

## Agent-Based Distance Relaying Algorithm for Phase-to-Ground Faults

玄升鎬<sup>†</sup> · 陳保建\* · 李承宰\*\*  
(Seung Ho Hyun · Bu Gun Jin · Seung Jae Lee)

**Abstract** - This paper presents a distance relaying algorithm for phase-to-ground faults in transmission lines under Multi-Agent protection environment. In normal condition, a distance relay agent stores the latest states, e.g., voltage of source side, voltage of the opposite side and the loading conditions, etc., through communication between the agents. Once a fault occurs, the relay calculates the fault location using the knowledge about the states just before the fault happens. This stand-alone operation is to improve reliability under the fault condition at which the accuracy or time required for communication may not be guaranteed. The mathematical expression of fault location is derived through loop analysis, before hand, in the manner that both fault current from the opposite end and fault resistance are included implicitly so that their effects are minimized. The suggested algorithm is applied to a typical transmission system with two power sources on both ends to show its effectiveness.

**Key Words** : multi-agent based protection, distance relay algorithm, phase-to-ground fault, stand-alone operation

## 1. 서 론

최근 급속도로 발전한 정보통신 및 컴퓨터 응용기술은 전력계통 각 분야에 새로운 개념의 도입을 가능하게 해 주고 있으며, 계통 보호분야도 예외는 아니다. 보호계전기의 하드웨어를 통일하고 소프트웨어를 달리하여 여러 가지 다른 기능을 수행하게 하는 'universal relay', 또는 하나의 계전기가 다양한 기능을 동시에 수행하게 하여 설비 수를 줄이고 신뢰성을 제고하고자 개발된 개념인 'one-bus-one-relay' 등은 이미 선진국의 관련 기업에서 상용화되었고, GPS(Global Positioning System)를 이용하여 동기화된 데이터를 실시간으로 교환하여 보호계전기의 성능 및 신뢰도를 높이고자 하는 연구 등이 연구되고 있다[1]. 또한, 계전기, PT, CT 등 각종 설비들에 지능을 부여하고 통신을 통하여 다양한 정보를 이용하여 높은 수준의 과업을 수행케 하고자 하는 에이전트(agent) 개념, 그리고 몇 개의 에이전트들이 상호 유기적인 협조를 통하여 시스템 차원의 보호를 수행하게 하고자 하는 Multi-Agent(MA) 보호시스템의 도입[2] 등이 활발히 연구되고 있다.

MA 보호시스템에서는 각 보호기기 에이전트가 고유의 보호동작을 수행함과 아울러, 계통 운영상태의 변화, 인근

보호기기 에이전트가 갖는 계통상황과 기기 동작 등에 대한 정보를 상호 교환함으로써 개별 보호기기의 기본기능의 향상은 물론, 경우에 따라서는 여러 개의 에이전트들이 협력하여 시스템 차원의 판단과 제어가 가능하도록 할 수 있다는 장점이 있다[3]. 또한, 에이전트간의 통신을 확보함으로써 파일럿 계전방식에 비하여 더 정밀한 정보 교환을 통하여 신속하고도 정확한 고장 판별이 가능하고, 하나의 하드웨어에 다양한 보호계전 알고리즘을 장착할 수 있어 기존의 주보호-후비보호 방식에 일대 변화를 도모할 수 있다[3]. 본 논문에서는 이와 같이 MA를 이용한 보호계전기 중에서 송전선 보호를 위한 거리계전 알고리즘을 제안하고자 한다.

일반적으로 거리계전 방식은 고장저항이나 전원 임피던스의 크기, 그리고 부하의 영향 등에 의하여 오차가 발생할 수 있으며, 고장거리, 고장위상각, 고장 발생시에 접촉되는 고장 저항의 크기 등의 여러 요인에 따라 발생하는 다양한 형태의 고장 등은 정확한 고장지점의 판별을 더욱 어렵게 만드는 요인이다. 그리고 선로의 한쪽 정보만을 이용하는 경우, 상대단의 전류에 의한 고장점 전압 상승을 정확히 예측할 수 없기 때문에 오차는 더욱 커지게 된다. 기존의 디지털 거리계전 알고리즘으로는 Fourier 변환을 이용하여 전압-전류의 기본파를 추정하고 이를 이용하여 임피던스를 추정하는 방법[4,5], 최소자승법을 이용하여 기본파 성분을 추출하고 이를 이용하여 임피던스를 추정하는 방법[6,7], 미분방정식을 이용한 방법[8], 패턴인식을 이용한 방법[9], 진행파를 이용하는 방법[10] 등이 제안되었다. 이 외에도 대칭좌표를 사용하지 않고 3상 직접해석방법 통하여 전원측 임피던스의 변화에 강인성을 확보하고자 하는 방안과[11], 병렬회선에서 건전회선과의 전류분포계수를 이용함으로써 정확도를 더욱

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 울산大學校 電氣電子情報시스템工學部 助教授 · 工博

E-mail : takeitez@ulsan.ac.kr

\* 正會員 : 明知大學校 電氣學科 碩士課程

\*\* 正會員 : 明知大學校 電氣學科 教授

接受日字 : 2007年 4月 5日

最終完了 : 2007年 9月 18日

높이기 위한 방법[12,13] 등도 개발되었다.

