

송전선로의 고장점 검출방법에 관한 연구

(A Study on the Fault Location Algorithms on Transmission Line)

송명곤* · 오용택**

(Myoung-Gon Song · Yong-Taek Oh)

Abstract

Most faults that occur on transmission lines are caused by extreme weather with lightning storms in the distance. These are not only prolongs the time of removing and recovering, but also increases economical damages. If faults can be precisely located, maintenance crews can reach them quickly, and remove the faults in time. So, the precise locating of the faulted point on a transmission line is very important to improve the system reliability, and decreases economic damages as an inherent consequence of long term outages. Also, fault location methods are becoming of much importance for utilities and research.

In this paper, two single-terminal impedance-based fault location techniques will be investigated to show the reliability and evaluated the performance of reactance and Takagi method by using MATHCAD program simulations.

Key Words : Fault Location, MATHCAD, Program Simulation, Transmission Line

1. 서 론

송전선로의 전기사고는 검출되어지고 보호 시스템 장비에 의해 차단되어야 하며 신속하고 정확하게 고장점이 검출될 수 있다면 고장시간은 감소된다.

고장점 검출의 중요성은 산악지대인 장거리 송전선로에서 전력계통의 경제적인 운전과 안전을 위해 매우 중요하다. 또한 전력계통의 안전성과 신뢰성을 개선시키고, 공급을 복구시키는 빠르고 정확한 고장점 검출 방법이 필요하기 때문에 정확하게 송전선로의 고장점을 추정하는 것은 수년 동안 연구자들에 의해 주목 받아왔다[1].

고장점 검출을 위한 방법들은

- Fault Locator로부터 펄스발생회로를 사용하여 진행파를 주입, 주입된 신호가 진행하여 고장점에서 반사, 선로 터미널에서 돌아오기 까지의 도착시간을 기반으로 고장거리를 결정하는 전송파형 방법(Travelling wave method)

* 주저자 : 한국기술교육대 석사과정
** 교신저자 : 한국기술교육대학교 교수
* Main author : Korea University of Technology and Education
** Corresponding author : Korea University of Technology and Education, Professor
Tel : 041-560-1161, Fax : 041-564-3261
E-mail : gonhaha@koreatech.ac.kr
접수일자 : 2014년 1월 3일
1차심사 : 2014년 1월 9일
심사완료 : 2014년 2월 17일

- b) 일단으로부터 고장 시 전압과 전류를 측정하여 선로 임피던스를 계산하여 고장점까지의 거리를 추정하는 일단 임피던스 방법(One-ended Impedance method)
- c) 선로의 양단에서 고장 시 비동기화 및 동기화 페이저(Phasor) data를 사용하여 고장위치를 추정하는 양단 방법(Two-ended methods) 등이 있다 [2-3].

본 연구에서는 일단 임피던스 방법에 의한 고장점 검출 알고리즘으로 리액턴스 방법, Takagi 방법의 알고리즘을 MATHCAD program으로 작성하고 고장점 위치와 고장저항의 값의 변화에 따라 고장검출성능을 비교평가하고 시뮬레이션을 수행하여 결과를 검토하였다.

2. 일단 임피던스 기반 고장점 검출방법

고장점 검출을 위한 일단 임피던스 방법은 적용상 경제적인 면이나 용이성 측면에서 대다수의 릴레이에서 표준 형태로 이용하고 있다. 일단 임피던스 방법 사용의 장점은 알고리즘이 간단하고, 통신 채널이나 원격 데이터를 필요로 하지 않는다.

고장점 검출 방법의 정확도를 개선하기 위해서 고장점 알고리즘에 적용되는 부정확한 정수나, 부정확한 가정에 의해 야기되는 오차를 감소하는 것이 중요하다. 대상 전력계통에 대한 더 많은 정보를 이용할 수 있다면 알고리즘은 더 정확할 수 있다. 일단 임피던스 기반 고장점 검출방법은 일단으로부터 전압과 전류를 측정하여 선로의 피상 임피던스를 계산하여 고장점을 추정하는데 이를 위해 상간 전압과 각상에 대한 전류 값을 일단 측에서 취득되어야 하고, 만일 영상 임피던스가 주어진다면 상 지락 사고에 대한 고장점을 계산할 수 있다.

