

거리계전 알고리즘별 특성 비교

강상희, 이승재, 노재근, 양언필, 정종진
 명지대학교 전기공학과

Comparison of the characteristics of Distance Relaying Algorithms

Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, Jae-Keun No, Eon-Pil Yang, Jong-Jin Jeong
 Myongji University

Abstract - This paper presents some results after comparing the characteristics of 3 algorithms, which are discrete Fourier transform based algorithm, least square method, and modified differential approximation algorithm, used at most distance relays all over the world. In case of the DFT based distance relaying algorithm, the length of the algorithm data window and the cut-off frequency of an anti-aliasing low-pass filter adopted are fixed. On the other hand, the data window lengths are changed according to the corresponding low-pass filters in the rest two algorithms. In series of tests, the apparent impedance estimated by the modified differential approximation algorithm shows faster and more stable characteristics of convergence than the two others.

1. 서 론

거리 계전 방식은 송전선로 보호에서 가장 널리 사용되는 보호 방식으로, 계전기 설치점의 전압, 전류만을 입력신호로 사용하기 때문에 양단간의 통신선로를 이용할 필요가 없으며 또한 보호협조에 있어서도 사용이 용이한 특징을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 대표적인 3가지 거리계전 알고리즘인 직교변환법(DFT: Discrete Fourier Transform)[1], 최소자승법(LSQ: Least Square Method)[2], 수정미분방정식법(MDAA : Modified Differential Approximation Algorithm)[3]에 기초한 방식을 비교하여 각 알고리즘의 장단점을 파악하고 실 계통 적용에 있어서 좀더 빠르고 정확한 계통 보호가 이루어 질 수 있는 방법을 모색하는데 그 초점을 맞추었다. 각 거리 계전 알고리즘의 비교는 직교변환법의 경우 데이터 윈도우를 한주기에 고정시키고, 저역 통과 필터의 차단 특성을 중첩방지용으로 한정하고 직류옴셋 제거를 위한 FIR(Finite Impulse Response)필터의 사용 여부로 비교하였으며, 최소자승법과 수정미분방정식법의 경우는 데이터 윈도우의 유연성을 살펴 저역 통과 필터 스펙을 다양하게 바꾸면서 그에 준하는 데이터 윈도우를 설정해서 수렴속도의 특징을 살펴보았다. 그리고 각 알고리즘의 비교를 위한 사고 데이터는 EMTP (Electromagnetic Transients Program)를 사용하여 1회선 송전선로에서 사고 위상각 0° 및 90° 1선 지락 사고를 모의하여 직류옴셋과 고조파의 영향을 최대한 고려하여 각 거리계전 알고리즘의 특성을 비교한다.

2. 본 론

2.1. 거리 계전 알고리즘

본 논문에서 비교한 3가지 거리 계전 알고리즘은 다음과 같다.

2.1.1. 직교변환법

계전기 설치점에서부터 사고점까지 선로의 임피던스 측정은 거리계전기가 사고 유·무를 판별하고 사고시 적절한 트립신호를 주기 위한 기본 요소이다. 이 임피던스는 계전기 설치점에서 샘플된 계전신호를 순차적으로 연산하여 전압, 전류의 기본 주파수 성분을 추출하여 계산되어진다. 직교변환법은 샘플된 파형으로부터 기본파 성분을 구하는데 적합한 방법중의 하나로써 이 알고리즘은 연속적이고 주기적인 신호에서 특정 주파수 성분을 추출하는데 적합하며 기본식은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_1 + jB_1 &\equiv \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-j(\frac{2\pi}{N}k)} & (1) \\
 A_1 &= \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cos(\frac{2\pi}{N}k) \\
 B_1 &= -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \sin(\frac{2\pi}{N}k) \\
 C_1 &= \sqrt{A_1^2 + B_1^2} & (2) \\
 \phi_1 &= \tan^{-1}(B_1/A_1)
 \end{aligned}$$

여기서, A_1, B_1 : 기본파의 real·imaginary phasor
 C_1, ϕ_1 : 기본파의 크기(절댓값) 및 위상
 $f(k)$: 입력 신호의 샘플링 데이터
 N : 한 주기 샘플링 횟수

계통의 임피던스 Z 는 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$Z = \frac{C_{IV}}{C_{II}} \quad \phi_z = \phi_{IV} - \phi_{II} \quad (3)$$

직교변환법은 DC, 기본파, 고조파가 포함된 입력 신호에서 기본파 성분을 추출하는데 사용된다.

