

순환형 최소자승법을 이용한 송전선로의 고장점 추정 알고리즘

윤창대* 이종주* 정호성* 신명철* 최상열**
*성균관 대학교 **안양대학교

The Fault Location Estimation Algorithm in Transmission Line Using a Recursive Least Square Error Method

C.D.Yoon* J.J.Lee* H.S.Jung* M.C.Shin* S.Y.Choi**
*S.K.K. University **A.Y. College

Abstract - This paper presents the fault location estimation algorithm in transmission line using a recursive least square error method(RLSE). To minimize the computational burden of the digital relay, a RLSE approach is used. Computer simulation results of the RLSE algorithm seem promising, indicating that it should be considered for further testing and evaluation.

1. 서 론

전력시스템이 대용량화·초고압화됨에 따라 송전계통의 고장은 계통전반에 막대한 파급효과를 미쳐 안정적인 전력공급에 커다란 장애요인이 되고 있다. 더욱이 전력산업 구조의 개편으로 인한 전력거래 도입에 따라 계통의 신뢰도 문제가 보다 중요하게 되었으며 계통은 점차 병행 2회선(Parallel Transmission Line)으로 구성되고 있어 이에 따른 보다 신뢰성 있는 보호가 요구되고 있다. 송전선 보호를 위한 기법 중 거리계전기법은 고장시 계전기에서 계측되는 고장전압과 전류신호로부터 임피던스를 계산하여 고장점까지의 거리를 추정하는 기법으로 송전선 보호에 널리 적용되는 기법이다. 정확한 고장 임피던스를 계산하기 위해서는 고장전압과 전류신호로부터 원하는 정보를 정확하게 추출하여야 한다. 거리 계전기법에 많이 적용되고 있는 이산 푸리에 변환(DFT)은 시간영역의 신호를 주파수 영역으로 변화하여 사용하는 기법으로 결과는 비교적 우수하지만 수렴시간이 다소 길다는 단점이 있다[1]. 신호의 변환과정 없이 시간 영역에서의 연산을 위해 선로를 저항과 리액턴스의 집중된 회로로 근사화하여 미분방정식으로 표현하고 이로부터 고장점까지의 임피던스를 추정하는 기법도 제시되었다[2]. 본 논문에서는 병행 2회선 송전선에서 발생할 수 있는 지락고장과 단락고장에 대해 고장점을 추정하는 새로운 거리계전기법 즉, 고장점 추정속도를 향상시키기 위한 임피던스 계산방정식을 모두 미분방정식으로 표현하고, 비정현·비선형인 선로 파라미터의 실제값과 추정값의 오차를 최소화한 후 원하는 값을 추정하는 최소자승법(Least Square Error Method)[3]을 응용하여 최소자승법의 연산부담을 줄이고 고장점 추정시간을 최소화하는 순환형 최소자승법(Recursive Least Square Error Method)을 제시하였다. 계전기의 입력으로 사용되는 신호인 전압과 전류신호를 저역통과 필터와 최솟음셋 필터를 통하여 기본주파수 성분을 추출하였으며 지락고장시 발생할 수 있는 건전회선의 영상분 전류를 고려하였다. 제안된 기법의 우수성을 입증하기 위해 사용된 사례연구용 데이터들은 전자과도해석 프로그램인 EMTP(Electro-magnetic Transients Program)에 의하여 양전원 병행 2회선 전력계통으로 모의된 것이며, 고장조건에 대해 유연성을 가지고 모의하여 결과를 정리하였다.

2. 고장점 추정기법

2.1 최소자승법을 이용한 고장점 추정

최소자승법은 주어진 방정식의 개수가 미지수의 개수보다 많아 정확한 해를 구할 수 없는 경우, 추정해와 실제 해의 오차를 최소화하여 가장 근사적인 해를 추정하는 기법이다. 이를 적용하기 위해 1선 지락고장의 경우 고장회선을 1차 미분방정식 형태로 표현하면 다음 식(1)과 같다[4].

$$V_a = R_1(I_a + K_r I_0 + K_{rm} I_{m0}) + L_1 \left(\frac{dI_a}{dt} + K_f \frac{dI_0}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{m0}}{dt} \right) + 3R_f I_0 \quad (1)$$

여기서, $K_r = (R_0 - R_1)/R_1$, $K_{rm} = R_{m0}/R_1$, $K_f = (L_0 - L_1)/L_1$, $K_{lm} = L_{m0}/L_1$ 이며, 1선 지락고장의 경우 $R_f = 0$ 이라고 하면 미지항은 R_1 , L_1 이 된다. 식(1)을 미지항과 기지항의 행렬로 분리하고 k 번째 시점의 식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$V(k) = A(k) \cdot x(k) = [a_1(k) \ a_2(k) \ a_3(k)] \cdot x(k) \quad (2)$$

