

신경회로망을 이용한 디지털 거리계전기의 신뢰도 향상

이명수^u, 이재규, 유석구
한양대학교

An Improvement of Digital Distance Relay Reliability using Neural Networks

Myoung-Soo Lee^u, Jae-Gyu Lee, Seok-Ku Yu
Hanyang University

Abstract - Because of the zero sequence mutual coupling of parallel lines, the distance calculation performed by a distance relay is incorrect. To achieve correct operation, the relay has to use not only the measured quantities of faulty line, but also the zero sequence current of healthy line. But the zero sequence current of the healthy line cannot be always measured. Therefore, we propose the neural network method to estimate the zero sequence current and the criterion to determine whether faulty line or not.

1. 서 론

병행 2회선 송전선로에서 1선지락고장시 고장회선과 건전회선의 상호작용(mutual coupling)에 의하여 고장회선의 계전기가 측정된 고장점까지의 임피던스값은 실제 임피던스값보다 더 크게 되므로(under-reach), 계전기가 측정한 전류에 고장회선 영상전류와 건전회선 영상전류를 보상해줌으로써 올바른 임피던스를 측정할 수 있다. 반면에 건전회선측 계전기가 측정한 전류에 고장회선 영상전류를 보상해주면 계전기가 측정된 임피던스값은 실제 임피던스 값보다 더 작게 보이는 결과(over-reach)를 초래한다. 따라서 고장회선의 계전기에는 건전회선 영상전류를 보상해주는 동시에, 건전회선의 계전기에는 고장회선 영상전류를 보상해주지 말아야 계전기의 정확한 동작을 실현 할 수 있다[1]. 그러나 건전회선 영상전류는 항상 측정 가능하지 않으므로 계전기가 건전회선 영상전류를 이용할 수 없을 경우도 있다. 따라서 건전회선 영상전류를 이용할 수 없을 경우 고장회선에 설치된 거리계전기는 건전회선 영상전류를 보상할 수 없어 임피던스 측정의 부정확성이 그대로 상존하므로 이에 대한 대책을 필요로 한다[2].

본 논문에서는 1선지락고장시 판단전원 병행 2회선 송전선로와 양단전원 병행 2회선 송전선로의 고장전류 관계식을 유도한 결과, 건전회선과 고장회선 영상전류는 임피던스에 의해 고장전류가 분배됨을 알 수 있었다. 그러나 건전회선 영상전류를 구하기 위해선 고장점까지의 거리를 알아야 하지만 실제로는 고장점까지의 거리를 구할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 건전회선 영상전류를 신경회로망 알고리즘에 적용하여 추정하였다. 그리고 건전회선의 오동작을 막기 위한 방법으로, 신경회로망에 의해 추정된 건전회선 영상전류와 계전기가 측정한 고장회선 영상전류의 비에서 그 판단기준을 제시하였다. 따라서 건전회선 영상전류를 신경회로망 알고리즘을 이용하여 추정하고, 추정된 값을 사용하여 건전회선과 고장회선의 판단기준을 제시함으로써 거리계전기의 신뢰도를 향상시켰다.

2. 병행 2회선 송전선에서의 거리측정 오차

병행 2회선 송전선에서 1선 지락고장시 계전기 설치점에서 본 고장상의 전압은 식 (1)과 같다.

$$V_{Ry} = x \cdot Z_{IL} \cdot (I_{Ry} + \frac{Z_{OL} - Z_{IL}}{3Z_{IL}} \cdot 3I_0 + \frac{Z_{OM}}{3Z_{IL}} \cdot 3I_{OM}) \quad (1)$$

여기서, V_{Ry} : 계전기가 측정한 전압 (kV/상)
 x : 계전기설치점에서 고장점까지의 거리(km)
 I_{Ry} : 계전기가 측정한 전류 (kA/상)
 I_0 : 고장회선 영상전류 (kA/상)
 I_{OM} : 건전회선 영상전류 (kA/상)
 Z_{OL}, Z_{IL} : 선로의 영상, 정상 임피던스 (Ω)
 Z_{OM} : 선로의 영상 상호 임피던스 (Ω)

식 (1)에서, 1선지락고장시 계전기의 올바른 동작을 위해서 계전전류(I_R)는 다음 식 (2)와 같이 되어야 한다.

$$I_R = I_{Ry} + \frac{Z_{OL} - Z_{IL}}{3Z_{IL}} \cdot 3I_0 + \frac{Z_{OM}}{3Z_{IL}} \cdot 3I_{OM} \quad (2)$$

이 계전전류는 건전회선 영상전류를 요구한다. 그러나 건전회선 영상전류는 항상 측정 가능하지 않으므로 측정 임피던스는 오차를 유발한다.

