

가변 데이터 윈도우 기법을 이용한 병행 2회선 송전선 고장점 추정 알고리즘

정호성¹, 윤창대², 이승연³, 신명철⁴
¹한국철도기술연구원, ²성균관대학교

Fault Location Estimation Algorithm of the parallel transmission lines using a variable data window method

Jung Ho Sung¹, Yoon Chang Dae², Lee, Seung Youn³, Shin Myong Chul⁴
¹KRRI, ²SKK Univ.

Abstract - This paper proposes the Fault Location Estimation Algorithm in the parallel transmission lines. These algorithm uses a variable data window method based on least square error method to estimate fault impedance quickly. And it selects the optimal equation according to the operation situation and usable fault data for minimizing the fault estimation error effected by the zero sequence mutual coupling. After simulation result, we can see that these algorithm estimates fault location more rapidly and exactly.

1. 서 론

병행 2회선 송전선에서는 양 회선간의 영상분 상호결합(zero sequence mutual coupling)의 영향으로 일반적인 1회선 송전선 보호기법으로는 오, 부동작을 일으킬 수 있다. 이러한 영상분 상호결합에 영향을 미치는 요소로는 고장저항, 원근단의 유입성분, 부하전류, 전원 임피던스 등이 있으며, 특히 고저항 지락고장의 경우에는 영향이 커져 계전기의 보호 능력이 급격히 저하된다. 따라서 정확한 고장점 추정을 위해서는 영상분 상호결합을 고려한 보호 기법이 적용되어야 한다[1].

따라서 본 논문에서는 고장시 병행 2회선 송전선의 운전 상황과 계전기에서 취득할 수 있는 데이터에 따라 최적의 방정식을 제시하여 보다 정확한 고장점 추정 알고리즘을 제안하였다. 또한 최소자승법을 이용하여 데이터 윈도우 크기를 고장정도에 따라 가변할 수 있도록 하여 고장 임피던스의 추정속도를 보다 향상시켰다.

EMTP를 이용하여 병행 2회선 송전선로를 모델링하고 운전조건을 변화시키면서 다양한 고장을 모의하였다. 시뮬레이션을 통해 추출한 고장 데이터를 적용하여 고장점 추정 속도와 정확성을 비교 평가함으로써 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

2. 병행 2회선 송전선 고장점 추정 알고리즘

송전용량의 증대와 토지이용의 극대화를 위해 가설된 병행 2회선 송전선에서는 상호 회선간의 영상분 상호결합의 영향으로 인해 고장점 추정시 오버리치, 언더리치가 발생하여 계전기의 오, 부동작이 발생할 수 있다. 따라서 병행 2회선 송전선의 운전 상황과 고장시에 계전기가 이용할 수 있는 데이터에 따라 영상분 상호결합의 영향을 최소화하는 최적의 보호기법이 요구된다.

그림 1은 양단에 전원이 있는 병행 2회선 송전선의 F선로에서 A상 1선 지락고장이 발생한 경우의 회로이다. P모선에서 고장점까지의 선로를 집중선로모델로 간략화하고 정상분, 역상분, 영상분의 대칭성분으로 분해하였다. 여기서 정상분, 역상분 임피던스는 동일하며, 고장점 전압인 $V_f = R_f I_f$ 라고 치환하면 대칭성분으로 분해된 식은 식 (1)과 같이 미분방정식으로 표현할 수 있다.

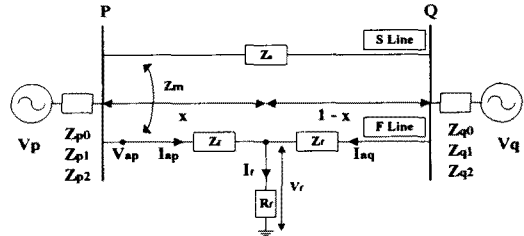


그림 1 1선 지락고장 회로
 Fig. 1 Circuit of one line ground fault

$$V_{ap} = R_1(I_{ap} + K_r I_{af0}) + K_{rm} I_{f0} + L_1 \left(\frac{dI_{ap}}{dt} + K_l \frac{dI_{af0}}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{f0}}{dt} \right) + R_f I_f \quad (1)$$