2.1.2. 최소자승법

최소자승법은 입력받는 계전 신호에 대해 직류분, 기본파, 고조파의 형태로 신호를 가정하고, 이 때 세워진 방정식을 이용해 연립방정식을 풀어 가정한 식의 계수를 찾는 것이다. 여기서 사용한 최소자승법은 계전신호의 형태를 감쇄하는 직류옴셋, 기본파, 3조파, 5조파, 7조파 성분만으로 가정한다. 또한 입력 신호의 고차 고조파성분을 중첩방지 저역통과 필터를 사용해 제거한 후의 신호를 사용한다. 따라서 미지 계수는 감쇄하는 직류옴셋, 각 조파별 전압·전류성분의 페이저 값이 되며 이는 연속적으로 얻어진 샘플 방정식을 통해 구해진다. 즉, 가정한 전류 전압 파형 $v(t_1)$ 과 $v(t_2)$ 는 식 (4)와 같은 형태를 갖게되며 시간변화에 따라 순차적으로 각각 m 개의 샘플을 사용한 m 개의 방정식이 세워지고, 이 방정식을 미지수(x)와 기지수(a), 샘플값(s)의 행렬로 정리하면 식 (5)와 같아진다. 여기서는 3조파 성분까지 고려한 것을 나타냈다.

$$i(t_1) = K_1 + \frac{-K_1}{\tau} t_1 + \frac{K_1}{2\tau^2} t_1^2 + K_{21} \cos \theta_1 \sin(\omega_0 t_1) + K_{21} \sin \theta_1 \cos(\omega_0 t_1) + K_{23} \cos \theta_3 \sin(3\omega_0 t_1) + K_{23} \sin \theta_3 \cos(3\omega_0 t_1)$$

$$i(t_2) = K_1 + \frac{-K_1}{\tau} t_2 + \frac{K_1}{2\tau^2} t_2^2 + K_{21} \cos \theta_1 \sin(\omega_0 t_2) + K_{21} \sin \theta_1 \cos(\omega_0 t_2) + K_{23} \cos \theta_3 \sin(3\omega_0 t_2) + K_{23} \sin \theta_3 \cos(3\omega_0 t_2)$$

⋮ (4)

여기서,

$$K_1, \frac{-K_1}{\tau}, \frac{K_1}{2\tau^2} : \text{DC 크기}$$

$$K_{21} \cos \theta_1, K_{21} \sin \theta_1 : \text{기본파 크기}$$

$$K_{23} \cos \theta_3, K_{23} \sin \theta_3 : \text{3조파 크기}$$

$$\theta_1, \theta_3, \tau : \text{기본파, 3조파 위상각, DC성분의 시정수}$$

지수 감쇠하는 DC 성분은 Taylor 전개에서 초기 3항만 취한다.

$$\therefore e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t_1}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t_1}{\tau}\right)^2$$

7개의 미지수를 갖는 m개의 선형방정식은 다음과 같다.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{17}x_7 = s_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{27}x_7 = s_2$$

⋮

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{m7}x_7 = s_m$$

이를 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A \times X = Y$$

m×7 7×1 m×1

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{17} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{27} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m7} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_7 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_m \end{bmatrix}$$

위의 A 행렬이 정방행렬이 아니기 때문에 의사역행렬을 통해 계산한다.

$$A^T A X = A^T S \quad (5)$$

$$X = [A^T A]^{-1} A^T S \quad (6)$$

최종적으로 구해진 식 (6)의 X 행렬이 각 미지수의 값을 나타낸다.

2.1.3. 수정미분방정식법

보호 대상이 되는 송전선로를 물리적 모델로 표현하게 되면 R, L의 회로로 나타낼 수 있으며 이 때의 전압방정식을 세우면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

이 때 입력신호인 전압, 전류의 샘플링 값을 이용해서 R과 L값을 구하게 되는데 미지수가 두개이기 때문에 샘플 시점을 달리해서 두 개의 전압방정식 인고 두 방정식으로부터 미지수인 R, L값 즉, 식 (8)을 구하게 된다.

$$R = \frac{(v_m + v_{m-1}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (v_{m-1} + v_{m-2}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_m + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)}{(i_m + i_{m-1}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (i_{m-1} + i_{m-2}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_m + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)} \quad (8)$$

$$L = \frac{(i_m + i_{m-1})(v_{m-1} + v_{m-2}) - (i_{m-1} + i_{m-2})(v_m + v_{m-1})}{(i_m + i_{m-1}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-2} \right) - (i_{m-1} + i_{m-2}) \left(\left(\frac{di}{dt} \right)_m + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} \right)}$$

윗 식에서 구해진 R, L의 미분식을 근사하기 위해서 연속적으로 샘플링된 전류신호의 차를 이용하게 되며, 미분 근사식의 오차를 없애기 위해서 다음과 같은 계수 K를 사용한다.