건전회선 영상전류와 고장회선 영상전류 관계식을 유도하기 위해 그림 1과 2에 각각 판단전원 병행 2회선 송전선로와 양단전원 병행 2회선 송전선로의 영상분 등가회로를 나타내었다.

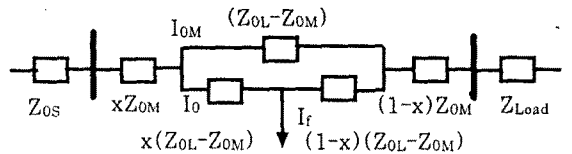


그림 1. 판단전원 병행 2회선 송전선로의 영상분 등가회로

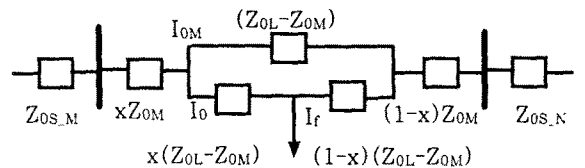


그림 2. 양단전원 병행 2회선 송전선로의 영상분 등가회로

그림 1과 2로부터 건전회선 영상전류와 고장회선 영상전류의 관계를 유도해보면, 다음 식 (3), (4)와 같다.

- 판단전원 병행 2회선 송전선의 경우

$$\frac{I_{OM}}{I_0} = \left[\frac{x(1-x)Z_{OL} + xZ_{Load}}{(1-x)Z_{OL} + (1-x)^2Z_{OM} + (2-x)Z_{Load}} \right] \quad (3)$$

- 양단전원 병행 2회선 송전선의 경우

$$\frac{I_{OM}}{I_0} = \frac{xZ_{OS-N} - (1-x)Z_{OS-M}}{(2-x)Z_{OS-N} + (1-x)(Z_{OL} + Z_{OM} + Z_{OS-M})} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 건전회선 영상전류를 구하기 위해서는 고장거리가 입력변수로 필요한 것을 알 수 있다[2].

따라서, 식 (3), (4)를 이용하여 건전회선 영상전류

고장 거리(km)	1.25 (5%)	2.5 (10%)	7.5 (30%)	12.5 (50%)	17.5 (70%)	18.75 (75%)	20 (80%)	21.25 (85%)
계측된 I _{OM} 을 이용한 경우의 고장 거리(km)	1.2195	2.4384	7.3481	12.3188	17.3703	18.6458	19.9304	21.2252
추정한 I _{OM} 을 이용한 경우의 고장 거리(km)	1.2195	2.4402	7.3481	12.3215	17.3668	18.6521	19.9392	21.2215

표 1. 계측된 I_{OM}을 이용한 경우와 추정한 I_{OM}을 이용한 경우의 고장 거리(편단전원 병행 2회선)

고장 거리(km)	1.25 (5%)	2.5 (10%)	7.5 (30%)	12.5 (50%)	17.5 (70%)	18.75 (75%)	20 (80%)	21.25 (85%)
계측된 I _{OM} 을 이용한 경우의 고장 거리(km)	1.2099	2.4176	7.2685	12.1615	17.1417	18.4094	19.6966	21.0006
추정한 I _{OM} 을 이용한 경우의 고장 거리(km)	1.2099	2.4158	7.2664	12.1625	17.1422	18.4148	19.7036	20.9958

표 2. 계측된 I_{OM}을 이용한 경우와 추정한 I_{OM}을 이용한 경우의 고장 거리(양단전원 병행 2회선)

를 계산할 수 없으므로 곡선적합(curve fitting)과 일반화(generalization)능력이 뛰어난 역전과 신경회로망 알고리즘에 적용하여 건전회선 영상전류를 추정하여 해결하는 방안을 제시한다.

