
배전계통 고장위치 확인을 위한 고장점 표정기법

고윤석*

The Fault Distance Computation Method for Fault Location Identification of Distribution System

Yun-seok Ko*

요 약

배전계통은 여러 가지 이유로 잦은 고장을 경험하기 때문에 고장위치 추정은 전력공급 신뢰도 측면에서 매우 중요하다. 그렇지만 배전계통은 주 선로에서 분기되는 3상 및 단상 분기선을 가지는 수지상 구조로 설계되며 각 구간 상에 수개의 로드 탭을 가지기 때문에 고장점 표정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기존의 전력계통 고장점 표정기법에 대해서 조사, 분석하여 배전자동화시스템의 중앙제어장치에서 효과적으로 실행할 수 있는 고장거리 계산 기법을 결정한다. 그리고 EMTP 모의 결과를 통해 결정된 방법의 유효성을 검증한다.

ABSTRACT

Because the distribution systems experience frequently the fault by several causes, the identification task of fault location plays very important role in the view point of power supply reliability. The distribution systems are designed as radial structure with three-phase and single-phase branch line to supply the electric power to the widely dispersed loads, and it have a several load taps within each line segment. it makes the accurate fault distance determination difficult. Accordingly in this papers, the existing fault point determination methods are surveyed and analyzed, and then a fault distance determination method for distribution feeder is adopted which can be executed effectively in DAS center. Finally, the adopted method is verified using EMTP simulation.

키워드

Distribution System, Fault Location, Fault Distance, Distribution Automation

1. 서 론

전력계통에 대한 고장점 표정 연구는 계통 연구자들에게 수십년간 큰 관심을 받아왔으며 다수개의 기법들이 제안되었다[1-8]. 이들 제안된 기법들은 실 계통에 적용되어 고장 시 고장위치를 신속하게 확인하는 것을 가능하게 함으로써 전력공급 신뢰도를 개선

할 수 있었다. 최근, 전력공급 신뢰도를 제고하기 위한 일환으로 배전계통에 대한 고장점 표정이 점차 중요시되고 있다. 배전계통은 폭 넓게 분포된 수용가들에 전력을 공급하기 위해 다양한 지역을 경유하기 때문에 자동차 추돌, 수목접촉 등 여러 가지 이유로 인해 잦은 고장을 경험하며 이로 인해 전력공급 신뢰도는 저하된다. 따라서 고장위치 추정은 전력공급 신뢰

* 남서울대학교 전자공학과
심사완료일자 : 2008. 12. 10

접수일자 : 2008. 11. 06

도 측면에서 매우 중요하지만, 전력계통과 달리 수직 상 구조로 3상은 물론 단상 분기선을 가지며 하나의 구간 상에 다수개의 로드 탭을 가지기 때문에 구조적으로 정확한 고장점 표정을 어렵게 하고 있다. 이 문제를 해소하기 위해서 [9]에서 FRTU 기반 방법론이 제시되었지만 디바이스 간 네트워크 통신이 요구되는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존에 제안된 전력계통에 대한 고장점 표정기법에 대해서 조사, 분석하여 배전 자동화시스템 센터에서 효과적으로 실행될 수 있는 배전계통 고장거리 계산 기법을 결정한다. 그리고 채택된 방법의 유효성을 EMTP 모의 결과를 통해 검증한다.

II. 기존 고장점 표정 기법

배전계통에 고장점 표정기법은 진행파 기반 측정법과 임피던스 기반 측정법으로 분류된다. 진행파 기반 방법론은 신호주입 여부에 따라 주입신호기반과 과도 신호기반으로 구성된다. 그림 1은 고장점 표정기법에 대한 분류를 보인다.