그러나 단회선의 경우에는 여전히 정확도에 있어 많은 개선의 여지를 남기고 있다. 선로 한쪽의 정보만을 이용하는 단점에 대해서는, GPS가 장착된 PMU를 이용하여 각 보호 기기가 동기화된 정보들을 교환함으로써 매우 높은 정밀도로 고장 위치를 판별할 수 있으나[14], 실시간 정보 교환에 의한 거리계전은 아직 신뢰성을 보장할 수 없는 수준이다. 이는 본질적으로 고장 이전에는 다양한 정보 교환이 가능하지만 고장 직후에 정보 교환에 의한 거리계전 방식은 신뢰성 확보에 어려움을 초래할 수 있기 때문이다.

본 논문에서 제안하고자 하는 MA 거리계전 알고리즘은 정상상태에서는 에이전트간 상호 정보 교환에 의하여 정확한 계통 상태를 인지하고 있으며, 사고발생 시에는 각 계전기 에이전트가 가지고 있는 정보만을 이용하여 고장 이후의 상대단 계통상태를 추정하여 고장위치를 산출하는 방식이다. 즉, 고장 직전까지의 계통상태를 이용하여 고장 이후 stand-alone 방식으로 동작하게 되어 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 본 논문의 2절에서는 MA 보호시스템을 간단히 기술하고, 3절에서 개발된 알고리즘을 수식적으로 유도한다. 4절에서는 모델 송전계통에 대한 EMTP 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 효율성을 살펴보고, 5절에서는 결론과 향후 연구가 필요한 부분을 언급하고자 한다.

## 2. 에이전트 기반 송전계통 보호의 개념

에이전트 및 Multi-Agent(MA)에 대해서는 기존의 많은 연구가 있었으므로 본 논문에서는 상세한 설명을 생략한다. MA를 이용한 송전계통 보호는 각 보호기기들을 에이전트화하는 것을 의미하며, 이는 단순히 기존의 계전기에 지능과 통신기능을 추가한다기보다는 에이전트 기능을 수행할 수 있는 컴퓨터 장치에 송전계통 보호 알고리즘을 장착하고, 필요한 정보들을 스스로, 혹은 인근 에이전트들과의 통신을 통하여 확보하도록 하는 것이라 할 수 있다. 송전선 보호는 기존의 보호계전 알고리즘을 수행할 수 있는 몇 개의 에이전트로 이루어진다. 현재 후보호로 이용되는 pilot 계전방식, 전류나 비율차동 보호방식 등의 기능을 수행하는 에이전트와 후비보호로 이용되는 거리계전 방식의 보호를 수행하는 에이전트, 과전류 보호 에이전트, 기타 몇 가지 종류의 에이전트가 동시에 장착될 수 있다. 여기서 에이전트라 함은 소프트웨어로서는 독립적으로 동작하는 하나의 단위 기능을 의미하며 하드웨어로는 서로 다를 수도 있고 하나의 플랫폼에서 상황에 따라 각기 동작할 수도 있다. 본 논문은 이 중에서 거리계전에 관련된 알고리즘을 제안하고자 하는 것이다.

송전선 보호용 거리계전 에이전트는 평소에는 상호간 정보를 교환하여 자신이 목적하는 보호 능력을 극대화하도록 한다. 그러나 사고가 발생하면 이러한 정보 교환은 보장되지 못한다. 따라서 본 논문에서는 고장이 발생하지 않은 상황에서는 에이전트끼리 일정한 시간간격마다 자유로이 정보를 교환하여, 계통 상태에 대한 동기화된 최신 데이터를 가지고 있는 것으로 간주한다. 그리고 고장 여부는 최신 데이터를 이용, 다음절에 설명될 알고리즘에 따라 지속적으로 판단한

다. 이렇게 함으로써 고장시에 발생할 수 있는 통신장애에 대비하여 stand-alone 방식으로 거리를 판정하므로 기존 방식과 같은 수준의 신뢰성을 확보할 수 있고, 고장 직전의 최신 데이터를 이용할 수 있어 정확도를 향상시킬 수 있다. 제안된 전원 전압 및 부하조건을 고려한 고장거리 판정 알고리즘은 다음 절에 설명하도록 한다.