3. 신경회로망을 이용한 건전회선 영상전류의 추정

본 논문에서는 고장회선 영상전류의 실수부와 허수부를 신경회로망의 입력 데이터로 하였고 출력 데이터는 건전회선 영상전류의 실수부와 허수부로 하였다. 입력층 뉴런의 수와 출력층 뉴런의 수는 실수부와 허수부를 위해 각각 2개로 하였다. 은닉층은 1개로 하였으며, 은닉층 뉴런의 수는 8개로 하였다. 이는 경험에 의해 결정하였다. 그리고 은닉층 활성화함수는 비선형 특성을 갖는 sigmoid 함수를 사용하였고, 출력층은 선형 활성화함수를 사용하였다. 입력패턴은 전체 선로길이(25km)의 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95%로 하여 EMTDC로 1선지락고장을 모의한 고장회선 영상전류의 DFT필터를 거친후의 실수부와 허수부로 하였다. 출력패턴도 EMTDC를 이용하여 각 입력패턴에 대한 건전회선 영상전류의 DFT필터를 거친 후의 실수부와 허수부로 하였다. 모멘텀과 적응학습율(momentum and adaptive learning rate)을 이용하여 역전파 신경회로망을 학습하였고, 오차 한계는 1×10^{-4} 으로 하였다. 적응학습율을 사용한 것보다 모멘텀과 적응 학습율을 이용한 학습법이 학습시간이 더 단축되었다[3].

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 154kV 병행 2회선 송전선로에서 건전회선 영상전류 추정에 의한 거리계전기의 신뢰성을 입증하기 위해 송전선로(25km)의 각 5%, 10%, 30%, 50%, 70%, 75%, 80%, 85%지점에 1선 지락 고장을 모의하여 계전기의 동작여부와 특성을 알아보았다. 송전선의 데이터 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{ACSR 636 MCM}(322^{\square}) \text{ 전선} & [4] \\ Z_{1L} = Z_{2L} = 0.1006 + j0.4667 & (\Omega/\text{km}) \\ Z_{0S} = 0.3088 + j1.3094 & (\Omega/\text{km}) \\ Z_{0M} = 0.2082 + j0.6961 & (\Omega/\text{km}) \end{aligned}$$

병행 2회선 송전선로에서 EMTDC로 1선지락고장을 모의하여 계측된 건전회선 영상전류를 이용한 경우의 고장 거리와 1선지락고장시 신경회로망으로 추정한 건전회선 영상전류를 이용한 경우의 고장 거리를 표 1, 2에 비교하여 나타내었다. 표 1은 편단전원 병행 2회선의 경우를, 표 2는 양단전원 병행 2회선의 경우를 각각 나타내었다. 표 1, 2에 나타난 것처럼 계측된 건전회선 영상 전류를 이용한 경우와 신경회로망으로 추정한 경우의 고장거리를 비교해본 결과, 오차가 거의 없으므로 거리계전기의 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

병행 2회선 송전선에서 1선 지락고장시, 고장회선은 고장회선 영상전류와 건전회선 영상전류를 보상하므로써 거리계전기는 정확한 거리측정을 할 수 있다. 그러나, 건전회선에도 고장회선의 영상전류를 보상해

주면 고장회선이 아닌데도 고장회선으로 오판되는 경우가 생긴다. 그 이유는 건전회선 영상전류에 비해 고장회선 영상전류가 매우 크므로, 너무 많은 값이 보상되어 겉보기 임피던스를 실제 임피던스보다 작게 측정해 고장으로 판단하는 경우가 있다. 이런 현상을 overreach라 한다[5]. 따라서, 송전선로에 고장이 발생하면, 그 선로가 건전회선인지 고장회선인지 판단할 수 있는 기준을 찾아야 한다. 본 논문에서는 계전기가 계측한 고장회선 영상전류와 신경회로망으로 추정한 건전회선 영상전류의 관계에서 그 기준을 정했다.

식 (3)의 편단전원 병행 2회선 송전선로의 영상전류관계식에서 부하 임피던스가 선로 임피던스보다 매우 크다고 가정하면 식 (3)은 식 (5)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{|I_{OM}|}{|I_0|} = \frac{x}{2-x} \quad (5)$$