2.1 리액턴스 방법

이 방법은 고장점을 추정하는 전통적인 방법으로 그림 1과 같은 고장이 발생한 송전선의 기본 주파수 유효 접지 회로에서 단락회로의 측정을 기본 방법으로 피상

임피던스를 계산하고 후에 전체 송전선로의 허수부인 전 리액턴스와 계산 리액턴스의 비를 계산한다. 이 비율은 고장에 따른 거리로 식 (1)과 같이 비례한다.

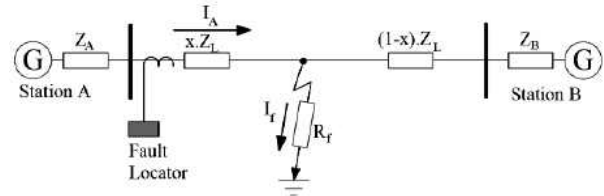


그림 1. 고장 송전선로
Fig. 1. Faulted transmission

이 방법에서 고장점에 흐르는 전류와 동상이며, 또한 부하는 고장에 대하여 0이라 가정한다. 식 (1)은 리액턴스방법에 관한 식이다[3-4, 6].

$$x = \frac{Im\left(\frac{V_A}{I_A + K_0 \cdot I_f}\right)}{Im(Z_L)} \quad (1)$$

단 x : 고장거리, I_m : 허수분

I_A : 공급단에서 측정된 전류

I_f : 고장점에 흐르는 각 상의 전류의 합

V_A : 공급단에서 측정된 전압

$K_0 = (Z_{0L} - Z_{1L})/3Z_{1L}$

Z_{0L} : 전 선로의 영상분 임피던스

Z_{1L} : 전 선로의 정상분 임피던스

Z_L : 단위 길이당 전 선로의 정상분 임피던스

2.2 Takagi 방법

Takagi 방법은 거리 송전선로 모델링 형태로 전개하여 고장 전의 전류와 고장전류의 차의 허수분으로 고장점 거리를 추정하는 방법으로 고장 전의 전류와 고장전류가 동상일 때 고장점의 정확도에서 우수한 특성을 보인다. 다음 식 (2)는 Takagi 방법에 관한 식이다[3, 5-6].

$$x = \frac{Im(V_A \cdot I_A''^*)}{Im(Z_L I_A \cdot I_A''^*)} \quad (2)$$

- 단 χ : 고장거리, I_m : 허수분
- I_A : 공급단에서 측정된 전류
- V_A : 공급단에서 측정된 전압
- Z_L : 단위 길이당 전 선로의 정상분 임피던스
- $I_A^{**} : I_A + K_0 \cdot I_F$
- $K_0 = (Z_{0L} - Z_{1L}) / 3Z_{1L}$
- Z_{0L} : 전 선로의 영상분 임피던스
- Z_{1L} : 전 선로의 정상분 임피던스
- I_F : 고장점에 흐르는 각 상의 전류의 합

3. 사례연구

본 연구의 성능평가를 위해 그림 2와 같이 모의계통 선로에 상술한 리액턴스 방법과 Takagi 검출방법을 MACHCAD를 이용하여 모의한다.

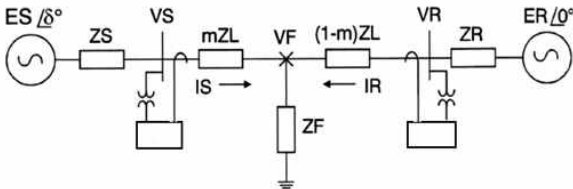


그림 2. 모의계통선로
Fig. 2. Sampled Model System

표 1. 모의계통선로 변수값
Table 1. System Parameters

변전소A 전압(ES)	$12 \angle 0.001^\circ \text{ kV}$
전 선로 길이	1p.u
전원의 정상분 임피던스(Z1S)	$0.26 \angle 85.31^\circ \Omega$
전원의 영상분 임피던스(Z0S)	$1.5 \angle 89.39^\circ \Omega$
정상분 선로 저항	10Ω
영상분 선로 저항	30Ω
정상분 선로 인덕턴스	0.034H
영상분 선로 인덕턴스	0.1H

표 1은 모의계통에 대한 변수값을 나타내고 A상에서 고장(선지락)이 발생했을 때를 가정한다. 고장점 시뮬레이션의 개요도는 그림 3과 같은 과정으로 수행한다.

