

가공송전선로와 지중송전선로가 연계된 혼합송전선로에서
디지털 거리계전 알고리즘

하 চে웅* 이 종범
원광대학교

A Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Line
Connected with Overhead Line and Underground Cable

Che-Wung Ha Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - This paper describes the digital distance algorithm in case of combined transmission line connected with overhead line and underground cable. Actually as fault is occurred in cable, it results in the complicated phenomena due to the several kind of grounding method in the sheath of cable. Accordingly the impedance. Therefore the correct impedance calculation algorithm is requested in combined transmission line to avoid the wrong trip of relay. This paper presents the development result of impedance calculation algorithm in such transmission line.

행하였고, 가공선로측에 설치된 디지털 거리계전기에 적용할 알고리즘을 대상으로 연구하였다.

2.1 케이블 임피던스 계산

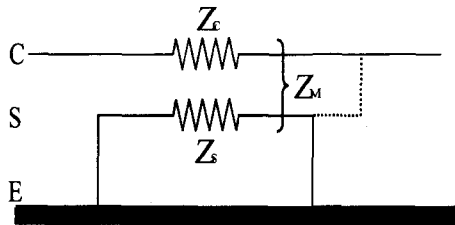


그림 1. 3상 케이블선로의 등가회로

1. 서 론

최근 전력수요는 해마다 증가하고 있으며 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 여러 가지 환경적인 요인에 따라 지중송전 건설은 해마다 증가하고 있으며 이러한 추세는 계속 증가할 것으로 전망되고 있다.

거리계전기의 영상분 보상을 위한 케이블의 대칭분 임피던스는 매설케이블을 등가회로형태로 변환하고 현재 우리 나라의 실제통에서 사용중인 154[kV] 2000[mm²] CV케이블의 전기정수를 사용하여 구하였다.

따라서 지중관련 송전선로 즉 지중송전선로를 포함하여 가공선로와 지중송전선로가 연계된 혼합송전선로에서의 보호계전 요소의 중요성 또한 증대되고 있는 실정인데, 지금까지 송전선로를 보호하기 위한 가장 중요한 계전요소 중의 하나인 거리계전요소는 가공송전선로쪽에 더욱 많은 비중을 두고 발전해 왔다. 하지만 우리 나라 송전선로의 특징은 외국의 송전선로와 달리 선로길이가 짧고 또한 지중선로와 혼합된 경우가 점차 증가하기 때문에 국내의 보호계전기 기술축적과 기술자립도를 확보하기 위해서 가공송전선로와 지중송전선로가 연계된 혼합선로에서의 거리계전기 알고리즘에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

- 도체의 배열 형태 : 삼각배열
- 시스접지 : 다중접지
- 고장 전류 귀로 형태 : 대지와 시스
- 주파수 : 60[Hz]
- 대지 도전율 : 100[Ω · m]

본 논문에서는 혼합송전선로를 완성하고 특히 지중케이블의 시스, CCPU(Cable Covering Protection Unit), 그리고 접속점에서의 크로스본드 방식을 고려하여 실제통과 같은 혼합선로를 EMTP와 ATP Draw를 이용하여 모델링하였다. 이에 따라 거리계전기가 보는 겉보기 임피던스 변화를 보였고 혼합송전선로의 특수성을 고려한 새로운 거리계전 알고리즘을 제시하였다.

- 케이블의 정상 및 역상 임피던스 : Z₁ = Z₂

$$Z_1 = R_C + \sqrt{4} \times \pi \times f \times \ln \left(\frac{GMD_{3C}}{GMR_{1C}} \right) \times 10^{-4}$$

(시스에 전류가 흐르지 않는 경우)

- 케이블 도체만의 영상 임피던스 : Z_{0c}

$$Z_{0c} = R_C + R_E + \sqrt{3} \times 4 \times \pi \times f \times \ln \left(\frac{D_E}{GMR_{3C}} \right) \times 10^{-4}$$

- 케이블의 시스만의 영상 임피던스 : Z_{0s}

$$Z_{0s} = R_S + R_E + \sqrt{3} \times \pi \times 4 \times f \times \ln \left(\frac{D_E}{GMR_{3S}} \right) \times 10^{-4}$$

- 케이블 도체와 시스간의 상호 임피던스 : Z_{0m}

$$Z_{0m} = R_E + \sqrt{3} \times \pi \times 4 \times f \times \ln \left(\frac{D_E}{GMR_{3S}} \right) \times 10^{-4}$$