여기서, $V(k) = V_a(k)$

$$x(k) = [R_1(k) \ L_1(k) \ R_f(k)]^T$$

$$a_1(k) = I_a(k) + K_r I_0(k) + K_{rm} I_{m0}(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_a(k)}{dt} + K_f \frac{dI_0(k)}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{m0}(k)}{dt}$$

$$a_3(k) = 3I_0(k)$$

의사 역행렬을 이용하여 식 (2)를 미지행렬 $x(k)$ 의 추정치인 $\hat{x}(k)$ 에 대해 전개하면 식 (3)과 같다.

$$\hat{x}(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (3)$$

식 (3)에서 고장점까지의 저항성분과 리액턴스 성분을 추정하여 고장거리를 판단할 수 있다. 이와 같이 고장임피던스를 구하는 데에 최소자승법을 적용하면 시간영역에서의 직접적인 연산이 가능해지며, 추정을 위한 윈도우의 크기를 자유롭게 할 수 있어 보다 빠른 수렴값을 얻을 수 있다. 즉, 미지수의 개수가 3개이므로 최소 3개 이상의 연속된 데이터만 있으면 비교적 정확하게 추정을 할 수는 있다. 그러나 계통의 고장신호 특성상 너무 작은 수의 데이터를 이용하여 연산하는 경우에는 일시적으로 심각한 외란성분을 가진 신호를 입력으로 사용하게 되면 심각한 오차를 유발할 수 있어 최소한 반주기 이상의 샘플값을 이용하여 결과값을 추정하는 것이

보다 안정적이라고 할 수 있다. 하지만 이렇게 반주기 이상의 데이터를 가지고 연산하는 경우에는 연산량이 증가하게 되며 푸리에 변환에 비해 수렴속도가 향상되는 결과는 가져오지 못한다.

2.2 순환형 최소자승법을 이용한 고장점 추정

반주기 이상의 샘플 데이터를 이용한 최소자승법의 경우에는 결과의 정확성은 우수하나 높은 주파수로 샘플링하는 경우에는 연산량의 증가로 인해 계전기의 부담과 수렴속도의 성능이 저하될 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 데이터가 입력으로 들어오는 때에는 기존의 추정값을 이용하여 새로운 추정값을 내보내는 순환형 최소자승법을 적용하였다. 순환형 최소자승법은 기존의 추정값의 영향으로 일시적인 심각한 외란을 가진 입력 신호에 대해서도 안정적인 값을 내보내며 매 샘플입력마다 결과값을 추정하므로 연산량을 현저히 감소시켜 고속의 수렴성을 보여준다.

순환형 최소자승법의 k 번째 방정식의 최소자승법 결과값을 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{x}(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (4)$$

$(k+1)$ 번째의 방정식을 이용한 최소자승법의 결과값을 식 (5)와 같다.

$$\hat{x}(k+1) = (A(k+1)^T \cdot A(k+1))^{-1} \cdot A(k+1)^T \cdot V(k+1) \quad (5)$$

여기서,

$$A(k+1) = \begin{bmatrix} A(k) \\ a(k+1)^T \end{bmatrix}, \quad V(k+1) = \begin{bmatrix} V(k) \\ v(k+1) \end{bmatrix}$$

위 식에서 역행렬의 예비정리를 위해,

$$p(k) = [A(k)^T \cdot A(k)]^{-1}$$

$$p(k+1) = [A(k+1)^T \cdot A(k+1)]^{-1}$$

이라고 가정 한 후 $p(k+1)$ 에 대해 전개하면,

$$p(k+1) = p(k) - \frac{p(k) a(k+1) a(k+1)^T p(k)}{1 + a(k+1)^T p(k) a(k+1)} \quad (6)$$

식 (6)에서

$$\delta(k+1) = 1 + a(k+1)^T p(k) a(k+1)$$

$$g(k+1) = p(k) a(k+1) \delta^{-1}(k+1)$$

라고 치환하고 $p(k+1)$ 을 다시 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$p(k+1) = [I - g(k+1) a(k+1)^T] p(k) \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 $(k+1)$ 개의 방정식을 이용한 최소자승법을 k 개의 방정식을 이용한 최소자승법으로 전개하면 식 (8)이 된다.

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + g(k+1) \cdot [V(k+1) - a(k+1)^T \hat{x}(k)] \quad (8)$$

여기서, $\hat{x}(k) = p(k) A(k)^T u(k)$

$$g(k+1) = p(k) a(k+1) - g(k+1) a(k+1)^T p(k) a(k+1)$$

위의 식 (8)을 이용함으로써 매 샘플마다 결과값을 추정할 수 있게 되므로 기존의 방법에 비해 연산부담이 줄어든다. 그리고 순환형 최소자승법은 이전의 추정값이 새로운 샘플값에 영향을 주어 심한 외란이 있는 샘플에 대해서도 안정한 값을 얻을 수 있는 장점이 있다.