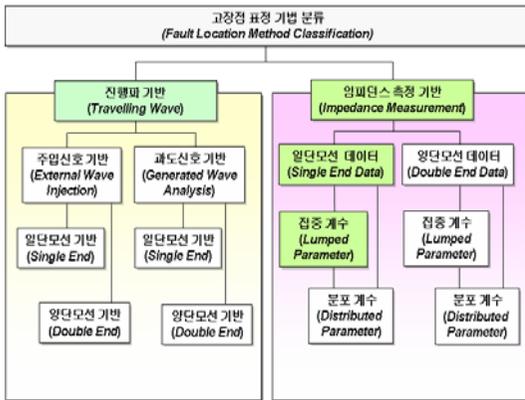


그림 1. 고장점 표정기법 분류

Fig. 1 Classification of fault location determination method

표 1은 고장점 표정기법들에 대한 기본원리와 장단점을 설명한다. 임피던스기반 기반의 단일모선 집중계수 방법론의 경우 단 모선에서 측정된 기본 주파수

진압, 전류 데이터와 선로정수를 이용, 선로 임피던스를 계산하고, 일단 모선으로부터 고장 점까지의 거리를 추정하기 때문에 진행파나 고주파 성분 분석 기법에 비해 매우 간단하고 경제적이며 특히 양단 모선의 추가비용이 요구되지 않아 상업적 측면에서 매우 유리하다는 장점을 가진다.

표 1. 고장점 표정기법 분석

Table. 1 Analysis of fault location determination method

표정기법	기본원리	장단점
진행파 기반	외부 주입 신호 기반	이방법은 Fault Locator로부터 펄스발생회로를 사용하여 진행파를 주입, 주입된 신호가 진행하여 고장 점에서 반사, 선로 터미널에서 캡처되기까지의 도착시간을 기반으로 고장거리 결정 - 선로의 전파속도가 L, C와 같은 선로정수, 네트워크 구성에 좌우됨 - 반사파가 분기 및 탭드 부하, 케이블 같은 불연속성에 영향 받음 - 트랜스듀서 정밀도나 대역폭에 좌우됨 - 정확한 추정은 가능하나 복잡한 적용하기 어렵고 여분의 외부신호 주입 및 캡처 도구로 비경제적임
	양단 모선 신호	고장발생시 전압, 전류의 고주파 성분과 고장점과 선로모선들 사이의 전압, 전류 진행파를 기반으로 고장점 추정 고주파 성분을 측정하기 위해 특수하게 조정된 필터를 이용하기 때문에 복잡하고 비용이 요구됨
과도 신호 기반	일단 모선	이 방법은 펄스 발생 회로를 사용하지 않고 고장점으로부터 도착하는 과도 신호를 캡처하여 고장점 추정 선로모선에서 얻는 것이 매우 불안정하며 특히 아크 발생, 선로 일단에 과도신호 해석은 거의 불가능함
	양단 모선	이 방법은 펄스 발생 회로를 사용하지 않고 선로양단에서 발생한 과도 신호의 도착시간 차를 기반으로 결정 선로 양단사이의 통신과 시간 동기화가 매우 중요한 요소가 됨
임피던스 측정 기반	일단 모선에서 측정된 기본 주파수 전압, 전류 데이터를 이용해 선로정수를 계산하고 일단 모선으로부터 고장 점까지의 거리를 추정	진행파나 고주파 성분 분석 기법에 비해 매우 간단하고 경제적이며 특히 양단 모선의 추가비용이 요구되지 않아 상업적 측면에서 매우 유리함

	분포계수	상동	신뢰할만한 분포계수 결정이 어려움
양단 모선 데이터	집중계수	양단모선에서 측정된 전압, 전류 데이터와 선로정수를 이용하여, 모선으로부터 고장 점까지의 거리를 추정	진행파나 기법에 비해 매우 간단하고 경제적이거나 기본적으로 양단 모선간의 통신이나 시간 동기화 조건이 요구됨
	분포계수	상동	신뢰할만한 분포계수 결정이 어려움

III. 배전선 고장점 표정기법

배전선의 고장거리 추정 방법으로는 기본과 성분을 기반으로 하는 비교적 실용적인 임피던스 기반 일단 모선 방법론이 채택된다.

