

### 노이즈 제거기법을 이용한 지중송전계통 고장점 추정

정재균\* 이종범  
원광대

### Fault Location Using Noise Cancellation Technique on Underground Power Cable Systems

Chae-Kyun Jung Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - The fault location algorithm based on wavelet transform was developed to locate the fault more accuracy after the operation of relay. The stationary wavelet transform(SWT) was introduced instead of conventional discrete wavelet transform(DWT) because SWT has redundancy properties which is more useful in noise signal processing. The algorithm was based on the correlation of wavelet coefficients at multi-scales. Fault location algorithm was tested by simulation on real power cable system. From these results, the fault can be located even in very difficult situations, such as at different inception angle and fault resistance.

#### 1. 서론

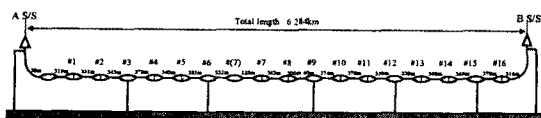
지중송전계통은 대규모 산업시설이나 전력수요밀도가 높은 대도시 지역을 중심으로 포설되어 있기 때문에, 고장이 발생하면 인명사고는 물론 장시간 정전사고로 인한 국가 경제에 치명적인 영향을 주는 등 2차적인 파급 영향이 크게 나타난다. 또한 지중송전계통은 지하에 매설되어 있기 때문에 가공선에 비해 유지 보수가 곤란하고, 고장 발생 시 정확한 고장점 탐지가 매우 어려워 고장 수리 및 복구에도 장시간이 소요되는 단점이 있다. 그러므로 신뢰성 있는 지중송전계통의 운용을 위해 현장 적용 가능한 새로운 고장점 추정 기법의 개발은 매우 시급한 실정이다. 특히, 국내의 경우는 급격한 전력수요 증가 및 하절기 첨두부하 상승 등으로 인한 과부하 운전이 빈번히 이루어지고 있기 때문에 노후 케이블에서는 사고 발생의 가능성이 높아 신속한 고장점 탐지에 대한 새로운 기술 개발이 더욱 절실히 요구되어 왔다.

일반적으로 진행파를 이용한 고장점 추정 방법은 고장점이나 반대모선에서 반사되는 과도신호를 이용한다[1-4]. 특히, 고장점에서 반사되는 신호는 신호의 일부가 반대 모선 방향으로 투과되기 때문에 측정모선에 이르는 신호는 매우 약해지게 되며 또한 이와 같은 과도신호는 가공선로와는 달리 케이블에서 감쇄가 크게 발생하므로 반사파의 신호는 더욱 약해질 수 있다[5]. 따라서 케이블 과도현상에서 발생하는 노이즈의 레벨은 반사파의 레벨 보다 더욱 크게 나타날 수 있으므로 반사파 신호로부터 노이즈를 제거하는 필터의 개발은 케이블 계통의 고장점 추정에 있어 매우 중요한 부분이다. 또한 이러한 진행파 신호에 포함된 다량의 노이즈는 지중송전계통에서 진행파를 이용한 고장점 추정과 고속 보호계전알고리즘 개발에 많은 어려움을 주고 있다.

따라서 본 논문에서는 과도신호와 노이즈로부터 반사파를 판별하기 위한 새로운 알고리즘을 이용해 정확하게 고장점을 탐지하는 새로운 기법을 개발하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 멀티스케일에서 웨이브렛 계수의 상호관계를 바탕으로 한 것이며, 기존의 DWT(discrete wavelet transform)에 비해 노이즈 신호처리에 더욱 유리한 특징을 가지고 있는 SWT(stationary wavelet transform)를 적용하였으며, 웨이브렛 함수는 "db4"를 사용하였다.

#### 2. 지중송전계통 모델링

본 논문에서 검토한 지중송전계통은 154kV, OF 2000w 케이블로 총 선로길이가 6.284km인 실제계통 모델이다. <그림 1>은 본 논문에서 적용한 5개 섹션의 크로스본드 대구간과 16개의 접속부를 가지고 있는 실제계통 모델의 계통도이다. 본 논문에서는 제안된 고장점 추정기법의 검증에 위해 <그림 1>의 실제계통에서 발생한 1선지락고장을 고려하였으며, 이의 모델링 및 해석을 위해 ATP(alternative transients program)를 이용하였다. 샘플링율은 1MS/sec이며, 진행파의 전파속도는  $1.67487 \times 10^8$  km/sec 이다. 또한 더욱 신뢰성 있는 검증을 위해 고장 상, 위상, 저항 거리를 등을 변화한 다양한 고장조건을 적용하였다.



