 4. 거리계전 알고리즘 흐름도

그림 4에서는 거리계전 알고리즘의 흐름도를 나타내었다. 계전기 설치점에서 추출된 전압과 전류는 고장위상에 따라 고조파 및 DC 성분들을 포함하고 있다. 특히 0도 고장의 전류는 많은 DC 성분을 포함하고 있으며, 90도 고장의 전압 신호에는 다량의 고조파들이 함유되어 있다. 따라서 본 논문에서는 FIR 필터를 통해 DC 성분 제거된 신호에 대해 DFT 필터를 이용하여 기본파를 추출하여 디지털 거리계전 알고리즘에 적용하였다. 그러나 지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 고장점에서 모두 대지로 흘러가지 않고 양단 전원단 및 시스템을 통해 각각 직접접지점으로 분산되어 대지로 방전되는 매우 복잡한 특성을 보인다[5]. 이러한 요인은 실제 계전기가 보는 임피던스 계산시 주요 오차요인으로 작용되며 접지저항 뿐 아니라 절연동보호장치(SVL) 동작 등이 미치는 영향이 매우 크다 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이 오차요인을 극복하는 방법으로 임피던스 계산결과 얻어진 R과 X를 새로운 입력으로 인식하여 거리계전기의 오차를 보상하는 지능형 알고리즘인 FR-FIS(Fuzzy Relation-based Fuzzy Inference System)를 적용하였다.

5. 검토 결과

표 1은 그림 4의 흐름도에서 지능형 기법 도입 이전의 R과 X의 목표치와 계산치 사이의 오차임피던스를 나타낸 것이다. 표에서처럼 접지저항과 고장거리에 따라 발생하는 임피던스 오차의 크기는 R의 경우는 최대 0.4430, X는 최대 0.140으로 매우 크게 나타나고 있다.

표 1. 지능형 기법 적용 이전 오차 임피던스

오차임피던스=abs(목표치-계산치)								
접지저항	1Ω		3Ω		6Ω		10Ω	
고장거리	R	X	R	X	R	X	R	X
2km	0.274	0.14	0.349	0.086	0.407	0.062	0.443	0.061
3km	0.254	0.119	0.328	0.058	0.388	0.041	0.424	0.042
4km	0.239	0.103	0.313	0.046	0.372	0.025	0.408	0.021
평균오차	0.256	0.121	0.33	0.063	0.389	0.043	0.425	0.041

표 2 ~ 표 5는 본 논문에서 제안한 기존의 거리계전알고리즘에서 얻어지는 R과 X를 새로운 입력으로 하여 FR-FIS의 기법을 통해 개선된 임피던스를 출력하는 알고리즘을 적용한 결과로 접지저항별로 나타내었다. 표에서처럼 오차임피던스는 표 1과 비교하여 현저히 감소함을 알 수 있다. 따라서 논문에서 제안한 퍼지시스템을 이용한 지능형 기법의 수렴특성은 우수한 것으로 판명되었으며 지능형 기법을 이용한 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘 개발의 가능성을 보였다.

표 2. FR-FIS 적용 후 오차 임피던스(접지저항:1Ω)

오차임피던스=abs(목표치-계산치)								
고장위상	0°		30°		60°		90°	
고장거리	R	X	R	X	R	X	R	X
2km	0.006	0.012	0.002	0.014	0.0019	0.0145	0.0012	0.0145
3km	0.0005	0.0065	0.000	0.006	0.005	0.015	0.006	0.0165
4km	0.0008	0.018	0.001	0.0179	0.0008	0.0178	0.0006	0.0178

표 3. FR-FIS 적용 후 오차 임피던스(접지저항:3Ω)

오차임피던스=abs(목표치-계산치)								
고장위상	0°		30°		60°		90°	
고장거리	R	X	R	X	R	X	R	X
2km	0.0052	0.001	0.007	0.006	0.007	0.005	0.006	0.0045
3km	0.012	0.006	0.019	0.011	0.0135	0.006	0.0175	0.005
4km	0.019	0.0126	0.019	0.0125	0.019	0.012	0.019	0.0126

표 4. FR-FIS 적용 후 오차 임피던스(접지저항:6Ω)

오차임피던스=abs(목표치-계산치)								
고장위상	0°		30°		60°		90°	
고장거리	R	X	R	X	R	X	R	X
2km	0.003	0.005	0.001	0.002	0.001	0.001	0.0017	0.002
3km	0.0004	0.008	0.001	0.0105	0.000	0.005	0.001	0.012
4km	0.0022	0.019	0.0015	0.0188	0.0016	0.0188	0.002	0.019

표 5. FR-FIS 적용 후 오차 임피던스(접지저항:10Ω)

오차임피던스=abs(목표치-계산치)								
고장위상	0°		30°		60°		90°	
고장거리	R	X	R	X	R	X	R	X
2km	0.0005	0.0055	0.001	0.008	0.004	0.012	0.000	0.008
3km	0.0008	0.002	0.005	0.012	0.000	0.005	0.000	0.005
4km	0.001	0.02	0.0003	0.021	0.001	0.02	0.0005	0.02

6. 결 론

지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 고장점에서 모두 대지로 흘러가지 않고 양단 전원단 및 시스템을 통해 각각 직접접지점으로 분산되어 대지로 방전되는 매우 복잡한 특성을 보일 뿐 아니라 접지저항, 절연동보호장치(SVL) 동작 등으로 인해 결보기 임피던스는 실제 임피던스와 많은 오차가 발생하여 지중송전계통 보호용 거리계전기의 운용 및 개발에 많은 어려움이 있었다.

그러나 본 논문에서 제안한 기존의 임피던스 계산기법으로 얻어진 R과 X를 입력으로 인식하여 지능형 알고리즘인 FR-FIS(Fuzzy Relation-based Fuzzy Inference System)에 적용한 결과 임피던스 오차가 현저히 개선됨을 보여 지중송전계통 보호용 거리계전 알고리즘 개발에 가능성을 보였다. 또한 향후 임피던스 제적의 진동 특성에 대한 검토 등 더욱 명확한 신뢰성 확보를 위한 검토 등이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초조력연
구원(R 2003-B-274) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구" 1991.
- [2] 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.
- [3] 하체용, 이종범, "지중송전케이블용 디지털 거리계전 알고리즘 개선", KIEE, Vol. 49A, No. 12, DEC. 2000.
- [4] J. B. Lee, C. W. Ha, C. H. Jung, "Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power Cables", IEEE PES 2001 SM, 2001. 7.
- [5] 정채균 외4인, "웨이브렛을 이용한 혼합송전선로에서의 거리계전 알고리즘 개선", KIEE, Vol. 52A, No. 10, OCT. 2003.
- [6] SungKwun Oh, Witold Pedrycz, "Identification of fuzzy systems by means of an auto-tuning algorithm and its application to nonlinear systems", Fuzzy Sets and Systems 115, 2000.
- [7] 강상희, 권태원, "최소사승법을 이용한 고속 거리계전 알고리즘" KIEE, Vol. 48A, No. 7, 1999.