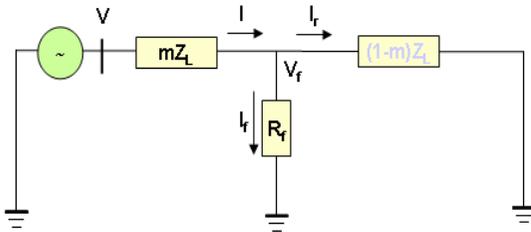


그림 2. 배전선을 위한 일단모선 모델
Fig. 2 One bus model of distribution feeder

그림 2는 배전선을 위한 일단모선 모델을 보인다. 그림에서 V는 전원단 모선전압, I는 전원단 전류, I_f는 고장전류, I_r는 부하전류, V_f는 고장점 전압, R_f는 고장저항, Z_L은 선로의 전체임피던스 그리고 m은 고정점까지의 거리를 표시한다.

$$\begin{aligned} V_{1f} &= V_1 - I_1 Z_{1L} \\ V_{2f} &= V_2 - I_2 Z_{2L} \\ V_{0f} &= V_0 - I_0 Z_{0L} \end{aligned} \quad (1)$$

이때, a상 지락 고장 조건하에서 전압 V_a와 고장점 전압 V_f와의 관계는 식 (1)과 같이 표시될 수 있다.

식 (1)에서 V_{1f}, V_{2f}, V_{0f}는 V_f의 정상분, 역상분 그리고 영상분을 의미한다. 또한 I₁, I₂, I₀와 Z_{1L}, Z_{2L}, Z_{0L}은 각각 전원단 전류 I와 선로 임피던스 Z_L의 정상분, 역상분 그리고 영상분을 표시한다. 정상 임피던스 및 역상 임피던스 성분 Z_{1L}과 Z_{2L}은 같으므로 식 (1)은 식 (2)로 표시될 수 있다.

$$V_{af} = V_{1f} + V_{2f} + V_{0f} = V_a - \{(I_1 + I_2)Z_{1L} + I_0 Z_{0L}\} \quad (2)$$

I_a = I₁+I₂+I₀이므로 식 (2)로부터 V_a는 식 (3)으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{af} + \{(I_1 + I_2)Z_{1L} + I_0 Z_{0L}\} \\ &= (I_a + kI_0)Z_{1L} + 3I_0 R_f \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $k = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}}$

3.1 고장저항을 고려하지 않은 고장거리계산법

배전계통에서 고장거리 추정 식을 유도할 때 고장저항 R_f를 무시하면 식 (3)으로부터 피상 임피던스는 표 2와 같이 표시될 수 있다.

표 2. 고장저항을 무시한 경우 피상 임피던스
Table. 2 Apparent impedance not considering fault resistance

고장타입		피상 임피던스(Z _{FP})
1선지락 고장	A-G	V _a /(I _a +kI ₀)
	B-G	V _b /(I _b +kI ₀)
	C-G	V _c /(I _c +kI ₀)
상간단락고장/ 상간단락지락고장	A-B/ A-B-G	V _{ab} /I _{ab}
	B-C/ B-C-G	V _{bc} /I _{bc}
	C-A/ C-A-G	V _{ca} /I _{ca}
3상단락 고장	A-B-C	A-B 또는 B-C 또는 C-A

이때 계산결과는 고장저항을 고려하는 경우에 비해 서 더 큰 오차를 포함하게 된다.