## 3. MA에 의한 stand-alone 방식의 거리계전 알고리즘

이제 제안하는 거리계전 알고리즘을 수식을 통하여 설명하도록 한다. 표기에 있어 A 벡터는  $\bar{A}$ 로, 행렬A는  $\bar{A}$ 로 각각 구분하기로 한다. 그림 1은 양단에 전원이 존재하는 일반적인 송전선로의 단선계통도이다. 그림에서  $\bar{V}_s, \bar{V}_r$ 은 각각 계전점과 상대단 전압 벡터,  $\bar{E}_s, \bar{E}_r$ 은 계전점 및 상대단의 바로 다음 전원측 모선의 전압 벡터를 각각 의미한다. 그리고  $\bar{Z}_s, \bar{Z}_r$ 은 각각 계전점과 바로 다음 전원측 모선, 그리고 상대단과 다음 전원측 모선 사이의 임피던스 행렬이고,  $L_1, L_2$ 는 각 단에 연결된 부하이며,  $\bar{Z}_1$ 은 선로 임피던스 행렬이다. 지금 선로상에서 계전점으로부터  $m$  떨어진 지점에 고장이 발생한 경우, 고장저항을  $r_f$ 라 하면, 고장점으로부터 자단과 상대단까지의 임피던스 행렬은 각각  $m\bar{Z}_1, (1-m)\bar{Z}_1$ 이 된다. 자단과 상대단 양쪽에서 유입되는 고장전류를 그림과 같이  $\bar{I}_s$ 와  $\bar{I}_r$ 라 한다. 가정에 의하여 계전기는 사고 직전의 모든 전압 및 임피던스 값들을 가지고 있으며, 사고로 판정된 경우에는 계전점 자신의 전압과 전류( $\bar{V}_s, \bar{I}_s$ )의 실제 값을 알 수 있다. 기본적으로 제안된 방법은 사고상에 관계없이 적용할 수 있으며, 앞으로 수식 전개 편의를 위하여 a상 지락사고를 가정하기로 한다.

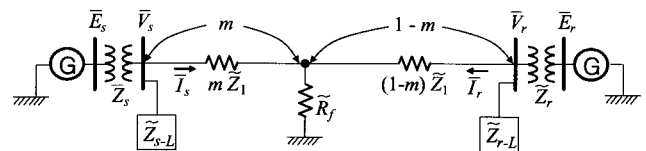


그림 1 송전선로의 단선도

Fig. 1 One line diagram of a transmission system

이제, 고장 직후의 계통상태를 loop 전류 해석을 통하여 추정하도록 한다. 위 그림은 다음 그림 2와 같이 변형할 수 있다. 그림에서  $\bar{Z}_{s-L}, \bar{Z}_{r-L}$ 은 각각 자단 및 상대단측 부하의 등가 임피던스이며,  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  및  $\bar{I}_4$ 는 해석을 위한 loop 전류이다. 여기에서 모든 값은 abc상에 대한 값이며, 편의를 위하여 상 표기는 생략하기로 한다.

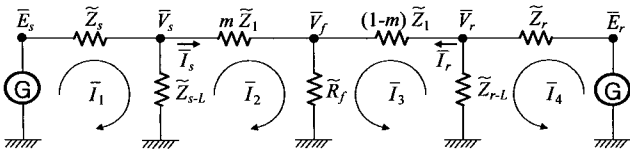


그림 2 loop 해석을 위한 회로  
Fig. 2 Circuit for loop analysis

고장발생시 계전점측 전원전압  $\bar{E}_s$ 는 차단점압  $\bar{V}_s$ 와 고장 전류  $\bar{I}_s$ , 그리고  $\tilde{Z}_s$ 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\bar{E}_s = \bar{V}_s + \tilde{Z}_s \left( \bar{I}_s + \frac{\bar{V}_s}{\tilde{Z}_{s-L}} \right) \quad (1)$$

동일한 방법으로 상대단측 전원전압  $\bar{E}_r$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\bar{E}_r = \bar{V}_r + \tilde{Z}_r \left( \bar{I}_r + \frac{\bar{V}_r}{\tilde{Z}_{r-L}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 상대단 전압 및 전류인  $\bar{V}_r$ ,  $\bar{I}_3$ 를 구하기 위하여 그림 2에서 각각의 루프에서 KVL 및 KCL을 적용하여 수식을 전개하면 다음과 같다.

$$\bar{E}_s = \tilde{Z}_s \bar{I}_1 + \tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_1 - \tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_2 \quad (3)$$

$$0 = (m\tilde{Z}_1 + \tilde{R}_f + \tilde{Z}_{s-L}) \bar{I}_2 - \tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_1 + \tilde{R}_f \bar{I}_3 \quad (4)$$

$$0 = \{ (1-m)\tilde{Z}_1 + \tilde{R}_f + \tilde{Z}_{r-L} \} \bar{I}_3 - \tilde{Z}_{r-L} \bar{I}_4 + \tilde{R}_f \bar{I}_2 \quad (5)$$

$$\bar{E}_r = (\tilde{Z}_r + \tilde{Z}_{r-L}) \bar{I}_4 - \tilde{Z}_{r-L} \bar{I}_3 \quad (6)$$

여기서  $\tilde{R}_f$ 는 고장점의 고장저항 행렬이다.