3. 사례연구

3.1 모델계통

송전선로의 모델계통은 선간전압 154[kV]의 양전원을 가지며 선로의 전체 길이(공장)가 80[km]인 선로로, 전체 선로의 구성은 그림 1에, 그리고 전원과 선로의 데이터는 표 1에 각각 나타내었다. 샘플링 주파수는 3840 [Hz]로 한 주기당 64샘플을 한 것이며, P 모선의 전압원인 V_p 를 기준으로 하여 고장 발생각이 $0[^\circ]$ 인 고장은 176샘플 지점에서, $90[^\circ]$ 고장은 192샘플 지점에서 발생하도록 하였다. 이렇게 추출한 고장데이터를 MATLAB프로그램으로 구현된 거리계전기법에 적용하여 고장점 추정의 성능을 평가하였다.

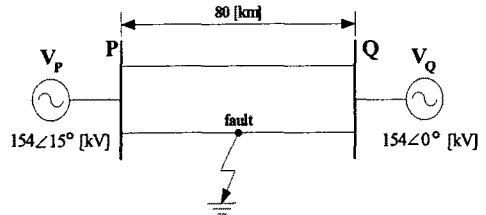


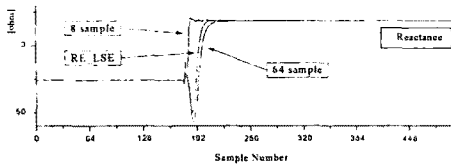
그림 1 송전선 모델 계통

표 1 모의 계통의 입력데이터

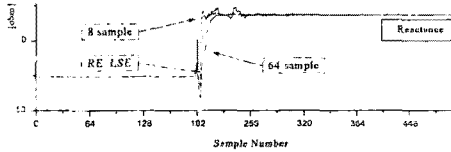
		R	L	$C[\mu F/km]$	
전원 입피던스 [Ω]	P	Z_{R0} (영상분)	1.8699	10.089	-
		Z_{R1} (정상분)	0.5331	4.1106	-
	Q	Z_{Q0} (영상분)	2.3581	11.611	-
		Z_{Q1} (정상분)	0.5926	4.9773	-
선로 입피던스 [Ω/km]	Z_{L0} (영상분)	0.3088	0.3094	0.0038	
	Z_{L1} (정상분)	0.1006	0.4667	0.0093	
	Z_{m0} (상호 영상분)	0.2082	0.6961	0.0074	

3.2 고장점 추정결과

그림 2는 최소자승법과 순환형 최소자승법의 수렴속도와 특성을 비교하기 위해 1선 지락고장에 대한 리액턴스를 추정 한 결과이다. 고장은 전체 송전선로의 50[%]지점에서 발생하였고 고장저항은 없는 것으로 가정하였으며, 수렴속도와 특성을 비교하기 위해 직류옴셋 성분이 많은 $0[^\circ]$ 고장과 고조파 성분이 많은 $90[^\circ]$ 고장에 대해 비교하였다. 고조파의 영향을 고려하기 위해 전처리 과정을 거치지 않은 고장신호를 그대로 입력으로 사용하였으며 최소자승법의 데이터 윈도우의 크기는 8샘플(1/8주기)과 64샘플(1주기)로 선정하여 결과를 비교하였다. 고장 발생각이 $0[^\circ]$ 일 때는 고조파의 영향이 비교적 작아 최소자승법의 8샘플 데이터 윈도우 경우에도 안정적으로 수렴하며 64샘플의 데이터 윈도우나 순환형 최소자승법의 경우에 비해 다소 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 하지만 $90[^\circ]$ 고장일 때는 고조파의 영향이 심하여 수렴이 안정적이지 않으며 이에 비하여 순환형 최소자승법을 사용한 경우에는 고조파에 상관없이 안정적으로 수렴하고 있다.



(a) 0° 고장



(b) 90° 고장

그림 2. 리액턴스 성분의 수렴속도 비교

3.3 에러율의 수렴시간 비교

에러율은 식 (9)와 같이 설정하였으며, 기준이 되는 분모의 값을 전체 송전선로의 임피던스로 함으로써 고장 거리에 관계없이 상대적인 평가를 가능하게 하였다.

$$error\ ratio = \frac{Z_{real} - Z_{estimate}}{Z_{total}} \times 100 [\%] \quad (9)$$

에러율은 실제 임피던스의 1[%]와 5[%] 이내로 수렴하는 시점을 비교하여 그 샘플수로 표기하였으며, 아래의 표 2에 그 값을 나타내었다.