따라서 a상 지락 고장 시의 고장거리 계산은 비교적 간단하게 식 (4)로부터 얻을 수 있다. b상 및 c상 고장의 경우 식 (4)의 a상 전압, 전류는 각 상의 전압과, 전류로 대체되어야 한다.

$$m = \frac{V_a}{Z_{1L} \cdot (I_a + kI_0)} \quad (4)$$

3.2 고장저항을 고려한 고장거리계산법

고장저항을 고려하는 경우는 표 2에 보인바와 같이 고려하지 않는 경우에 비해서 고장전류 분이 포함된다. 표 3은 고장저항을 고려하는 경우 피상 임피던스를 보인다.

표 3. 고장저항을 고려한 경우 피상 임피던스
Table. 3 Apparent impedance considering fault resistance

고장타입		피상임피던스 (Z _{PP})	고장전류 (I _m)
1선지락 고장	A-G	V _a /(I _a +kI ₀)	3I ₀
	B-G	V _b /(I _b +kI ₀)	3I ₀
	C-G	V _c /(I _c +kI ₀)	3I ₀
상간단락고장/상간단락지락고장	A-B/ A-B-G	V _{ab} /I _{ab}	ΔI _{ab}
	B-C/ B-C-G	V _{bc} /I _{bc}	ΔI _{bc}
	C-A/ C-A-G	V _{ca} /I _{ca}	ΔI _{ca}
3상단락 고장	A-B-C	A-B 또는 B-C 또는 C-A	A-B 또는 B-C 또는 C-A

이때 고장거리 계산은 고장타입에 따라 다르게 결정되는데, 크게 1선 지락 고장이나 선간 단락고장 식으로 구분할 수 있다. 식 (5)는 임의의 상인 p상 지락 고장에 대한 고장거리 추정 식을 보인다.

$$m = \frac{Z_{PP} - I_m R_f / (I_p + kI_0)}{Z_{1L}} = \frac{V_p - I_m R_f}{Z_{1L} \cdot (I_p + kI_0)} \quad (5)$$

그러나 식 (5)는 고장저항을 포함한다. 미지의 고장

저항을 소거하기 위해서 식 (5)를 실수부 성분과 허수부 성분으로 표시하여 실수부는 실수부끼리 그리고 허수부는 허수부끼리 동일하게 놓으면 최종적으로 고장전류 계산식을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다[7,9].

$$m = \frac{V_{pR} I_{mX} - V_{pX} I_{mR}}{R_1 (I_{mX} I_{kR} - I_{mR} I_{kX}) - X_1 (I_{mX} I_{kX} + I_{mR} I_{kR})} \quad (6)$$

식 (6)에서 V_{pR}, V_{pX}는 고장 상의 전압의 실수부와 허수부를 표시한다. 특히 I_{mR}, I_{mX}는 고장전류의 실수부와 허수부를 표시한다. R₁, X₁은 단위 길이당 정상 임피던스 Z_{1L}의 실수부와 허수부를 표시한다. 그리고 I_{kR}, I_{kX}는 I_k=I_p+((Z₀-Z₁)/Z₁) I₀의 실수부와 허수부를 표시하는데, I_p, I₀, Z₀, Z₁은 고장 상 전류, 영상 전류, 단위 길이당 영상 및 정상 임피던스를 표시한다.

IV. 개선된 고장 점 표정 기법

배전계통은 실제적으로는 그림 2와는 달리 3상 및 단상 분기선 그리고 구간별 수개의 부하 탭을 포함하는 수지상 구조를 가진다. 따라서 3상을 기반으로 하는 식 (6)을 직접 적용하는 경우 상당한 오차를 포함할 수 있기 때문에 개선된 표정기법이 요구된다.

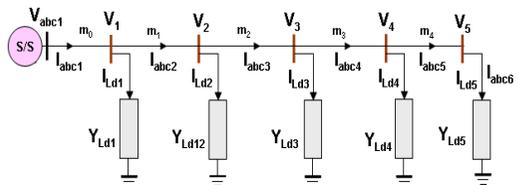


그림 3. 수지상 배전계통 구성
Fig. 3 Distribution system of radial structure

4.1 고장타입 결정

고장거리를 추정하기 위해서는 먼저 배전 변전소 CB단에서 인출단 전류의 크기를 감시하여 고장을 확인해야 하고 다음 정확한 고장타입을 결정해야 한다. 현재 고장은 선로전류가 상 또는 지락 픽업전류를 초과하는 경우 고장으로 결정한다. 그리고 그림 4에 보인 절차에 따라 고장타입을 결정한다.