위의 연립방정식을 이용하여  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$  및  $\bar{I}_3$ 의 관계식을 얻을 수 있다.

식 (1)과 (2)로부터,

$$\bar{I}_1 = (\tilde{Z}_s + \tilde{Z}_{s-L})^{-1} (\bar{E}_s + \tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_2) \quad (7)$$

$$\bar{I}_3 = (\tilde{R}_f)^{-1} \{ (\tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_1) - (m\tilde{Z}_1 + \tilde{R}_f + \tilde{Z}_{s-L}) \bar{I}_2 \} \quad (8)$$

여기서, 식 (7)을 식(8)에 대입하면,

$$\bar{I}_3 = (\tilde{Y}_f) \{ \tilde{Z}_{s-L} (\tilde{Z}_s + \tilde{Z}_{s-L})^{-1} (\bar{E}_s + \tilde{Z}_{s-L} \bar{I}_2) \} - (m\tilde{Z}_1 + \tilde{R}_f + \tilde{Z}_{s-L}) \bar{I}_2 \quad (9)$$

식 (9)는 loop 방정식에서  $\bar{I}_3$ 를 기지의 값인  $\bar{I}_2$ 로 표시한 것으로, 여기서  $\tilde{Y}_f$ 는 고장점의 고장 어드미턴스 행렬이다.

이제,  $\bar{V}_f$ 를 계전기측 모선 및 상대단의 전압과 선로에서의 전압강하를 이용하여 각각 표현해보자.

$$\bar{V}_f = \bar{V}_1 - m\tilde{Z}\bar{I}_2 \quad (10)$$

$$\bar{V}_f = (\tilde{Z}_r \tilde{Y}_{r-L} + \tilde{I}_D) (\bar{E}_2 - \tilde{Z}_r \bar{I}_3) - (1-m)\tilde{Z}_1 \bar{I}_3 \quad (11)$$

여기서,  $\tilde{I}_D$ 는 단위행렬이고,  $\tilde{Y}_{r-L}$ 은 상대단 부하의 어드미턴스 행렬이다.

식(9)의  $\bar{I}_3$ 를 식(11)에 대입하고, 식 (10)과 (11)이 같은 값을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \bar{V}_s - m\tilde{Z}_1 \times \bar{I}_2 \\ & - \{ (\tilde{Z}_r \tilde{Y}_{r-L} + \tilde{I}_D) (\bar{E}_2 - \tilde{Z}_r \bar{I}_3) - (1-m)\tilde{Z}_1 \bar{I}_3 \} \\ & = \tilde{Z}_1 (\tilde{Y}_f \bar{P}_0 + \tilde{Y}_f \bar{P}_1 - \bar{I}_2) \\ & - m\tilde{Z}_1 (\tilde{Y}_f \bar{P}_0 + \tilde{R}_f \bar{P}_1 - \bar{I}_1) \\ & - m\tilde{Z}_1 \tilde{Y}_f \tilde{Z}_1 \bar{I}_2 + m^2 \tilde{Z}_1 \tilde{R}_f \tilde{Z}_1 \bar{I}_2 \\ & - m\bar{P}_3 \tilde{R}_f \tilde{Z}_1 \bar{I}_2 \\ & - \bar{P}_2 + \bar{P}_3 (\tilde{Y}_f \bar{P}_0 + \tilde{Y}_f \bar{P}_1 - \bar{I}_2) \\ & + \bar{V}_s - m\tilde{Z}_1 \bar{I}_2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $\bar{P}_i$ 들은 계산이나 수식 표기상의 편의를 위하여 도입된 항들로 다음과 같이 모두 기지의 값으로 정의되어 있다.