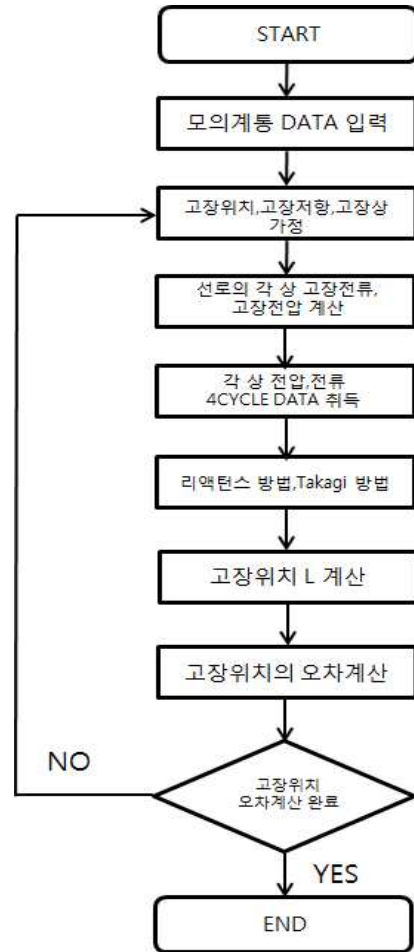


그림 3. 고장점 시뮬레이션 알고리즘의 플로우차트
Fig. 3. Flow chart of fault location simulation

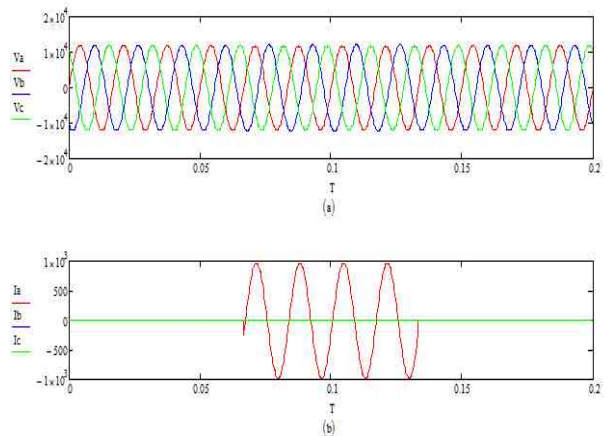


그림 4. 고장점 시뮬레이션의 각 상의 전압과 전류
Fig. 4. The voltage and current of fault location simulation

그림 4는 위에 상술한 모의계통선로에서 고장 저항의 값을 5Ω이고, 고장점x의 발생위치거리가 0.5라고 가정했을 때 MATHCAD프로그램으로 각 상의 전압(그림 4 (a))와 각 상의 전류(그림 4 (b))을 나타낸 것으로 세로축은 전류나 전압의 값을 나타내고 가로축은 시간을 나타내며 A상 지락사고로 인하여 A상의 전류는 다른 상에 비해 크게 증가하고 A상의 전압이 작아진 것을 볼 수 있다.

3.1 각 방법의 반복계산횟수 결과

그림 5은 리액턴스 방법(그림 5 (a)) 과 Takagi 방법(그림 5 (b))을 MATHCAD프로그램의 시뮬레이션 결과를 나타 낸 것으로 세로축은 고장점의 거리를 나타내고 가로축은 반복계산횟수를 나타낸다.