여기서, $K_r = (R_0 - R_1)/R_1$, $K_l = (L_0 - L_1)/L_1$, $K_{rm} = R_{m0}/R_1$, $K_{lm} = L_{m0}/L_1$ 이며, I_{f0} 는 건전회선의 영상분 전류이다. 식 (1)에서 계전기에서 계속 가능한 값은 고장상의 전압, 전류, 그리고 영상분 전류인 V_{ap} , I_{ap} , I_{f0} 이며, 고장점 추정을 위해 구해야 하는 값은 선로의 정상분 임피던스와 고장저항인 R_1 , L_1 , R_f 가 된다. 따라서 계전기에서 받아들이는 건전회선의 영상분 전류인 I_{f0} 와 고장점 전류인 I_f 에 따라 고장점 추정의 정확성이 좌우된다.

2.1 원근단 고장전류와 건전회선의 영상분 전류를 이용할 수 있는 경우

건전회선의 영상전류인 I_{f0} 를 이용할 수 있고, 원근단인 Q모선의 고장전류를 통신회선을 통해 P모선의 계전기에서 이용할 수 있는 경우에는 고장저항에 흐르는 고장점 전류는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_f = I_{ap} + I_{aq} \quad (2)$$

따라서 식 (1)에서 미지항인 R_1 , L_1 , R_f 를 구하기 위해 식 (3)과 같이 행렬로 표현하여 계산할 수 있다.

$$V(k) = A(k) \cdot x(k) = [a_1(k) \ a_2(k) \ a_3(k)] \cdot x(k) \quad (3)$$

여기서, $V(k) = V_{ap}(k)$

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

$$a_1(k) = I_{ap}(k) + K_r I_{af0}(k) + K_{rm} I_{f0}(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_{ap}(k)}{dt} + K_l \frac{dI_{af0}(k)}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{f0}(k)}{dt}$$

$$a_3(k) = I_{ap}(k) + I_{aq}(k)$$

2.2 원근단 고장전류를 이용하지 못하는 경우

원근단의 고장데이터를 받지 못하거나 전송된 신호가 동기화된 신호가 아닌 경우에 식 (3)을 적용하면 보다 심각한 에러를 발생시킬 수 있다. 따라서 원근단의 고장전류를 이용하지 못하는 경우에는 계전기가 설치된 모선에서 계측된 데이터만을 이용해야 한다. 이를 위해 그림 2와 같이 1선 지락고장의 영상분 회로를 이용하였다.

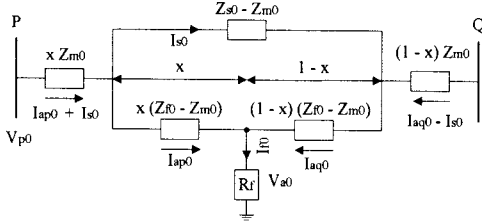


그림 2 1선 지락고장의 영상분 회로
Fig. 2 Zero sequence circuit of one line ground fault

원근단에서 유입되는 고장 전류를 제거하기 위해서 식 (4)와 식 (5)와 같이 2개의 식을 유도할 수 있다.

$$I_{f0} = I_{af0} + I_{ad0} \quad (4)$$

$$I_{f0}(Z_{s0} - Z_{m0}) + (1-x)(Z_{f0} - Z_{m0})I_{af0} - x(Z_{f0} - Z_{m0})I_{ad0} = 0 \quad (5)$$