$$\bar{P}_0 = \tilde{Z}_{s-L} (\tilde{Z}_s + \tilde{Z}_{s-L})^{-1} \bar{E}_s$$

$$\bar{P}_1 = (\tilde{Z}_{s-L} \times (\tilde{Z}_s + \tilde{Z}_{s-L})^{-1} \times \tilde{Z}_{s-L} - \tilde{Z}_{s-L}) \times \bar{I}_2$$

$$\bar{P}_2 = (\tilde{Z}_r \times \tilde{Y}_{r-L} + \tilde{I}_D)^{-1} \times \bar{E}_r$$

$$\bar{P}_3 = (\tilde{Z}_r \times \tilde{Y}_{r-L} + \tilde{I}_D)^{-1} \times \tilde{Z}_r$$

식(12)는 a, b, 및 c상이 모두 존재하는 3차원 복소벡터로 이루어진 식이다. 여기서 거리계전기의 관측대상이 되는 상을 제외하면 불필요한 정보이므로, 관심의 대상이 되는 하나의 상에 대한 표현식을 추출하고 이를 실수 m에 대하여 정리하면 결과식은 복소계수를 갖는 실수의 2차 방정식이 되고 그 결과는 다음 식 (13)과 같다.

$$0 = Q_0 \times m^2 + Q_1 \times m + Q_2 \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Q_0 &= \overline{A}_1 \times Z_1 \times Y_f \times Z_1 \times \overline{I}_2 \\ Q_1 &= (\overline{A}_1 \times Z_1 \times Y_f \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1) \\ &\quad + \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2 \\ &\quad - \overline{A}_1 \times Z_1 \times Y_f \times Z_1 \times \overline{I}_2 \\ &\quad - \overline{A}_1 \times P_3 \times Y_f \times Z_1 \times \overline{I}_2 \\ &\quad - \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2) \\ Q_2 &= \{ (\overline{A}_1 \times Z_1 \times Y_f \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1)) \\ &\quad - \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2 - \overline{A}_1 \times \overline{P}_2 \\ &\quad + \overline{A}_1 \times P_3 \times Y_f \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1) \\ &\quad - \overline{A}_1 \times P_3 \times \overline{I}_2 + \overline{A}_1 \times \overline{V}_s \} \end{aligned}$$

여기서,  $\overline{A}_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$

벡터  $\overline{A}_1$ 은 관심이 되는 상만을 추출하기 위한 벡터이며 여기서는 a상을 대상으로 가정하였으므로 위와 같이 정의된다. 이제 (13)식을 실수의 항등식 조건을 이용하면 실수부와 허수부로 나뉘어 두 개의 독립인 식을 얻을 수 있고, 여기서 미지수는 m과 Rf 두 개 이고 나머지는 모두 미리 알고 있는 임피던스이거나 계측된 전압, 전류이다. 따라서 2원 2차 연립방정식을 풀면 거리 m을 구할 수 있다. 식의 표현을 보다 쉽게 하기 위하여 (13)식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$0 = R_f^{-1} \times M_0 \times m^2 + (M_1 + (R_f^{-1} \times M_2)) \times m + R_f^{-1} \times M_3 + M_4 \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} M_0 &= (\overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{\Pi} \times Z_1 \times \overline{I}_2) \\ M_1 &= (\overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2 - \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2) \\ M_2 &= (-\overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{\Pi} \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1) \\ &\quad - \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{\Pi} \times Z_1 \times \overline{I}_2 \\ &\quad - \overline{A}_1 \times P_3 \times \overline{\Pi} \times Z_1 \times \overline{I}_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3 &= \overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{\Pi} \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1) \\ &\quad + \overline{A}_1 \times P_3 \times \overline{\Pi} \times (\overline{P}_0 + \overline{P}_1) \\ M_4 &= -(\overline{A}_1 \times Z_1 \times \overline{I}_2 - \overline{A}_1 \times P_3 \times \overline{I}_2) \\ &\quad + \overline{A}_1 \times \overline{V}_s - \overline{A}_1 \times \overline{P}_2 \\ \overline{\Pi} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

모든  $M_i$ 들은 복소수이므로 이들의 실수부와 허수부를 각각  $M_{i_r}$ ,  $M_{i_i}$ 로 표현하기로 한다. 식(14)를 실수항과 허수항으로 분리하면 다음과 같다.

$$0 = R_f^{-1} \times M_{0_r} \times m^2 + (M_{1_r} + (R_f^{-1} \times M_{2_r})) \times m + R_f^{-1} \times M_{3_r} + M_{4_r} \quad (15)$$

$$0 = R_f^{-1} \times M_{0_i} \times m^2 + (M_{1_i} + (R_f^{-1} \times M_{2_i})) \times m + R_f^{-1} \times M_{3_i} + M_{4_i} \quad (16)$$