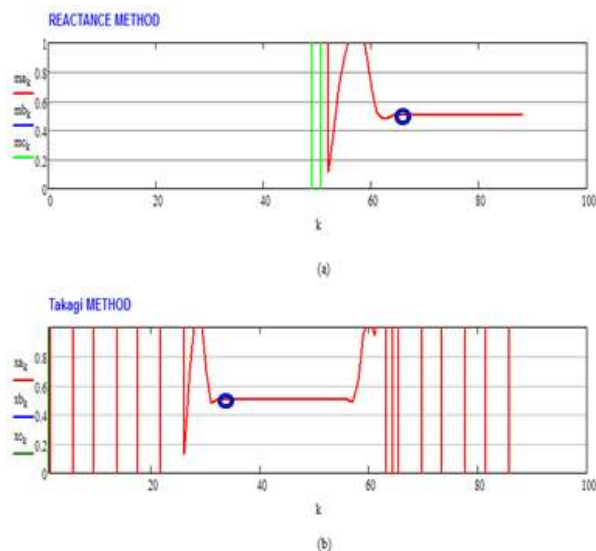


그림 5. 고장점 추정 결과(X=0.5인 경우)
Fig. 5. Result of fault location estimation (case X=0.5)

각 방법들의 반복계산의 수렴은 고장위치나 고장 저항의 변화에 영향을 받지 않고 그림 6과 같이 리액턴스 방법은 64회에, Takagi 방법은 32회에 수렴되는 것을 확인하여 Takagi 방법이 리액턴스 방법보다 고장점 추정시간이 빠르다.

3.2 고장위치 변화에 따른 오차결과

고장저항의 값을 5Ω으로 가정하고, 고장위치를 0.1 ~ 0.9까지 변화를 주어 각 방법들의 결과값을 표 2에 나타내면 오차의 정도를 알 수 있다.

식 (3)은 시뮬레이션 수행 결과 후 각 방법의 성능평가를 위한 실제 고장점 위치와 시뮬레이션 결과의 비교를 위한 오차를 구하는 식이다.

$$\text{오차} = \left| \frac{\text{실제 고장점} - \text{시뮬레이션 결과 고장점}}{\text{실제 고장점}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

표 2. 고장위치의 결과값과 오차
Table 2. Results and error of fault location

고장점	리액턴스 방법		Takagi 방법	
	결과값	오차(%)	결과값	오차(%)
0.1	0.103845	3.845987	0.104044	4.044778
0.3	0.304942	1.647409	0.305197	1.732609
0.5	0.506918	1.383674	0.507276	1.455243
0.7	0.711529	1.647093	0.701224	1.732292
0.9	0.934605	3.845099	0.936394	4.043882

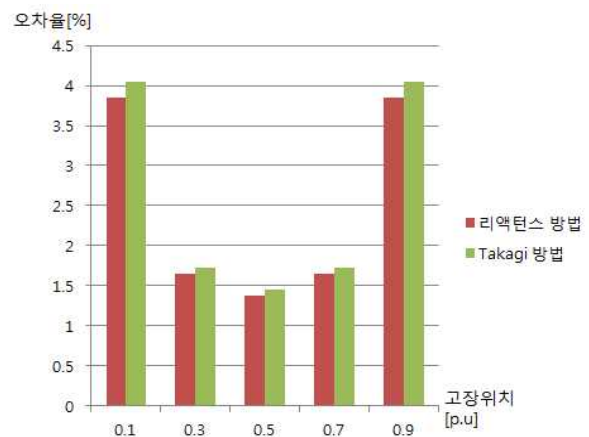


그림 6. 고장위치의 변화를 준 오차(고장저항=5Ω인 경우)
Fig. 6. error to the changf fault location (fault resistance=5Ω)

그림 6은 표 2의 오차값을 바탕으로 쉽게 알아보기 위해 나타낸 것으로 고장점 추정의 정확성은 측정점

에서 인접하거나 멀어질수록 오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

3.3 고장저항 변화에 따른 오차결과

표 2의 고장점의 위치에서 고장저항을 0~10Ω까지 변화를 주어 각 방법들의 결과값을 나타내면 표 3과 같으며 오차의 정도를 알 수 있다.