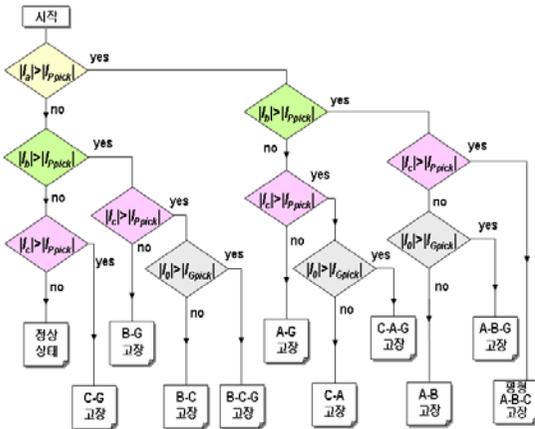


그림 4. 고장타입 결정 방법
Fig. 4 Fault type determination method

4.2 개선된 표정 기법

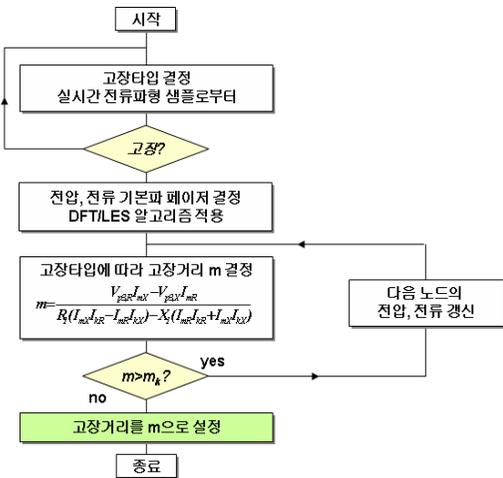


그림 5 개선된 고장 점 표정기법
Fig. 5 Improved fault location determination method

그림 5에 보인 계통구성을 고려한 개선된 표정 기법은 다음과 같다. 먼저 식 (6)을 이용하여 고장거리 m 을 계산 만약, 고장거리 $m > m_0$ 이면 모선평전압 갱신과정을 통해 V_1, I_{abc2} 를 계산한다. 다음, 새로운 고장거리 m 를 계산 만약, 고장거리 $m > m_1$ 이면 모선평전압 갱신과정을 통해 V_2, I_{abc3} 을 계산한다. 만약 고장거리 $m < m_1$ 이면 m 을 고장거리로 한다.

V. EMTP 시뮬레이션

본 연구에서는 제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해서 배전계통 모델을 활용하였다. 먼저 EMTP를 활용하여 다양한 모션 위치에서 선로고장을 발생시킨다. 다음 고장 점 표정 프로그램은 CB단의 전압, 전류 파형의 1사이클을 입력데이터로 활용하여 고장거리를 계산한다. 그림 6은 시험 배전계통 모델을 보인다.

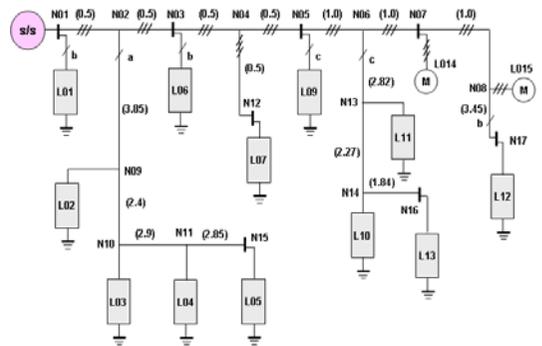


그림 6. 시험 배전계통
Fig. 6 Test distribution system

표 4는 EMTP 고장모의 결과를 보인다. 표 4에서 평균오차율은 경우 1의 경우 10%로부터 경우 5의 경우 약 3% 정도임을 보음을 알 수 있다. 또한 고장저항이 증가할수록 오차가 증가함을 알 수 있다.