<그림 1> 지중송전계통 계통도

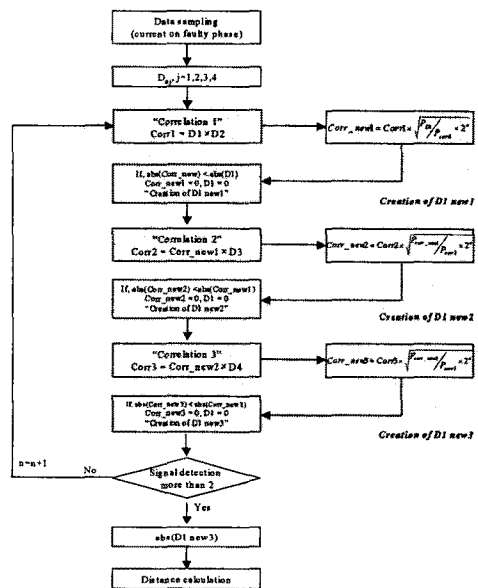
#### 3. 노이즈 제거 기법 개발

웨이브렛 분해과정을 통해 얻어진 1단계 Detail 성분의 신호(D1)에는 과도신호에 포함된 다량의 노이즈가 함유되어 있으며, 고장이 발생한 이후에 샘플링된 신호에 불규칙적인 피크점들이 불규칙적으로 여러 곳에서 발생한다. 이는 고장점까지의 거리계산에 심각한 오차 요인이 된다[6].

실제로 지중송전계통에서 발생하는 과도현상은 외부 환경적인 영향 등에 의한 간섭으로 높은 주파수 영역의 노이즈가 발생되므로 노이즈와 과도신호

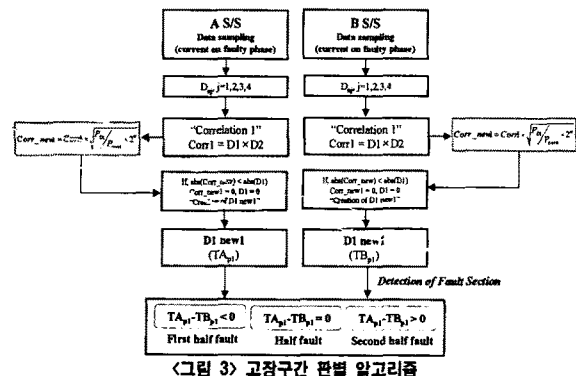
를 판별하기가 매우 어렵다. 즉, 기존 단순 웨이브렛 적용으로는 고장점에서 반사되는 과도신호를 원활히 검출할 수 없으며, 이는 결국 정확한 고장점 추정에 심각한 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 노이즈를 제거하는 방법은 진행파를 이용한 고장점 추정에 있어 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

본 논문에서는 고장 발생시 나타나는 과도신호에 대한 Multi-Scale 웨이브렛 분석을 통해 검출된 신호의 상호관계(correlation)를 이용해 노이즈를 제거하는 새로운 기법을 개발하여 제시하였다. 즉, 다량의 노이즈가 포함된 Detail 신호를 Multi-Scale Correlation 기법을 이용해 3단계에 걸쳐 신호를 필터링 한 후 최종적으로 노이즈가 완전히 제거된 새로운 신호를 출력하는 것이다. <그림 2>에서는 노이즈 제거를 위한 알고리즘의 과정을 플로우차트로 나타내었다.



<그림 2> 노이즈 제거 기법의 흐름도

#### 4. 고장구간 판별 알고리즘



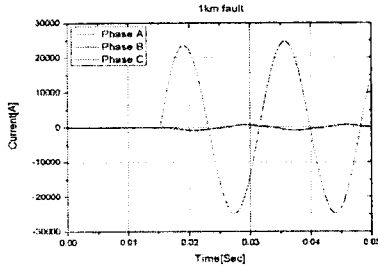
<그림 3> 고장구간 판별 알고리즘

본 논문에서 고장점 추정을 위해 새롭게 제안한 알고리즘 수행을 위해서는 먼저 발생한 고장이 중간점을 기준으로 전반부인지 혹은 후반부인지를 구분하는 고장구간 판별이 이루어져야 한다. 따라서 <그림 3>과 같이 양단 모선에서 측정된 신호를 노이즈 제거 알고리즘에 적용시켜 양단 모선에서 측정된 신호에서 1차 필터링과정을 거친 후 추출된 D1 new1 신호의 첫 번째 피크 값에 도달하는 시간을 TA<sub>pi</sub>, B/S에서 추출한 신호가 TB<sub>pi</sub> 일 때 이 두 신호의 차(TA<sub>pi</sub> - TB<sub>pi</sub>)가 음수이면 전반부 고장(first half fault), 양수이면 후반부 고장(second half fault), 0이면 중간점 고장(half fault)으로 구분하게 된다.