양 회선에 동일한 회선을 사용한다고 가정하면 $Z_{f0} = Z_{s0}$ 이 되며, 원근단 유입성분인 I_{ad0} 을 제거하고 간략화하면 식 (6)과 같다. 따라서 고장점 전류인 I_f 를 계전기에서 계측 가능한 신호만으로 표현하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{f0} = \frac{(Z_{m0} - Z_{f0})I_{af0} - (Z_{m0} - Z_{f0})I_{s0}}{(1-x)(Z_{m0} - Z_{f0})} = \frac{I_{af0} - I_{s0}}{(1-x)} \quad (6)$$

$$I_f = 3 \cdot I_{f0} = 3 \cdot \frac{I_{af0} - I_{s0}}{(1-x)} \quad (7)$$

식 (7)의 고장점 전류를 식 (1)에 대입하면 미지항은 $R_1, L_1, R_f/(1-x)$ 로 표현할 수 있으며 식 (8)과 같은 행렬식으로 미지항을 계산할 수 있다.

$$V(k) = A(k) \cdot x(k) = [a_1(k) \ a_2(k) \ a_3(k)] \cdot x(k) \quad (8)$$

여기서, $V(k) = V_{ap}(k)$

$$x(k) = \left[R_1(k) \ L_1(k) \ \frac{R_f}{(1-x)}(k) \right]^T$$

$$a_1(k) = I_{ap}(k) + K_f I_{af0}(k) + K_{rm} I_{s0}(k)$$

$$a_2(k) = \frac{dI_{ap}(k)}{dt} + K_l \frac{dI_{af0}(k)}{dt} + K_{lm} \frac{dI_{s0}(k)}{dt}$$

$$a_3(k) = 3 \cdot (I_{af0}(k) - I_{s0}(k))$$

2.3 건전회선의 영상분 전류를 이용 못하는 경우

2회선 중에서 1회선의 운전이 중지되어 계전기의 통신 기능이 정지되거나 또는 통신장애로 인해 영상분 전류를 이용하지 못하는 경우에는 건전회선의 영상분 전류의 이용이 어려워 영상분 상호결합의 정확한 보상이 어려워진다. 이러한 경우에는 식 (9)과 식 (10)과 같이 1회선 운전과 2회선 운전에 따라 건전상의 영상분 전류를 고장회선의 영상분 전류와 고장거리 그리고 계통 임피던스의 함수로 보상하여야 한다[2].

i) 1회선 운전

$$I_{s0} = \frac{Z_{m0}[(1-x)Z_{f0} - xZ_{d0}]}{Z_{f0}[(1-x)Z_{f0} + Z_{d0}] - (1-x)Z_{m0}^2} \cdot I_{af0} \quad (9)$$

ii) 2회선 운전

$$I_{s0} = \frac{xZ_{d0} - (1-x)Z_{f0}}{(2-x)Z_{d0} + (1-x)(Z_{f0} + Z_{f0} + Z_{m0})} \cdot I_{af0} \quad (10)$$

3. 최소자승법을 이용한 가변 데이터 윈도우 기법

3.1 최소자승법

최소자승법은 주어진 방정식의 개수가 미지수의 개수보다 많아 정확한 해를 구할 수 없는 경우에 추정해와 실제 해의 오차를 최소화하여 가장 근사적인 해를 추정하는 기법이다. 고장점 추정을 위해 제시된 방정식으로부터 미지행렬 $x(k)$ 를 계산하기 위해서 식 (11)과 같이 의사 역행렬을 이용하면 구할 수 있다.

$$x(k) = (A(k)^T \cdot A(k))^{-1} \cdot A(k)^T \cdot V(k) \quad (11)$$

최소자승법을 적용함으로써 시간영역에서 연산을 하면서 동시에 연속적으로 계측되는 데이터를 자유로운 크기의 윈도우로 선정할 수 있어 고장상황에 따라 적절한 데이터 윈도우로 최적화할 수 있다.

