

Multi-Agent 송전계통 보호시스템에서의 새로운 거리계전 알고리즘

문현경 진보건 현승호 이승재
명지대학교 NPTC

A Novel Distance Relaying Algorithm in a Multi-Agent Protection System of transmission line

H.K. Moon, B.G Jin, S.H. Hyun, S.J. Lee
Myongji University NPTC

Abstract - This paper presents a distance relaying algorithm for a transmission line protection with MAS. First, the voltage and fault current of the opposite side are represented as a function of those of the measuring end using source voltages of both ends. These voltages are assumed to be obtained from the transformers protecting agents, periodically in normal state. Then, the fault location expression, independent of fault resistance, is derived with voltage and current in only one end of faulted line used. The suggested algorithm is applied to a simple system with two power sources to show its effectiveness.

1. 서 론

전력시스템이 대용량화·고압화됨에 따라 송전계통사고는 계통전반에 큰 파괴효과를 일으켜 안정적인 전력공급을 어렵게 한다. 그러므로 송전계통 사고시 계통의 상황변화에 따라 신속하게 대처하여 파괴효과를 최소화하고 그 원인을 제거해야 한다. 이를 위해 사고검출의 다양화와 신속화, 신뢰성 등에 대한 요구가 크게 증대되었으며 이에 필수적인 디지털보호계전방식이 많이 보급되어 사용되고 있다.[1] 최근에는 인공지능기법인 신경회로망이나 퍼지 논리 등을 도입 적용함으로써 동작속도를 개선하거나 사고 판단이 어려운 사고를 가능하게 하는 등 제한된 보호기능을 보완하거나 최대화하려는 연구가 수행되고 있다.[2]

거리계전방식은 송전선로 보호에서 널리 사용되는 보호방식으로, 보호대상의 임피던스값을 정정하여 계산된 결과가 정정치 이하이면 동작하도록 만든 보호기기이다. 기존의 거리계전알고리즘은 전압전류신호의 기본파 페이저를 추출하여 임피던스를 구하는 직교변환법[3]과 최소자승법[4] 그리고 미분방정식법[5]에 기초한 알고리즘이 있으며 고장저항과 조류의 흐름을 고려한 지능형 거리계전기[6]에 관한 연구도 있었으며 그 외에도 많은 연구가 이루어졌다.[7],[8]

그러나 송전계통에서는 고장거리, 고장위상각, 고장 발생시에 접촉되는 고장저항의 크기 등의 여러 요인에 따라 고장이 다양한 형태로 나타나고 있어 정확한 고장 지점을 판단하기는 어렵다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 앞으로 개발될 송전계통 보호계전 MAS (Multi-Agent System)에 적용될 것이며 이는 계통의 신뢰도를 한층 높여주는 역할을 하게 될 것이다. 제안한 알고리즘은 거리계전 Agent가 변압기 보호 Agent와의 통신을 통하여 전단측 전압(Ea, Eb)을 알고 있으며 계통의 고장유무를 판단하는 시점에서는 상대단의 정보는 사용하지 않고 자단의 전압과 전류(Va, Ia)만을 이용하여 동작하게 된다.

개발된 알고리즘의 검증은 위하여 EMTP를 이용하여 전체거리 100[km]인 송전선을 모의하였으며 만족스러운 결과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 Algorithm

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 송전계통을 그림 1과 같이 모델링하고 해석함으로써 얻어진다. 거리계전 Agent는 변압기 보호 Agent와의 통신을 통하여 송전단측 전압 E_{1abc} 와 수전단측 전압 E_{2abc} 를 알고 있는 것으로 가정한다.

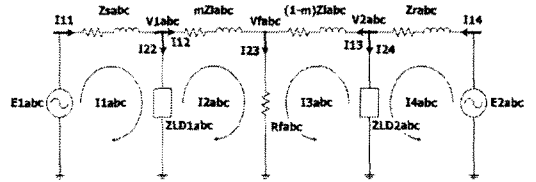


그림 1. 모의 계통도

전압 E_{1abc} , E_{2abc} 는 변압기 보호 Agent와의 통신을 통하여 일정시간마다 Update되고 이 값은 선로 임피던스와 같은 하나의 상수로 취급된다.

상대단 전압 V_{2abc} , I_{3abc} 는 모델회로의 분석을 통하여 현재 계전기가 알고 있는 값(E_{1abc} , E_{2abc} , V_{1abc} , I_{2abc})으로 치환하여 계산한다.

평상시에는 이웃한 Agent와 정보공유를 통하여 전압과 전류등을 취득하고 있지만 실제 고장이 발생하여 고장 판단 시에는 자단의 전압, 전류만을 이용하여 판단하게 되므로 통신속도나 통신실패가 고장 유무 판단에 방해가 되지 않게 된다.