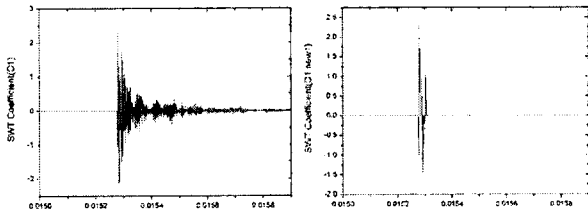
### 5. 고장점 추정 기법

본 논문에서 제시한 고장점 추정 알고리즘은 각각의 고장에서 고장점출 및 고장상 판별 과정을 거친 후 고장구간이 판별 되면 Multi Scale Correlation 기법을 이용해 3단계에 걸쳐 신호를 필터링하게 된다. 필터링 과정을 거쳐 최종적으로 노이즈가 제거된 새로운 신호가 출력되면 피크값에 이르는 시간을 검출하여 고장구간에 따라 고장점까지의 거리를 산정한다. 본 논문에서 모델링 한 OF 2000m 케이블의 전파속도는  $1.67487 \times 10^5$  km/sec이다.

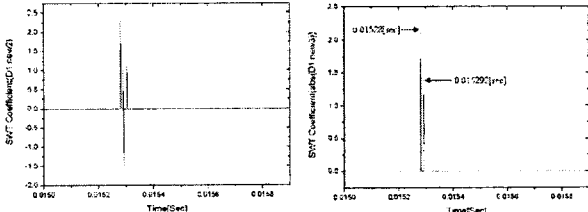
<그림 4>에서는 모든 고장 조건 중 고장저항이 1Ω이고 고장위상이 60°인 1선지락고장이 1km 지점 A상에서 발생하였을 때 측정점(A S/S)에서 검출한 고장전류 파형을 나타내었으며, 각 단계별 노이즈 제거과정을 나타내었다. 그림에서처럼 D1신호에는 다량의 노이즈가 함유되어 있으나, D1 new1과 D1 new2의 과정을 거치면서 노이즈는 현저히 저하되며 D1 new3 신호를 통해 정확히 반사되는 시간을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 노이즈 제거 과정은 반복 과정 없이 첫 번째 차수(n=1)에서 완료하였다. 고장구간 판별 결과  $TA_{p1}$ 은 0.01528초  $TB_{p1}$ 은 0.015306초로 " $TA_{p1}-TB_{p1}$ "은 음수로 판명되어 전반부 고장으로 판별하였다. 따라서 최종적으로 검출된 진행과 도달시간  $TA_{p1}$  0.01528초와  $TA_{p2}$  0.015292초, 전파속도  $1.67487 \times 10^5$ 를 적용해 계산한 결과 식 (1)에서처럼 계산거리는 1.005km로 매우 정확하게 계산됨을 확인하였다. 계산오차는 0.079%이다.



(a) 1선지락시 A S/S에서 검출한 고장전류 파형



(b) D1 (c) D1 new1

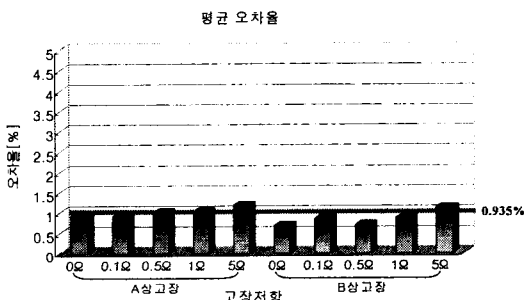


(c) D1 new2 (d) abs(D1 new3)

<그림 4> 고장점 추정 전체 흐름도

$$X = \frac{1.67487 \times 10^5 (0.015292 - 0.01528)}{2} = 1.005 [km] \quad (1)$$

<표 1>에서는 A상에서 1선지락고장 발생시 본 논문에서 고려한 모든 고장 거리 및 고장위상에서 고장저항 별로 고장점을 추정한 결과를 나타낸 것이다. 표에서처럼 고장저항 1Ω의 A상 고장시 평균 오차를 1.040%로 매우 정확하게 고장점이 추정됨을 확인하였다.



<그림 5> 평균 오차 비교

<그림 5>는 고장저항별 평균오차율을 나타낸 것으로 각 오차율 별 전체 평균 오차율은 0.935%를 보여 매우 우수한 고장점 추정 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이의 결과를 통해 본 논문에서 새롭게 개발한 고장점 추정 기법의 우수한 성능이 충분히 검증되었다. 무엇보다 고장위상, 고장저항, 고장거리 등 모든 고장조건에 관계없이 정확한 고장점 추정이 가능하므로 다양한 실제용 조건에서 활용이 가능할 것으로 사료된다.