- 케이블의 영상 임피던스 : Z₀

$$Z_0 = Z_{0c} - \frac{Z_{0m}^2}{Z_{0s}}$$

2. 혼합송전선로에서의 임피던스 계산 알고리즘

혼합송전선로에 대한 디지털 거리계전기의 적용에 있어서 계전기가 보는 임피던스 알고리즘은 4가지 경우가 고려되어야 된다. 즉 가공선로와 지중선로가 연계된 혼합선로에 설치된 계전기에선 가공에서의 고장시 적용해야 될 알고리즘과 혼합선로의 지중쪽의 고장시 적용해야 될 알고리즘 그리고 반대형태의 혼합선로에 적용해야 될 알고리즘 형태 2가지로 나뉘어서 적용해야 된다. 가공 14[km]와 지중 6.12[km]의 선로에 대하여 연구를 진

여기서 f : 주파수[Hz]
 R_C : 교류 도체 저항[Ω/km]
 R_S : 시스 저항[Ω/km]
 R_E : 등가 대지 저항[Ω/km]
 D_E : 대지위로 등가 깊이[mm]
 GMD_{3C} : 도체간 기하학적 평균거리[mm]
 GMR_{3S} : 시스의 평균반경[mm]
 GMR_{1C} : 도체간 기하학적 평균반경[mm]
 GMR_{3C} : 3상 케이블도체 전체를 하나의 단도체로 간주한 경우 그 단도체의 GMR [mm]

위의 계산결과 아래 표 1에 혼합송전선로의 알고리즘에 적용할 지중선로와 가공선로의 대칭분 임피던스를 나타내었다.

표 1. 지중선로 및 가공선로 임피던스

지중선로 임피던스	R[Ω/Km]	X[Ω/Km]
영상	0.04045	0.08277
정상	0.01191	0.14633
역상	0.01191	0.14633
가공선로 임피던스	R[Ω/Km]	L[Ω/Km]
영상	0.17929	0.93322
정상	0.04198	0.32514
역상	0.04198	0.32514

2.2 혼합송전선로에서 디지털 거리계전 알고리즘

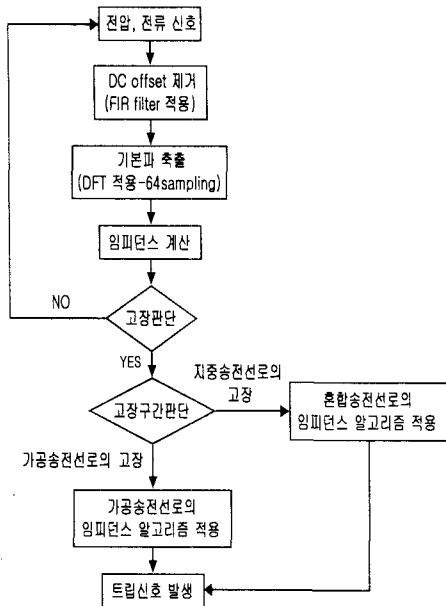


그림 2. 디지털 거리계전 알고리즘의 흐름도

그림 2의 디지털 거리계전 알고리즘 흐름도에서 알 수 있듯이 기존의 알고리즘은 가공송전선로의 고장에 적절한 동작이 이루어지도록 할 수 있지만 만일 지중선로 쪽에서의 고장이 발생할 때에는 케이블 선로의 임피던스가 가공선로와는 다르고 또 각종 케이블 시스템의 변화요인에 의하여 가공선로에 적용되는 알고리즘에 의

한 계산에 있어서 오차가 발생하여 고장구간의 증대와 정전의 광역화가 일어날 위험성이 있다. 따라서 그림 2에서 설명한 것처럼 고장구간 판단에 의한 혼합송전선로의 임피던스 알고리즘을 제시하였다.

2.3 혼합송전선로의 등가회로

그림 3은 가공송전선로와 지중송전선로가 연계된 혼합선로에서 부하가 없는 경우 지락사고의 등가회로를 나타낸 것이다.