2.1.1 고장거리 판단 알고리즘

그림 1에서 각각의 루프에서 KCL을 적용하여 수식을 전개하면 다음과 같다.

$$E_{1abc} = Z_{sabc} * I_{1abc} + Z_{LD1abc} * I_{1abc} - Z_{LD1abc} * I_{2abc} \quad (1)$$

$$0 = mZ_{labc} * I_{2abc} + R_{fabc} * I_{2abc} + Z_{LD1abc} * I_{2abc} - Z_{LD1abc} * I_{1abc} + R_{fabc} * I_{3abc} \quad (2)$$

$$0 = (1-m)Z_{labc} * I_{3abc} + R_{fabc} * I_{3abc} + Z_{LD2abc} * I_{3abc} - Z_{LD2abc} * I_{4abc} + R_{fabc} * I_{2abc} \quad (3)$$

$$E_{2abc} = Z_{rabc} * I_{4abc} + Z_{LD2abc} * I_{4abc} - Z_{LD2abc} * I_{3abc} \quad (4)$$

여기서,

Z_{labc} : 송전선 전체 임피던스

Z_{LD1abc} : 자단 등가 부하 임피던스

Z_{LDabc} : 자단 등가 부하 임피던스

R_{fabc} : 고장점 임피던스

m : 자단에서 고장점까지의 거리

위의 연립방정식을 이용하여 I_{1abc} , I_{2abc} 와 I_{3abc} 의 관계식을 수립할 수 있다.

식 (1)과 (2)로부터

$$I_{1abc} = (Z_{sabc} + Z_{LDabc})^{-1} \cdot (E_{1abc} + Z_{LDabc} * I_{2abc}) \quad (5)$$

$$I_{3abc} = (R_{fabc})^{-1} [(Z_{LDabc} * I_{1abc}) - (m * Z_{labc} + R_{fabc} + Z_{LDabc}) * I_{2abc}] \quad (6)$$

의 관계식을 연계 되고 식 (5)를 식(6)에 대입하면

$$I_{1abc} = (Z_{sabc} + Z_{LDabc})^{-1} \cdot (E_{1abc} + Z_{LDabc} * I_{2abc}) - (m * Z_{labc} + R_{fabc} + Z_{LDabc}) * I_{2abc} \quad (7)$$

가 되어 I_{3abc} 를 기지값으로 치환할 수 있게 된다.

V_f 를 자단에서의 전압강하와 상대단에서의 전압강하로 표현하면

$$V_f = V_{1abc} - m * Z_{labc} * I_{2abc} \quad (8)$$

$$V_f = (Z_{rabc} * Y_{LDabc} + I) * (E_{2abc} - Z_{rabc} * I_{3abc}) - (1 - m) * Z_{labc} * I_{3abc} \quad (9)$$

여기서,

V_{1abc} : 자단에서의 전압

I : 단위 행렬

Y_{LDabc} : 상대단에서의 부하 어드미턴스

Z_{rabc} : 상대단에서의 소스 임피던스

E_{2abc} : 상대단에서의 소스 전압

위의 두 식을 이용하여 거리 구하는 기본수식을 구한다.

$$0 = [(Z_{rabc} * Y_{LDabc} + I) * (E_{2abc} - Z_{rabc} * I_{3abc}) - (1 - m) * Z_{labc} * I_{3abc}] - (V_{1abc} - m * Z_{labc} * I_{2abc}) \quad (10)$$

수식(10)에 (7)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & V_{1abc} - m * Z_{labc} * I_{2abc} \\ & - (P2 - P3 * (Y_f * F0 + Y_f * P1 - m * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc} - I_{2abc})) \\ & = Z_{labc} * (Y_f * F0 + Y_f * P1 - I_{2abc}) \\ & - m * Z_{labc} * (Y_f * F0 + Y_f * P1 - I) \\ & - m * Z_{labc} * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc} + m^2 * Z_{labc} * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc} \\ & - m * P3 * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc} \\ & - P2 + P3 * (Y_f * F0 + Y_f * P1 - I_{2abc}) \\ & + V_{1abc} - m * Z_{labc} * I_{2abc} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$F0 = Z_{LDabc} * (Z_{sabc} + Z_{LDabc})^{-1} * E_{1abc}$$

$$P1 = ((Z_{LDabc} * (Z_{sabc} + Z_{LDabc})^{-1} * Z_{LDabc} - Z_{LDabc}) * I_{2abc}$$

$$P2 = (Z_{rabc} * Y_{LDabc} + I)^{-1} * E_{2abc}$$

$$P3 = (Z_{rabc} * Y_{LDabc} + I)^{-1} * Z_{rabc}$$

$$Y_f = (R_f)^{-1}$$

식(11)을 거리에 관한 식으로 정리한다.