(15)식에서  $R_f$ 를 소거하여 (16)식에 대입하면

$$H_1 \times m^2 + H_2 \times m + H_3 = 0 \quad (17)$$

위식에서

$$\begin{aligned} H_1 &= M_{1_r} \times M_{2_i} - M_{2_r} \times M_{1_i} + M_{4_r} \times M_{0_i} - M_{4_i} \times M_{0_r} \\ H_2 &= M_{1_r} \times M_{3_i} - M_{1_i} \times M_{3_r} + M_{4_r} \times M_{2_i} - M_{4_i} \times M_{2_r} \\ H_3 &= M_{4_r} \times M_{3_i} - M_{4_i} \times M_{3_r} \end{aligned}$$

위 식은 실수 m에 대한 2차식이 되므로 2차방정식 근의 공식을 이용하여 근을 구할 수 있다.

$$m = \left| \frac{(-H_2 \pm \sqrt{(H_2^2 - 4 \times H_1 \times H_3)})}{2 \times H_1} \right| \quad (18)$$

따라서 거리는 (18)로 표현되며, m은  $0 < m < 1$ 의 값을 가지므로 두 근중 하나의 값을 취하면 이 것이 고장 위치가 된다.

위의 일련의 과정은 매우 복잡한 수식을 거쳐서 수행되지만 실제 적용에 있어서는 결과식만을 활용하면 되고, 식의 모든 항들이 고장 전에 계전기가 측정이나 통신에 의하여 미리 알고 있는 값들로 이루어지므로 정상시에 계전기가 계산을 수행하고 그 결과를 저장해 놓으면 고장시 계전기가 수행하여야 하는 연산은 많지 않다.

### 4. 사례연구

#### 4.1. 사례연구 결과

알고리즘의 검증은 그림 1과 같은 154[kV], 100[km] 1회선 가공 송전선로에서 1선 지락 사고 모의를 통하여 수행되었다. 모의 계통의 선로임피던스, 부하, 전원측 임피던스 Data는 다음 표 1과 같다.

제안된 알고리즘이 사고 위치와 고장저항에 따라 어느 정도의 정확성을 보여주는 지를 확인하기 위하여 10[km]에서 90[km]까지 10[km]단위로 사고를 가정하고, 각각의 사고에 대하여 고장저항 0[ohm]에서 50[ohm]까지 10[ohm]단위로 존재하는 상황을 가정하여 총 54 경우에 대하여 모의하였다. 고장 모의 데이터는 EMTP 시뮬레이션을 통하여 취득하였으며, 전류 및 전압의 기본파와 웨이퍼를 추출하기 위한 FFT와 제안된 알고리즘의 구현은 MATLAB을 통하여 이루어졌다. 여기서, sample 수는 한 주기당 36개를 취하였다. 그리고, 추정된 고장 위치와 실제 고장위치와의 오차율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\left| \frac{\text{실제고장위치} - \text{추정 고장위치}}{\text{전체 선로길이}} \right| \times 100 [\%] \quad (19)$$

다음 표 2는 각 모의고장에 대하여 제안된 알고리즘이 수행한 고장위치 판정의 오차율을 정리한 결과이다.

#### 4.2. 분석

먼저 전체적인 결과를 살펴 보기로 한다. 표 2에 제시된 결과에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 알고리즘은 100km 송전선로에서 최소 0.001[%]에서 최대 4.2[%]의 오차를 보이고 있고, 거리계전기 zone 1으로 통상 선로 길이의 85%를 취하는 것을 감안한다면 이때는 최대 약 3% 이내의 오차를 갖는다고 볼 수 있다. 참고로 본 논문과 같이 stand-alone 방식의 거리계전 알고리즘을 제안한 참고문헌 [7]에 제시된 결과를 비교하여 보면, 90mile의 선로에 대하여 유사한 방법으로 모의한 결과 zone 1에 대하여 최소 2.6%에서 최대 12.4% 정도의 오차를 보이고 있고, 참고문헌 [13]의 결과에서는 병렬 2회선 선로에서 전류분포계수를 이용할 경우 최대 3% 정도의 오차로 고장 위치를 추정하고 있다. 선로나 기타 데이터가 일치하지 않기 때문에 직접적인 비교는 불가능하지만 제안된 방법이 다양한 운영조건에서도 위에 제시한 오차 범위를 벗어나지 않음을 감안하면 그 타당성을 간접적으로 알 수 있다.