일반적으로 거리계전기의 Zone 1 설정치는 75%에서 85% 사이에서 정정되므로, 판단기준을 정하기 위하여 85%값으로 정정되었다고 하면 $\frac{|I_{OM}|}{|I_0|}$ 의 값은 식 5에 의하여 0.7391이 된다. 실제 계통의 운용상 약간의 여유를 두어 $\frac{|I_{OM}|}{|I_0|}$ 의 비를 0.75로 판단 기준값으로 정한다. 즉, 추정한 건전회선 영상전류와 계전기가 계측한 고장회선 영상전류의 비가 0.75보다 작을 경우만 자회선 고장으로 판정을 하여 타회선 영상전류를 보상하여 임피던스를 계산한다. 이 비(0.75)값이 타당한지를 알아보기 위해 동일도체(ACSR 636MCM(322[□]))에 대해 송전선로 거리를 각각 15km, 20km, 30km와 같이 다르게 해서 시뮬레이션해보고, 동일 거리(25km)에 대해서도 도체의 종류를 각각 ACSR 397.5MCM(201[□]), ACSR 477 MCM(240[□]), ACSR 556.5MCM(280[□])등과 같이 다르게 시뮬레이션해 보았다. 시뮬레이션 결과 역시 같은 값을 얻었고, 그 결과를 표 3, 4에 나타내었다.

도체종류 비율(%)	ACSR 397.5 MCM(201 [□])	ACSR 477 MCM(240 [□])	ACSR 556.5 MCM(280 [□])
75%	0.5824	0.5856	0.5797
80%	0.6503	0.6537	0.6520
85%	0.7255	0.7281	0.7263

표 3. 송전선로 도체종류에 따른 영상 전류의 비 (편단전원 병행 2회선)

선로길이 비율(%)	15km	20km	25km	30km
75%	0.5902	0.5883	0.5862	0.5842
80%	0.6577	0.6562	0.6604	0.6521
85%	0.7317	0.7302	0.7284	0.7269

표 4. 송전선로 길이에 따른 영상 전류의 비 (편단전원 병행 2회선)

식 (4)의 양단전원 병행 2회선 송전선로의 영상전류 관계식에서 해석을 간단하게 하기 위하여 $Z_{\alpha-M}$ 과 $Z_{\alpha-N}$ 을 같다고 하고, Zone1의 설정치를 85%로 정정되었다면 $\frac{|I_{0M}|}{|I_0|}$ 의 비는 0.3853이 된다. 그런데 선로길이가 짧아질수록 식 (4)에서 알 수 있듯이, 선로의 영상임피던스가 작아져서 상대적으로 전원측 영상임피던스의 영향을 많이 받아 영상전류의 비가 증가하게 된다. 따라서 전원측 영상 임피던스의 영향을 고려하여 $\frac{|I_{0M}|}{|I_0|}$ 의 비를 0.45로 한다. 즉, 추정한 건전회선 영상전류와 측정한 고장회선 영상전류의 비가 0.45보다 작을 경우만 자회선 고장으로 판정을 하여 타회선 영상전류를 보상하여 임피던스를 계산하여야 한다. 이 비(0.45)값이 타당한지를 검증하기 위하여, 동일도체 (ACSR 636 MCM(322[□]))에 대해 송전선로 거리를 각각 15km, 20km, 30km와 같이 다르게 해서 시뮬레이션 해보고, 동일 거리에(25km)에 대해서도 도체의 종류를 각각 ACSR 397.5 MCM(201[□]), ACSR 477 MCM(240[□]), ACSR 556.5 MCM(280[□])등과 같이 다르게 시뮬레이션 해보았다. 또한, 전력각을 0°, 10°, 20°, 30° 와 같이 변화시켜 시뮬레이션 해보았다. 시뮬레이션 결과 역시 같은 값을 얻었고, 그 결과를 표 5, 6, 7에 나타내었다.

도체종류 비율(%)	ACSR 397.5 MCM(201 [□])	ACSR 477 MCM(240 [□])	ACSR 556.5 MCM(280 [□])
75%	0.1961	0.1860	0.1943
80%	0.2677	0.2866	0.2653
85%	0.3614	0.3844	0.3595

표 5. 송전선로 도체종류에 따른 영상 전류의 비 (양단전원 병행 2회선)

선로길이 비율(%)	15km	20km	25km	30km
75%	0.2480	0.2329	0.2121	0.1831
80%	0.3311	0.3082	0.2877	0.2701
85%	0.4348	0.4085	0.3860	0.3660

표 6. 송전선로 길이에 따른 영상 전류의 비 (양단전원 병행 2회선)

전력각 차 비율(%)	0°	10°	20°	30°
75%	0.2119	0.2121	0.2124	0.2118
80%	0.2877	0.2877	0.2876	0.2881
85%	0.3853	0.3860	0.3854	0.3859

표 7. 전력각 변화시 영상전류의 비 (양단전원 병행 2회선)

판단기준의 타당성을 입증하기 위해 그림 3, 4에 양단전원 병행 2회선과 편단전원 병행 2회선의 기준설정 전과 후의 고장거리를 나타내었다.