$$0 = Q0 * m^2 + Q1 * m + Q2 \quad (12)$$

여기서, $Q0 = AA * Z_{labc} * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc}$

$$Q1 = (AA * Z_{labc} * Y_f * (F0 + P1) + AA * Z_{labc} * I_{2abc}$$

$$- AA * Z_{labc} * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc}$$

$$- AA * P3 * Y_f * Z_{labc} * I_{2abc} - AA * Z_{labc} * I_{2abc})$$

$$Q2 = (AA * Z_{labc} * Y_f * (F0 + P1) - AA * Z_{labc} * I_{2abc}$$

$$- AA * P2 + AA * P3 * Y_f * (F0 + P1) - AA * P3 * I_{2abc}$$

$$+ AA * V_{1abc})$$

$$AA = [1 \ 0 \ 0]$$

A상 지락계전기가 보는 거리이므로 각각에 AA를 곱하여 A상에 관한 항만 추출해낸다.

거리에 관한 식을 고장 어드미턴스 값으로 정리한 후 임피던스 값의 성질을 이용하여 각각 실수항과 허수항이 0임을 이용하여 실수항과 허수항에 관한 식으로 나누어 어드미턴스에 대한 항을 제거한다.

$$0 = Y_f * M0 * m^2 + (M1 + (Y_f * M2)) * m + Y_f * M3 + M4 \quad (13)$$

여기서,

$$M0 = (AA * Z_{labc} * I * Z_{labc} * I_{2abc})$$

$$M1 = (AA * Z_{labc} * I_{2abc} - AA * Z_{labc} * I_{2abc})$$

$$M2 = (-AA * Z_{labc} * I * (F0 + P1)$$

$$- AA * Z_{labc} * I * Z_{labc} * I_{2abc}$$

$$- AA * P3 * I * Z_{labc} * I_{2abc})$$

$$M3 = (AA * Z_{labc} * I * (F0 + P1) + AA * P3 * I * (F0 + P1))$$

$$M4 = (-AA * Z_{labc} * I_{2abc} - AA * P3 * I_{2abc}$$

$$+ AA * V_{1abc} - AA * P2)$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

식(13)을 실수항과 허수항으로 나누면

$$0 = Y_f * M0_r * m^2 + (M1_r + (Y_f * M2_r)) * m + Y_f * M3_r + M4_r \quad (14)$$

$$0 = Y_f * M0_i * m^2 + (M1_i + (Y_f * M2_i)) * m + Y_f * M3_i + M4_i \quad (15)$$

(14)식에서 Y_f 를 구하여 (15)식에 대입하면

$$H0 * m^3 + H1 * m^2 + H2 * m + H3 = 0 \quad (16)$$

$$H0 = M1_r * M0_i - M1_i * M0_r,$$

$$H1 = M1_r * M2_i - M2_r * M1_i + M4_r * M0_i - M4_i * M0_r,$$

$$H2 = M1_i * M3_r - M1_r * M3_i + M4_r * M2_i - M4_i * M2_r,$$

$$H3 = M4_r * M3_i - M4_i * M3_r,$$

식(14)에서 구한 $M0_r, M0_i$ 의 값은 0이므로 식(16)의 3차항은 0이 되므로 식은 $H1 * m^2 + H2 * m + H3 = 0$ 으로 표현할 수 있다.

2차 방정식은 근의 공식을 이용하여 쉽게 근이 구해지므로 거리는

$$m = \frac{(-H2 \pm \sqrt{(H2)^2 - 4 * H1 * H3})}{2 * H1} \quad (17)$$

로 표현되어지며, m 은 $0 < m < 1$ 의 값을 가지므로 두 근 중 하나의 값을 취득하여 정확한 거리 측정이 가능하다.

2.3 사례연구

알고리즘의 검증은 EMTP를 사용하였으며 모델계통은 그림2에서 보인 것과 같이 154[kV], 100[km] 1회선 가공 송전선로에서 1선 지락 사고를 모의하였으며 사고위치는 10[km]에서 90[km]까지 10[km]단위로 하였으며 고장저항은 0[ohm]에서 50[ohm]까지 10[ohm]단위로 모의하였다.

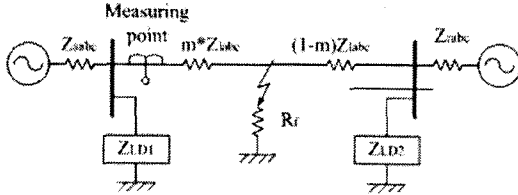


그림 2. 모의 계통도

계통 Data는 다음 표1과 같다.