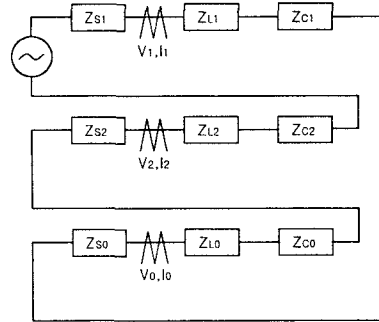


그림 3. 혼합송전선로에서의 지락사고 등가회로(무부하시)

여기서

- S_0, S_1, S_2 : Source의 대칭분 임피던스
- V_0, V_1, V_2 : 계전기 설치점의 대칭분 전압
- I_0, I_1, I_2 : 계전기 설치점의 대칭분 전류
- Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2} : 가공송전선로의 대칭분 임피던스
- Z_{C0}, Z_{C1}, Z_{C2} : 지중송전선로의 대칭분 임피던스

2.4 혼합송전선로의 정상 임피던스의 계산

계전기에서 측정된 고장 전압과 전류를 이용하여 지중송전선로 앞단의 전압을 계산하고 계산값을 이용하여 케이블만의 고장 임피던스를 계산하여 가공선로의 전체 임피던스와 지중송전선로의 고장구간까지의 임피던스를 더하는 형식의 알고리즘을 제시하였다.

- 계전기 설치점에서의 정상분 임피던스 : Z_L

$$Z_L = \frac{V_R}{I_R + I_0 \cdot \left(-\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \right)} \quad (1)$$

- 케이블 앞단의 전압 : V_{LT}

$$\begin{aligned} V_{L1} &= V_R - Z_{LT1} \cdot I_1 \\ V_{L2} &= -Z_{LT2} \cdot I_2 \\ V_{L0} &= -Z_{LT0} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{LT} &= V_{L0} + V_{L1} + V_{L2} \\ &= V_R - Z_{LT1} \cdot I_R + (Z_{LT1} - Z_{LT0}) \cdot I_0 \end{aligned} \quad (3)$$

- 케이블 선로만의 정상분 임피던스 : Z_C

$$Z_C = \frac{V_{LT}}{I_R + I_0 \cdot \left(-\frac{Z_{C0} - Z_{C1}}{Z_{C1}} \right)} \quad (4)$$

- 혼합선로에서 고장지점까지의 정상분 임피던스 : Z_T

$$Z_T = Z_L + Z_C \quad (5)$$

여기서

- V_R : 계전기 설치점의 전압[kV]
- I_R : 계전기 설치점의 전류[kA]
- I_0 : 계전기 설치점의 영상전류[kA]
- $Z_{L0, L1}$: 가공선로의 영상분 및 정상분 임피던스[Ω/km]
- $Z_{LM, LN, LT}$: 가공선로 길이의 대칭분 임피던스[Ω]
- $Z_{0, C}$: 지중선로의 영상분 및 정상분 임피던스[Ω/KM]

3. 실제계통 모델링 및 보상값 제시

혼합선로에서 새로운 디지털 거리계전 알고리즘에 의한 계산값과 실제값과의 오차를 비교하기 위하여 EMTP의 graphical program인 ATP Draw를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

3.1 계산값과 실제값과의 비교

2.2절에서 구한 알고리즘을 이용하여 가공선로와 지중선로가 연계된 선로의 모델을 완성한후 계전기 설치점에서의 계산값과 실제값을 비교하였다. 비교에 사용된 혼합선로 모델에서 지중선로의 시스는 완전 크로스분당이 되어있고 접지저항은 0[Ω]이라고 가정하고 모의하였다.

표 3. 거리계전기 설치점의 측정 임피던스

고장 거리 (km)	고장 구간	계전기 설치점에서의 임피던스					
		계산값[Ω]		실제값[Ω]		오차(%)	
		R	X	R	X	R	X
3	가공	0.1258	0.9738	0.1259	0.9754	0.08	0.17
7	가공	0.2936	2.2722	0.2938	2.2760	0.08	0.16
11	가공	0.4613	3.5720	0.4618	3.5765	0.11	0.13
16	지중	0.6262	4.9617	0.6115	4.8446	2.40	2.42
18	지중	0.6615	5.2624	0.6353	5.1373	4.41	2.44
20	지중	0.6675	5.4759	0.6591	5.2994	1.26	3.22