3.2 가변 데이터 윈도우 기법

최소자승법을 이용하는 경우에 데이터 윈도우의 크기를 자유롭게 선정할 수 있어 일정한 데이터 윈도우를 이용하는 DFT기법에 비해 보다 신속하게 고장 임피던스를 추정할 수 있다[3]. 정상시에는 1/8주기의 고정된 크기의 데이터 윈도우를 이용하여 연산을 하다가 고장상황이 발생되면 식 (12)과 식 (13)에서와 같이 연속적으로 추정된 임피던스의 차가 설정된 값보다 큰 경우에는 윈도우의 크기를 증가시킨다.

$$\begin{aligned} Z_{diff}(k) &= Z(k) - Z(k-1) \\ Z_{diff}(k) > Z_{set} &\Rightarrow W = W + 1 \end{aligned} \quad (12)$$

고장 임피던스가 한 주기 내에 수렴하는 경우에는 그때의 윈도우의 크기를 최종 윈도우로 선정하여 임피던스를 추정한다. 그러나 윈도우 크기가 한 주기가 넘도록 수렴하지 못하는 경우에는 계전기의 연산부담을 감소시키기 위해 한 주기 데이터 윈도우를 최종 데이터 윈도우로 선정하도록 하였다. 그림 3은 가변 데이터 윈도우 기법을 이용한 고장점 추정을 위한 전체적인 동작의 흐름도이다.

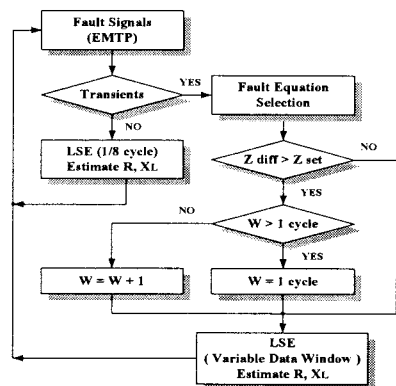


그림 3 고장 임피던스 추정을 위한 흐름도
Fig. 3 Flowchart for the fault impedance estimation

4. 사례 연구

4.1 모델 계통

병행 2회선 송전선의 모델 계통은 400[kV]의 양 전원을 가진 전체 선로의 길이가 60[km]인 선로이다. 전자과도해석 프로그램인 EMTP를 이용하여 계통을 모델링하고 여러 운전조건에 따라 다양한 고장을 시뮬레이션 하여 데이터를 추출하였다. 샘플링 주파수는 3840[Hz], 즉 한 주기당 64샘플로 시뮬레이션을 수행하였다.

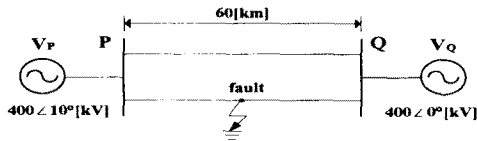


그림 4 병행 2회선 송전선 모델 계통
Fig. 4 Model system of Parallel transmission line

4.2 고장점 수렴속도 비교

그림 5는 고장점 추정시의 데이터 윈도우의 크기 변화와 1주기 윈도우의 DFT기법, 1/4주기 윈도우의 최소자승법, 그리고 1주기 윈도우의 최소자승법과의 수렴특성을 비교하기 위해서 고장발생각이 90°에서 발생한 고장의 대해 리액턴스 성분의 추정특성을 비교하였다.

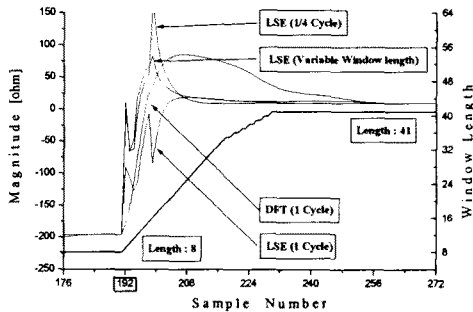


그림 5 가변 윈도우 크기 변화와 수렴특성 비교
Fig. 5 Variation of variable window length and comparison of the convergence characteristics

고장이 발생하기 전인 192샘플까지는 8샘플(1/8주기)이었던 윈도우 크기가 고장후에 점차 증가하여 41샘플에서 최적화되었다. 또한 고정 윈도우 크기의 기법과의 리액턴스 성분의 수렴특성을 비교한 결과 보다 안정적이며 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