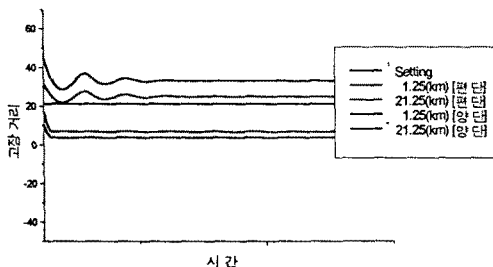


그림 3. 건전회선 계전기가 측정 한 고장거리 (판단기준 설정전)

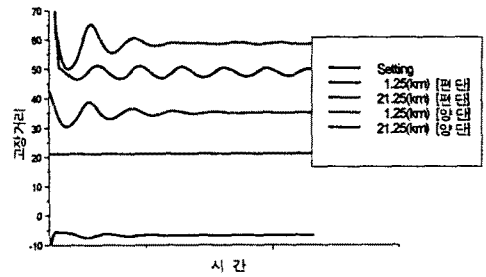


그림 4. 건전회선 계전기가 측정 한 고장거리 (판단기준 설정후)

그림 3은 기준설정 전으로 건전회선에도 고장회선 영상전류를 보상했기 때문에 overreach현상이 나타나 고장이 아닌데도 고장으로 판단하는 오동작이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 기준설정 후로 건전회선측 계전기가 고장회선 영상전류를 보상하지 않았으므로 올바르게 동작함을 알 수 있다. 특히, 양단전원 병행 2회선에서 지근단 고장시 건전회선 영상전류의 방향이 원단 고장일 때의 영상전류 방향과 반대가 되어 고장거리가 음수값이 되지만, 거리계전기 동작시 내부방향 우선회로에 의해 무시되므로 오동작을 하지 않는다. 즉, 판단기준 설정 후에 건전회선에 설치된 계전기가 정확하게 동작하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 병행 2회선 송전선로에서 1선 지락 고장시 거리계전기의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로 첫째, 고장회선에 설치된 거리계전기의 under-reach 현상에 따른 신뢰도 저하를 방지하기 위하여 건전회선 영상전류를 보상해 주므로써 고장거리를 정확히 판단할 수 있다. 그러나 현실적으로 건전회선 영상전류는 항상 측정 가능하지 않기 때문에, 그 대안으로 신경회로망을 이용하여 추정하였으며 건전회선 영상전류를 추정한 경우와 측정한 경우의 고장거리가 거의 일치함을 확인하였다(표 1, 2). 둘째, 병행 2회선 송전선로에서 1선지락고장시, 건전회선에 고장회선 영상전류를 보상해주면 계전기의 overreach 현상으로 계전기가 오동작하기 때문에, 이를 방지하기 위해 신경회로망으로 추정한 건전회선 영상전류와 계전기가 측정한 고장회선 영상전류의 비를 건전회선과 고장회선의 판단기준으로 제시하였다. 이 판단기준이 타당한지를 검증하기 위하여 다양한 계통 조건에서 시뮬레이션한 결과, 판단 기준 설정 후에 건전회선측의 계전기가 정확하게 동작함을 알 수 있었다(그림3, 4). 따라서, 본 논문에서는 병행 2회선 송전선로에서 건전회선 영상전류를 추정하여 거리계전기가 올바르게 동작할 수 있게 하였고, 건전회선과 고장회선의 판단기준으로 건전회선과 고장회선 영상전류의 비를 제시하므로써 거리계전기의 신뢰도를 향상시켰다.

(참고 문헌)

- [1] J. Lewis Blackburn, "Protective Relaying : Principle and application", 2nd edition, Marcel Dekker INC, 1998.
- [2] A. G. Jongepier, L. van der Sluis, "Adaptive Distance Protection of a Double-Circuit Line", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No 1, July 1994 pp. 1289-1297
- [3] Simon Hakin, "Neural Networks : A Comprehensive Foundation", Macmillan, 1994
- [4] 한국전력공사 서울연수원, "보호계전기 실무 I, II".
- [5] CIGRE, "Application Guide on Protection of Complex Transmissions Network Configurations", 1992.