다음으로는 오차의 원인을 분석해 보자. 제안된 알고리즘에서는 고장거리 추정식을 유도하는 과정에서 고장저항이 소거되기 때문에 외형상으로는 고장저항에 대한 영향이 나타나지 않는다. 그러나 고장 전과 후의 상대단 전압 차이는 고장위치와 고장저항이 모두 영향을 주기 때문에 결과적으로 고장저항은 본 연구 결과에 간접적인 영향을 주게 된다. 다음 그림 3은 표 2를 그래프로 도시한 것이다. 이 그림으로부터 고장거리가 계전점에서 멀어질수록 오차가 증가하는 경향은 명백하지만, 고장저항의 크기에 대한 경향은 그렇지

않으며, 오히려 중간지점 이후의 사고에 대해서는 30[Ω], 20[Ω], 40[Ω] 등의 순서로 오차가 큰 경향을 가짐을 볼 수 있다. 반면에 고장저항이 없는 경우는 고장거리가 증가함에 따라 오차도 증가하지만 오차 자체가 매우 작게 나타나고 있다.

표 1 모의 계통 Data

Table 1 System data of the studied system

	구분	impedance[ohm]
Z <sub>1</sub>	Self impedance	10.84 + j 57.78
	Mutual impedance	6.48 + j 23.33
Z <sub>s</sub>	Self impedance	0.98 + j 6.10
	Mutual impedance	0.45 + j 1.99
Z <sub>r</sub>	Self impedance	1.18 + j 7.19
	Mutual impedance	0.59 + j 2.21
Z <sub>s-L</sub>	Self impedance	35+15i
Z <sub>r-L</sub>	Mutual impedance	0

표 2 거리계산 오차 [%]

Table 2 Fault location estimation errors

		고장저항[ohm]					
		0	10	20	30	40	50
고장거리 [km]	10	<b>0.001</b>	0.016	0.014	0.096	0.231	0.424
	20	0.002	0.035	0.014	0.069	0.219	0.440
	30	<b>0.001</b>	0.066	0.061	0.022	0.190	0.449
	40	0.002	0.117	0.140	0.062	0.127	0.437
	50	0.009	0.205	0.279	0.217	0.006	0.373
	60	0.021	0.363	0.537	0.520	0.288	0.187
	70	0.040	0.673	1.054	1.148	0.914	0.303
	80	0.067	1.351	2.180	2.510	2.302	1.496
	90	0.108	2.855	4.052	<b>4.223</b>	3.744	2.718

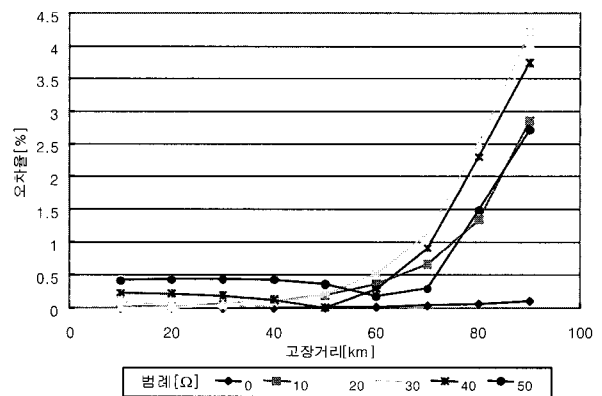
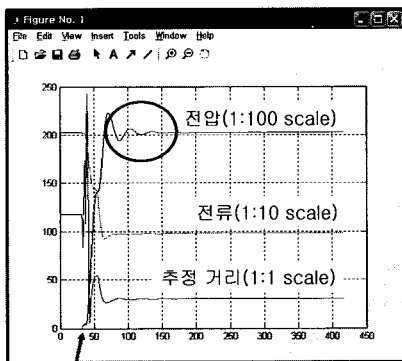


그림 3 거리계산 오차

Fig. 3 Fault location estimation errors

다음은 계전기의 동작 시간에 대하여 살펴보기로 한다. 제안된 알고리즘은 전압과 전류의 phasor를 이용하는 것으로, 반복계산이나 recursion 등, 많은 시간을 요하는 과정이 없기 때문에 거리 추정은 매우 신속하게 완료된다. 본 사례 연구에서의 추정거리 수렴시간은 2~2.5cycle 정도로 나타났다. 이는 거리 추정에 소요되는 시간이 아니라 전압, 또는 전류의 phasor가 수렴하는 데 소요되는 시간으로 사료된다. 다음 그림은 30[km], 20[Ω] 고장시의 전압과 전류 phasor, 그리고 추정거리의 궤적이다. 고장 발생후, 전압과 전류 phasor가 수렴하는 과정에서는 추정거리가 크게 동요하며, 대략 2.5 cycle 부근에서 수렴한다. 여기에서는 전압 phasor의 궤적의 동요에 대한 감쇄가 적어 3 cycle 이상 동요하고 있다. 이에 따라 추정거리도 미세하게 동요하지만 전압의 동요에 비하여 진폭이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 전압과 전류 phasor를 신속하게 추출할 수 있는 방법을 적용한다면 본 알고리즘의 효과를 더욱 높일 수 있을 것으로 사료된다.