4.3 고장점 추정 결과

영상분 상호결합에 가장 크게 영향을 미치는 고장저항에 대한 영향을 고려하기 위해서 선로 50%지점에서 발생한 고장에 대해 고장저항의 영향을 고려하지 않은 경우와 고장저항의 영향을 고려한 식(3)과 식(8)의 임피던스 추정값을 비교하였다. 추정의 신뢰도는 식 (13)과 같이 전체 송전선의 임피던스에 대한 고장점까지의 실제 임피던스와 추정 임피던스의 차의 비로 나타난 어려움으로 비교하였다.

$$error\ ratio = \frac{Z_{real} - Z_{estimate}}{Z_{total}} \times 100 [\%] \quad (13)$$

표 1 고장저항에 대한 추정 에러

Table 1 Estimation error to the fault resistance

방법	Rr						
	1	5	10	50	100	200	
보상전	R[Ω]	1.163	4.144	7.827	35.626	66.620	118.450
	XL[Ω]	9.335	9.160	8.920	1.126	1.126	-10.953
	e[%]	0.28	3.25	12.85	141.45	302.89	579.81
식 (3)	R[Ω]	0.392	0.360	0.437	0.522	0.102	-0.030
	XL[Ω]	9.396	9.380	9.369	9.217	8.911	8.841
	e[%]	0.19	0.29	0.33	1.10	2.80	3.18
식 (8)	R[Ω]	0.245	0.590	0.506	0.646	0.490	0.530
	XL[Ω]	9.379	9.364	9.372	9.345	9.354	9.347
	e[%]	0.31	0.31	0.29	0.39	0.39	0.42

전체 선로의 50% 지점의 저항성분과 리액턴스 성분의 크기는 0.402[Ω], 9.432[Ω]이다. 표 1에서와 같이 고장저항의 크기가 5[Ω]이내에는 보상전에도 어려움이 크지 않았지만 10[Ω]이상인 경우에는 상당한 추정에러가 발생하였다. 하지만 고장저항의 영향을 고려한 식(3)과 식(8)을 적용한 경우에는 고장저항의 크기에 무관하게 정확한 고장점 추정이 가능하였다.

표 2는 원근단의 유입성분의 변화에 따른 영향을 비교하기 위해서 원근단과의 위상을 변화시켜가면서 고장점 추정시의 어려움을 비교하였다.

표 2 전원 위상차에 대한 결과

Table 2 Result to the source phase angle

항목	위상차[°]				
	-25	-15	0	15	25
R[Ω]	0.4111	0.4119	0.4134	0.4143	0.4147
X[Ω]	9.3702	9.3737	9.3802	9.3812	9.3808
에러[%]	0.33	0.31	0.27	0.27	0.27
윈도우 크기 [s]	12	13	21	27	28

양 전원의 위상차가 커짐에 따라 전력량이 증가하고 부하전류의 크기가 커지며 또한 고조파의 영향도 심해진다. 하지만 영상분 상호결합을 보정한 기법을 적용함으로써 에러율이 0.5[%] 이내로 수렴하였으며 최종 윈도우 크기도 최대 28샘플에서 최적화되었다.

5. 결론

본 논문에서는 가변 데이터 윈도우 기법을 이용함으로써 기존의 고정 크기 데이터 윈도우 기법에 비해 최적의 데이터 윈도우를 이용하여 보다 신속하게 고장점을 추정할 수 있었다. 또한 고장 발생시의 병행 2회선 송전선의 운전상황과 계전기에서 취득 가능한 입력 데이터에 따라 최적의 방정식을 적용함으로써 영상분 상호결합으로 인해 발생하는 고장점 추정 오차를 최소화할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. S. Sachdev, "Design of a Distance Relay Using Adaptive Data Window Filters", Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference, Vol. 2, pp. 610-614, 2000.
- [2] Yi Hu, D. Novosel, M. M. Saha, "Improving parallel line distance protection with adaptive techniques", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, vol. 3, pp. 1973-1978, 2000.
- [3] 정효성, 최상열, 신명철, 최소자승법을 이용한 적용형 데이터 윈도우의 거리계전 알고리즘, 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 8, pp. 371-378, 2002. 8