표 1. 모의 계통 Data

		impedance[ohm]
Z _i	Self impedance	10.8400 + 57.7767i
	Mutual impedance	6.4800 + 23.3267i
Z _s	Self impedance	0.9767 + 6.1033i
	Mutual impedance	0.4467 + 1.9933i
Z _r	Self impedance	1.1767 + 7.1880i
	Mutual impedance	0.5867 + 2.2110i
Z _{LD}	Self impedance	35+15i
	Mutual impedance	0

위의 계통을 이용하여 모의한 결과 다음과 같은 결과를 얻었으며 오차는 식(18)을 이용하여 계산하였다.

$$\left| \frac{\text{real fault distance} - \text{cal fault distance}}{\text{total distance}} \right| * 100 [\%] \quad (18)$$

그림 3은 송전계통에서 1선지락 고장이 발생했을 때 지락거리계전기가 계산하는 고장위치에 대한 계산오차를 나타내었으며 최대오차는 0.22[%]로 매우 정확한 결과를 얻었다.

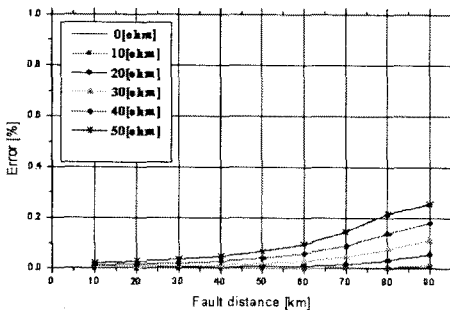


그림 3. 고장지점 계산오차

표 2. 모의 결과 [%]

	고장거리	고장저항					
		0[Ω]	10[Ω]	20[Ω]	30[Ω]	40[Ω]	50[Ω]
고장거리	10[km]	0.0006	0.0001	0.0022	0.0067	0.0132	0.022
	20[km]	0.0009	0.0001	0.0027	0.0081	0.0163	0.0273
	30[km]	0.0011	0.0002	0.0035	0.0104	0.021	0.0352
	40[km]	0.001	0.0003	0.0047	0.0139	0.028	0.0471
	50[km]	0.0006	0.0003	0.0067	0.0196	0.0392	0.0657
	60[km]	0.0002	0.0004	0.0102	0.0293	0.0576	0.0959
	70[km]	0.0015	0.0049	0.0171	0.0465	0.089	0.1451
	80[km]	0.0033	0.0033	0.0312	0.0769	0.1385	0.2151
	90[km]	0.0058	0.0111	0.0554	0.1137	0.1806	0.2538

3. 결론

본 논문에서는 송전계통의 보호에 사용되는 거리계전기의 알고리즘을 제시하였으며 제시한 알고리즘은 고장저항과 고장시 발생하는 영상분전류에 의한 영향을 배제하여 매우 정확한 결과를 보였다.

고장거리와 고장저항을 변화시키며 모의한 결과 0.22%의 오차를 보였다.

앞으로는 개발된 알고리즘을 확장하여 infeed effect에 대한 영향을 배제할 수 있는 알고리즘을 개발할 것이다.

[감사의 글]

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다

[참고 문헌]

- [1] A.T.Johns, S.K. Salman, "Digital Protection for Power Systems", IEE Power Series 15, Peter Peregrinus Lt. 1995.
- [2] S.K. Chakravarthy, C.V. Nayar, N.R. Achuthan, "Applying Pattern Recognition in Distance Relaying" Part1.2. IEE Proc.-C, Vol.139, No.4, pp.301~314, 1992.
- [3] P.G. McLaren, M.A. Redrern "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", PROC.IEE, Vol. 122, No.11, November 1975
- [4] M.S. Sachdev, M.A. Baribeau, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.6 Nov./Kec. 1979
- [5] Y.Ohura, T.Matsuda, M.Suzuki ect. " Digital Distance Relay with Improved Characteristics Against Distorted Transient Waveforms", IEEE Transactions on Power Delicery, Vol.4, No.4, October 1989
- [6] 정창호, 김진오, "송전선로 보호용 디지털 지능형 거리계전기", 대한전기학회 논문지, 50A-9-3, 2001년 9월
- [7] H.Kudo, H.Sasaki, K.Seo, M. Takahashi, K.Yoshida, "Implementation of Digital Distance Relay Using an Interpolated Integral Solution of A Differential Equation", IEEE Trans. on PWRD, Vol.3, No.4, Oct.1998, pp. 1475-1483