표 2 에러율의 수렴시간 비교

단위 : 고장 후 샘플수

		5[%]	1[%]
8 Sample	0°	31	65
	90°	33	69
64 Sample	0°	69	89
	90°	75	90
RLSE	0°	56	70
	90°	62	72

순환형 최소자승법의 경우를 살펴보면 5[%] 이내로 수렴하는 데에 걸리는 시간은 한 주기 이내로 8샘플을 사용하는 경우보다는 다소 길게 나타나지만 5[%]에서 1[%]로 수렴하는 시간을 살펴보면 8샘플의 경우와 비교하여 수렴시간이 매우 짧은 것을 알 수 있다. 즉, 0° 시락 고장 시 8샘플을 사용하는 때에는 5[%]에서 1[%]내로 수렴하는데 걸리는 시간은 34샘플이지만 순환형 최소자승법을 사용할 때에는 14샘플로서 빠르게 수렴하는 것이다. 이것은 순환형 최소자승법의 이전의 추정값이 새로운 추정값에 영향을 미침으로써 나타난 결과이다. 따라서 순환형 최소자승법을 이용하여 미분방정식의 해를 구하는 기법에서는 미리 전처리 과정을 거치는 것이 보다 신속한 고장점 추정을 가능하게 한다는 것을 알 수 있다.

3.4 고장조건 변화에 따른 결과

병행 2회선 송전계통에서는 상호회선간의 영상분 상호결합에 의한 영향으로 지락고장에 대한 고장점 추정에 에러를 일으킬 수도 있다. 따라서 고장회선의 고장점 추정시에 건전회선의 영상분 전류를 이용하여 영상분 상호결합을 보상해 주어 고장점 추정시 발생할 수 있는 에러를 최소화하여야 한다.

본 논문에서 모델링한 송전선로의 길이를 고장 임피던스로 변환하면 선로의 1[%]에 해당하는 거리는 0.3819[Ω]이다. 각 고장거리에 따른 정확한 계산결과는 표 3에 나타내었으며, 고장거리에 관계없이 정확한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다.

표 3 고장거리에 대한 고장 임피던스 추정결과

고장거리[%]	실제임피던스[Ω]	추정임피던스[Ω]
10[%]	3.82	3.8545
30[%]	11.46	11.4543
50[%]	19.095	18.9217
70[%]	26.733	26.0448

표 4는 지락고장 시, 고장발생각의 변화에 따른 저항 성분과 리액턴스 성분의 추정값, 그리고 고장점 추정결과와 에러를 비교한 것이다. 고장발생각은 0°부터 90°까지 증가되며, 고장거리는 전체 선로의 50[%] 지점에서 발생하였고 고장저항은 0[Ω]으로 가정하였다. 0° 고장의 경우에는 직류옴셋 성분이 가장 크게 발생하며 90° 고장에서는 고조파 성분이 큰 영향을 미친다. 하지만 순환형 최소자승법을 이용하는 기법에서는 직류옴셋 성분에 크게 영향을 받지 않으며 고조파 성분에 대해서는 전처리 과정을 거침으로써 정확한 값을 얻을 수 있다.

표 4 고장발생각에 따른 임피던스(지락고장)

임피던스	각[°]	0	30	45	60	90
		실제값	4.024			
R[Ω]	추정값	4.0075	4.0071	4.0071	4.0075	4.0086
	실제값	18.668				
X[Ω]	추정값	18.492	18.493	18.492	18.492	18.495
	에러 [%]	0.4585	0.4575	0.4606	0.4604	0.4512

지락고장의 경우 고장 발생각에 상관없이 0.5[%]이내의 정확한 수렴결과를 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 최소자승법을 응용한 순환형 최소자승법을 이용하여 보다 빠르고 정확한 거리계전기법을 제시하였다. 최소자승법과는 다르게 이전의 추정값과 새로운 샘플을 데이터 윈도우로 사용하지므로 심한 고조파가 발생하는 고장에 대해서도 안정하고 빠른 수렴 성능을 보였으며 전체 선로에 대한 임피던스 추정 에러율 0.5[%]이내의 결과를 얻을 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] P. G. McLaren, M. A. Redfern, "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", Proceedings of the IEE, Vol. 122, No. 11, pp. 1301-1305, 1975.
- [2] M. Akke, J. S. Thorp, "Improved Estimates from the Differential Equation Algorithm by Median Post-Filtering, Developments in Power System Protection, No. 434, pp. 235-238, 1997.
- [3] 정호성의, "최소자승법을 이용한 가변 윈도우 크기의 거리계전기법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol. A, pp 226-228, 2001
- [4] M. B. Djuric, "Time Domain Solution of Fault Distance Estimation and Arcing Fault Detection on Overhead Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp60-67, 1999