<표 1> 고장점 추정 결과(고장상 : A, 고장저항 : 1Ω)

Fault inception angel	Fault point	n	Faulty phase A, fault resistance 1Ω			
			$TA_{p1}(TB_{p1})$ [sec]	$TA_{p2}(TB_{p2})$ [sec]	Calculated distance[km]	Error [%]
30°	1km	2	0.013894	0.013906	1.005	0.079
	2km	3	0.013900	0.013925	2.093	1.479
	3km	4	0.013906	0.013940	3.182	2.896
	4km	4	0.013902	0.013929	4.022	0.350
	5km	2	0.013896	0.013910	5.111	1.766
45°	1km	1	0.014587	0.014599	1.005	0.079
	2km	3	0.014593	0.014618	2.093	1.479
	3km	4	0.014599	0.014636	3.098	1.559
	4km	3	0.014595	0.014622	4.022	0.350
	5km	2	0.014589	0.014604	5.027	0.429
60°	1km	1	0.015280	0.015292	1.005	0.079
	2km	2	0.015286	0.015311	2.093	1.479
	3km	4	0.015292	0.015329	3.098	1.559
	4km	3	0.015288	0.015315	4.022	0.350
	5km	2	0.015282	0.015297	5.027	0.429
90°	1km	1	0.016670	0.016678	0.921	1.257
	2km	2	0.016673	0.016698	2.093	1.479
	3km	4	0.016679	0.016716	3.098	1.559
	4km	2	0.016675	0.016701	4.106	1.686
	5km	1	0.016669	0.016684	5.027	0.429
Average Error[%]						1.040

### 6. 결 론

본 논문에서는 노이즈 제거 기법을 이용한 지층송전계통 고장점 추정 알고리즘 개발하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 웨이블릿 분석 결과 출력되는 Detail 신호에 대한 Multi-Scale Correlation 기법을 적용해 3단계의 필터링 과정을 거쳐 노이즈를 제거하는 새로운 노이즈 제거 알고리즘을 개발하였으며, 다양한 고장사례 분석을 통해 노이즈가 효과적으로 제거됨을 검증하였다.
- 2) 고장구간은 양단모선에서 측정된 신호에 1단계 필터링 과정을 거친 후 추출된 D1 new1 신호의 시간간격을 이용해 판별된다.
- 3) 본 논문에서 새롭게 개발한 고장점 추정 기법은 전체선로의 전반부 및 후반 고장구간 판별이 가능하며, 고장점에서 근접한 모선의 신호를 이용하기 때문에 케이블 감쇄에 의한 신호검출의 어려움이 없는 등 기존 판단정보 이용시에 나타나는 문제점을 개선하였다. 실제 고장거리계산은 편단정보에 의해 개선되므로 기존 양단정보 이용시에 나타났던 시간 동기화에 따른 오차발생 가능성이 없을 뿐 아니라 기존 방법의 장점을 극대화하면서 단점은 개선한 있는 새로운 고장점 추정 기법을 개발하였다.
- 4) 고장점 추정기법은 전체 평균오차율이 0.935%로 매우 우수한 고장점 추정 성능을 보였으며, 특히 고장거리, 고장위상, 고장저항 등 고장조건에 관계없이 정확한 고장점 추정이 가능하므로 다양한 실제용 조건에서 활용될 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-27 4) 주관으로 수행된 과제임

### [참 고 문 헌]

- [1] W. Zhao, Y. H. Song, W. R. Chen, "Improved GPS Travelling Wave Fault Locator for Power Cables by Using Wavelet Analysis", *Electric Power System Research* 23(2001) 403-411
- [2] Styvaktakis, E., Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H., "A Fault Location Technique Using High Frequency Fault Clearing Transients", *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 19 Issue 5, pp. 50-60, May 1999
- [3] Z. Chen, Z. Q. Bo, F. Jiang, X. Z. Dong, G. Weller, N. F. Chin, "Wavelet Transform Based Accurate Fault Location and Protection Technique for Cable Circuits", *Proceeding of APSCOM 2000*, Oct. 2000
- [4] A. Abur, F. H. Magnago, "Use of Time Delays between Modal Components in Wavelet base Fault Location", *Electrical Power and Energy Systems*, No. 22, 2000
- [5] Kai Steinbrich, "Attenuation Behaviour of Single-core Power Cables", CIGRE-WG B1 05 session 20.06.03
- [6] X. H. Wang, "Characterization, detection and location of sheath fault on underground power transmission cables", PhD Thesis, Department of Electronic and Computer Engineering, Brunel University: London. 2001