사고발생시점

그림 4 30[km], 20[Ω] 고장시의 전압, 전류, 추정거리 궤적  
Fig. 4 Trajectories of voltage, current and estimated fault location in 30[km], 20[Ω] fault

### 5. 결 론

본 논문은 Multi-Agent(MA) 보호계전 환경에서 적용 가능한 거리계전 알고리즘을 제안하였다. 평상시에는 에이전트들의 통신에 의하여 상대단 정보와 전원측 정보를 가지고 있도록 하고, 사고 발생시에는 계전기 동작의 신뢰성을 확보하기 위하여 상대단과의 통신을 차단, stand-alone 방식으로 거리를 계산하도록 하여 신뢰도를 확보하고자 하였다. 이때, 사고 직전의 상대단 정보를 이용하여 고장위치를 추정함으로써 기존의 단독 거리계전방식에 비하여 고장위치 추정의 정확도를 크게 향상하였다. 본 알고리즘은 EMTP를 이용하여 154[kV], 100[km]의 모의 송전선로를 대상으로 검증하였으며, 그 결과 최대 4.2%의 오차를 보였고, 전압과 전류 phasor가 정의되면 매우 신속하게 고장 위치계산을 완료함을 확인하였다. 본 논문과 관련하여 앞으로 에이전트간의 통신과 정보교환, 고장상황 판단에 따른 에이전트들의 동작 논리 등, 운용과 관련된 알고리즘에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2004년 울산대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] P. Moore and P. Crossley, "GPS Application in Power Systems", IEEE Power Engineering Journal, Feb, 1999, pp. 33-39, 1999.
- [2] C. Rehtanz, "Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation", Springer, 2003.
- [3] B. W. Min, K. H. Jung, S. J. Lee, M. S. Choi, S. H. Kang and S. H. Hyun, "An autonomous optimal coordination scheme in a protection system of a power distribution network by using a Multi-agent system", KIEE international transactions on Power Engineering, Vol.2-A, No. 3, pp. 89-94(2002).
- [4] P. G. McLaren, M. A. MaRedern, "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", Proc. of IEE, Vol. 122, No. 11, 1975.
- [5] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part I - Fourier Transform Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1316-1323, 1988.
- [6] M.S. Sachdev, M.A. Baribeau, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.6, 1979.
- [7] A. S. Al-Fuhaid, M. A., Al-Sayed, "A Recursive Least-Square Digital Distance Relaying Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp.1257-1262, 1999.
- [8] Y.Ohura, T.Matsuda, M.Suzuki ect. "Digital Distance Relay with Improved Characteristics Against Distorted Transient Waveforms", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No 4, 1989.
- [9] S.K. Chakravarthy, C.V. Nayar, N.R. Achuthan, "Applying Pattern Recognition in Distance Relaying Part1 2", Proc. of IEE, Vol. 139, No.4, pp.301-314, 1992.
- [10] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Transactions on PWRD, Vol. 9, No. 9, pp. 680-689, 1994.
- [11] Myeon-Song Choi, Seung-Jae Lee, Duck-Su Lee, Bo-Gun Jin, "A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, Issue 1, pp. 35-41, 2004.

- [12] Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Vol. 3, pp. 1344-1349, 2000.
- [13] 이재규, 유석구, "병행 2회선 송전선로에서 고장점 위치추적정보를 이용한 실시간 거리계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 52, No. 3, pp.183-192, 2003.
- [14] M. Kezunovic, B. Perunicic. "Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, Issue 1, pp.441-447, 1996.



**이 승 재 (李 承 宰)**

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 Univ. of Washington 교환교수. 현재 명지대 공대 전기공학과 교수. 주 관심분야 : 전력 계통 지능보호 및 제어, 인공지능의 전력계통 응용, 배전자동화, 변전소자동화

Tel : 031-330-6362  
 Fax : 031-330-6816  
 E-mail : sjlee@mju.ac.kr

**저 자 소 개**



**현 승 호 (玄 升 鎬)**

1962년 10월 30일생. 1991, 서울대학교 공과대학 전기공학과, 1993, 동 대학원 전기공학과(공학석), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996 - 2002년 한국철도기술연구원 책임연구원, 2002 - 2004 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구교수. 2004 - 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수. 관심분야 : 전력계통 지능보호 및 제어, 인공지능의 전력계통 응용

Tel : 052-259-1277  
 Fax : 052-259-1686  
 E-mail : takeitez@ulsan.ac.kr



**진 보 건 (陳 保 健)**

1976년 9월 28일 생. 2000년 명지대 공대 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주 관심분야 : 전력계통 보호 및 제어, 분산전원

Tel : 031-335-2068  
 Fax : 031-330-6816  
 E-Mail : sinato@mju.ac.kr