표 3에 나타난 바와 같이 혼합송전선로에서의 1선 지락사고가 발생하였을 때 각 거리에 따른 새로운 알고리즘 적용과 그에 따른 오차발생률이 낮은 수치임을 알 수 있다. 하지만 실제의 지중선로는 가공에서와는 달리 전류가 흐르는 도체를 시스가 감싸고 있고, 시스의 크로스분도방식과, CCPU의 동작 그리고 접지저항 등에 따라서 거리계전기의 결보기 임피던스의 값을 변화시킴에 따라 적절한 보상값을 적용시켜 줘야 한다. [2]

3.2 실제 모델계통 및 보상값 제시

모델에 사용된 계통은 양단전원에서 154[kV] 전압이 인가되는 실제계통으로서 공장은 가공송전선로 14[km] 지중송전선로 6.12[km]이며, 지중선로 전체 18구간은 모두 전력구 방식으로 매설되어 있다. 또한 매설형태는 선로를 세구간으로 나누어 두 개의 구간은 크로스분도를 하였고, 세 번째 구간은 직접접지한 형태로 모델을 완성하였다. 그리고 방식층 보호장치인 CCPU의 설치는 계

이들의 인입구와 인출구 3구간에 대지간 접지방식을 사용하였고 그외의 구간은 교락비접지방식을 사용하였다. 케이블에서 도체와 시스간의 절연이 파괴 되는 지락고장 시 고장전류는 시스의 양단으로 흐르게 되고 또한 크로스분도가 되어있는 다른상에도 흐르게 된다. 그리고 CCPU의 동작여부에 따라 고장전류는 CCPU와 각 직접접지 지점으로 흐르게 된다. 이러한 복잡한 지중케이블 시스템에 적용할 정형화된 수식을 제시하기엔 어려움이 있어 많은 실험을 통하여 가장 적절한 보상값 α 를 제시하였다.

표 4는 2.4절에서 구한 새로운 형식의 거리계전기 알고리즘을 이용하여 혼합송전선로중 지중선로쪽에서의 1선지락고장이 발생했을 때 α 의 보상을 고려한 계산값과 실제값과의 오차를 나타내었다. 표 4에서 제시한 접지저항값은 각 직접접지와 CCPU의 접지저항을 나타내는 것이다.

표 4. 거리계전기 설치점의 측정 임피던스

고장 거리 (km)	접지 저항 [Ω]	계전기 설치점에서의 임피던스							
		계산값[Ω]		보상값 α		정정값		오차(%)	
		R	X	R	X	R	X	R	X
16	1	1.3955	6.3203	0.7857	1.6020	0.6098	4.7183	0.28	2.61
	10	4.1814	6.7417	3.5867	2.0839	0.5947	4.6578	2.75	4.01
18	1	1.4186	6.6813	0.7857	1.6020	0.6329	5.0793	0.38	1.13
	10	4.2194	7.1270	3.5867	2.0839	0.6327	5.0431	0.41	1.87
20	1	1.4489	7.2162	0.7857	1.6020	0.6632	5.6142	0.62	5.94
	10	4.2653	7.6634	3.5867	2.0839	0.6786	5.5795	2.96	5.29

4. 결 론

본 논문에서는 혼합선로에 적용할 디지털 거리계전기 알고리즘을 기존의 가공 송전선로에 적용하고 있는 방식과 함께 지중송전선로에서의 고장시 케이블 앞단의 고장 전압을 계산하여 지중송전선로의 고장이 발생했을 때에도 적절한 임피던스 계산과 혼합송전선로에 있어서의 적절한 보호방법을 제시하였다. 그리고 EMTP 및 ATP Draw를 사용하여 혼합송전 선로를 등가모델과 실제계통으로 나누어서 제시한 알고리즘의 정확성을 테스트 하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 가공송전선로가 60% 이하인 경우에는 적용이 가능하다. 그리고 현재 개발중인 혼합송전선로에서의 고장구간에 대한 판별 알고리즘이 완성되면 혼합송전선로의 전체 구간에 대한 새로운 알고리즘의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [2] 하재용, 이종범, 정창호 "지중송전케이블에서의 디지털 거리계전기 알고리즘 적용", 대한전기학회 춘계 학술발표회 PP. 15-17. 2000. 5.
- [3] B. Gustavsen, J. Sletbak, "Transient Sheath Overvoltage in Armoured Power Cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp 1594-1600 July 1996.
- [4] E. O. Schweitzer, "A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience", System Protection Seminar, 1990. 8