표 3. 고장저항의 결과값과 오차
Table 3. Results and error of fault resistance

고장 위치 p.u	고장 저항 Ω	리액턴스 방법		Takagi 방법	
		결과값	오차 (%)	결과값	오차 (%)
0.1	1	0.1007	0.77064	0.1008	0.8104
	3	0.1023	2.30735	0.1024	2.42663
	5	0.1038	3.84598	0.104	4.04477
	7	0.1053	5.38537	0.1056	5.66367
	9	0.1069	6.92507	0.1072	7.28288
0.3	1	0.3009	0.33108	0.301	0.34812
	3	0.3029	0.98884	0.3031	1.03996
	5	0.3049	1.6474	0.3051	1.7326
	7	0.3069	2.30649	0.3072	2.42577
	9	0.3088	2.9659	0.3093	3.11926
0.5	1	0.5013	0.27825	0.5014	0.29256
	3	0.5041	0.83064	0.5043	0.87358
	5	0.5069	1.38367	0.5072	1.45524
	7	0.5096	1.93715	0.5101	2.03735
	9	0.5124	2.49093	0.513	2.61974
0.7	1	0.7023	0.33071	0.7024	0.34775
	3	0.7069	0.98848	0.7072	1.0396
	5	0.7115	1.64709	0.7012	1.73229
	7	0.7161	2.30622	0.7169	2.4255
	9	0.7207	2.96565	0.7218	3.11901
0.9	1	0.9069	0.76904	0.9072	0.80881
	3	0.9207	2.30616	0.9218	2.42544
	5	0.9346	3.84509	0.9363	4.04388
	7	0.9484	5.38456	0.9509	5.66285
	9	0.9623	6.9242	0.9655	7.282

그림 7은 표 3의 실제 고장위치와 시뮬레이션 결과값의 오차를 더 쉽게 비교할 수 있도록 나타낸 것으로 고장위치를 0.5라 가정하고 고장저항을 0~10Ω까지 변화를 준 오차값들을 비교한 결과 고장저항이 증가하며 오차율도 함께 증가하였다.



그림 7. 고장저항의 변화를 준 오차(X=0.5인 경우)
Fig. 7. error to the changf fault resistance (case X=0.5)

일반적으로 Takagi 방법이 고장저항의 변화에 있기 때문에 정확도가 우수하지만 공급단의 고장 전의 전류와 고장전류의 위상차가 존재하여 미소하지만 리액턴스 방법이 우수함을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 보다 나은 고장점 검출방법을 연구하기 위하여 기존의 고장점 검출방법 중 일단 임피던스 (one-ended Impedence)기반 고장점 검출방법에서 리액턴스 방법과 Takagi 방법을 MATHCAD 프로그램으로 작성하여 신속성과 정확도의 성능평가를 하였다.

그 결과 계산시간 측면에서 Takagi 방법이 리액턴스 방법에 비해 계산반복횟수의 수렴이 적으므로 더 우수하였고 정확도 측면에서 오차는 미비하지만 리액턴스 방법이 Takagi 방법보다 우수하였다.

또한 오차의 발생은 고장점 위치의 변화에서 측정점에서 인접하거나 멀어질수록 오차가 크게 발생하였고

고장저항의 변화는 고장저항의 값이 커질수록 오차가 증가됨을 확인할 수 있었다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Myoung-Gon Song, Yong-Taek Oh, Charles Kim, Chul-Won, Park, "A Comparison Study on the Fault Location Algorithms on Transmission Line", KIEE Annual Spring Conference 2013, pp. 293-294, 2013. 5.
- [2] Murari Mohan Saha, Jan Jozef Izykowski, Eugeniusz Rosolowski. Fault Location on Power Networks. Springer, 2009.
- [3] Karl Zimmerman and David Costello. IMPEDANCE-BASED FAULT LOCATION EXPERIENCE. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.
- [4] Zimmerman, K., & Costello, D.(2005). Impedance-Based Fault Location Experience. pp. 211-226.
- [5] IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8 August 1982. T. Takagi Y .Yamakoshi. The Tokyo Electric Power Co., Inc.
- [6] Silva M, Oleskovicz M, Coury DV (2004) A fault locator for transmission lines using travelling waves and wavelet transform theory. In: Proc of 8th Int Confon Developments in Power System Protection -DPSP, IEE CP500 pp 212 - 215.

◇ 저자소개 ◇



송명곤(宋明坤)

1985년 7월 12일생. 2012년 8월 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2012년 9월 ~현재 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 재학(석사).



오용택(吳龍澤)

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1991년 한국전력공사 근무. 1987년 한국전력공사 정보처리처 과장 역임. 1991년 ~현재 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부 전기전공 교수. 2007년 호주 퀸스랜드 대학교 방문 연구원.