표 4. EMTP 고장모의 결과
Table. 4 EMTP fault simulation results

순번	고장위치	실제길이[km]	고장저항(W)					평균오차율 [%]
			0	10	20	30	50	
1	N02	0.50	0.500	0.527	0.552	0.575	0.616	10.08
2	N03	1.00	1.000	1.034	1.067	1.098	1.154	7.06
3	N04	1.50	1.500	1.542	1.582	1.620	1.691	5.78
4	N05	2.00	1.993	2.041	2.087	2.131	2.214	4.73
5	N06	3.00	2.932	2.993	3.051	3.104	3.214	2.88
6	N07	4.00	3.811	3.885	3.955	4.023	4.153	3.47
7	N08	5.00	4.631	4.715	4.796	4.875	5.027	4.04

VI. 결 론

본 연구에서는 기존 전력계통 고장점 표정기법을 분석하여 배전자동화시스템 센터에서 효과적으로 적용할 수 있는 배전선 고장점 표정기법을 결정하였다. 그렇지만 단상 분기선로나 로드 탭의 존재로 인해 상당한 오차가 발생할 수 있기 때문에 모선 반복 적용 기법을 기반으로 하는 개선된 고장 점 표정 기법이 고장거리 계산법으로 제안되었다. 끝으로, EMTP를 기반으로 하는 검증결과에서 채택된 고장 점 표정 기법의 유효성을 확인할 수 있었다. 그렇지만 모선 반복 법에 대한 검증은 진행 중이기 때문에 최종 검증결과를 얻기 위해서는 지속적인 연구가 있어야 하겠다.

참고 문헌

[1] Desikachar, K. V. and Singh, L. P., "Digital Travelling-Wave Protection of Transmission Lines", Electric Power Systems Research, Vol. 7, No. 1, pp.19-28, Jan. 1984.

[2] Ibe, A. O. and Cory, B. J., "A Travelling Wave-Based Fault Locator for Two- and Three Terminal Networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2, pp.283-288, April 1986.

[3] Zeng Xiangjun, Li, K.K., Liu Zhengyi and Yin Xianggen, "Fault Location Using Traveling Wave for Power Networks", Industry Applications Conference, Volume 4, Issue, 3-7 pp.2426-2429, Oct. 2004.

[4] Takagi, T. Yamakoshi, Y., Yamaura, M. Kondow, Matsushima R. and Matsushima T., "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, pp.2892-2898, Aug. 1982.

[5] Eriksson, L.Rockefeller M.M. and Rockefeller G.D., "An Accurate Fault Locator With Compensation For Apparent Reactance In The Fault Resistance Resulting From Remote-End Infeed", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp.424-436, August 1985.

[6] Srinivasan, K. and St-Jacques, A. "A New Fault Location Algorithm for Radial Transmi-

ssion Lines With Loads", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp.1676-1682, July 1989.

[7] Girgis, A.A., Fallon, C.M. and Lubkeman, D.L. "Fault Location Technique for Rural Distribution Feeders", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 6, pp.1170-1175, Nov. 1993.

[8] Das, R., Sachdev, M.S. and Sidhu, T.S, "A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution lines", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp.443-448, 2000.

[9] Yun-Seok Ko, "The FRTU-Based Intelligent Fault Location Determination Strategy in Ubiquitous Based Distribution Systems", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 2, pp.192-198, 2008.

저자 소개



고윤석(Yun-seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사)

1986년 3월~1996년 3월 한국전기연구소 선임연구원

1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원

1997년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 부교수