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_m + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} = K_0 (i_m - i_{m-1}) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } K_0 = w \cot \frac{wT}{2}$$

i_m, i_{m-1} : 전류의 샘플링 데이터

식 (9)는 단일 주파수(w)를 갖는 신호가 입력될 때는 그 계산 결과가 정확하지만, 그 외에 다른 주파수가 섞인 신호가 입력될 때는 오차가 발생하게 된다. 이 때 발생하는 오차를 줄이기 위한 방법으로 수정미분방정식법이 있으며 그 기본식은 (10)과 같다.

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_m + \left(\frac{di}{dt} \right)_{m-1} = \sum_{k=0}^{\infty} K_k (i_{m-1+k} - i_{m-k}) \quad (10)$$

수정미분방정식법은 k의 차수만큼 주파수성분을 고려하게 되며 임의의 각주파수 w_1, w_2, \dots, w_k 일 때 오차가 0이 되는 특성을 갖게 된다.

2.2. 거리계전 알고리즘별 비교 분석

거리계전 알고리즘간의 분석을 위해서 그 비교 기준을 지역통과 필터 스펙에 따른 데이터 윈도우의 크기로 잡았다. DFT의 경우 알고리즘 특성상 한주기 정보를 이용해 야 페이지 추출이 가능하기 때문에 데이터 윈도우의 크기를 한주기 샘플링 횟수인 32로 했으며, 중첩방지를 위해 입력측 필터의 차단주파수를 960[Hz]에서 이득 0.1로 하였다. 그리고 최소자승법과 수정미분방정식법의 경우는 입력측 필터의 차단주파수를 3조파, 5조파, 7조파, 9조파로 하여 이때의 이득을 0.1로 두었으며, 조건에 따른 데이터 윈도우의 크기는 표1에 정리하였다. 지역통과 필터의 기본형은 2차 Butterworth 필터를 사용하였다.

표 1. Data window 크기

지역통과 필터 정지대역 특성	LSQ (미지수 수)	MDAA
3조파에서 이득 0.1	LSQ 1 7 (5)	MDAA 1 3
5조파에서 이득 0.1	LSQ 2 9 (7)	MDAA 2 5
7조파에서 이득 0.1	LSQ 3 12 (9)	MDAA 3 7
9조파에서 이득 0.1	LSQ 4 14 (11)	MDAA 4 9

2.2.1. EMTF를 이용한 사고모의

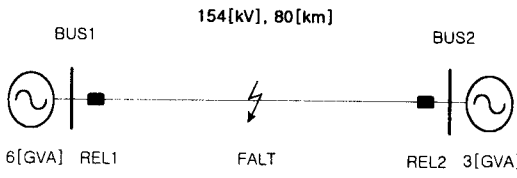


그림 1. 모델 계통

사고모의는 EMTF를 사용하였으며 모델 계통은 그림 1에서 보인 것과 같이 154[kV], 80[km] 1회선 가공 송전선로에서 1선 지락 사고를 모의하였다. 이 때 사고 위상각 0° 및 90° 인 사고를 모의하여 직류오프셋과 고조파의 영향을 최대한 고려했으며 고장위치는 선로의 20%와 80%지점 두 경우를 고려했다.

2.2.2. 거리계전 알고리즘별 특징

알고리즘의 개별적인 특징을 비교하기 위해, 직교변환법의 경우 직류오프셋 제거 전·후의 리액턴스의 수렴 특성이 그림 2에 나타나 있고, 최소자승법의 경우 저역통과 필터 사양과 데이터 윈도우의 변화에 따른 특성이 그림 3에 나타나 있고, 수정미분방정식법의 경우 입력 신호에 고조파가 포함되었을 때 미치는 영향을 살펴보기 위한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 각 알고리즘의 개별적인 특징을 명확하게 보기 위해서 그림에서의 스케일은 다소 차이를 두었다.

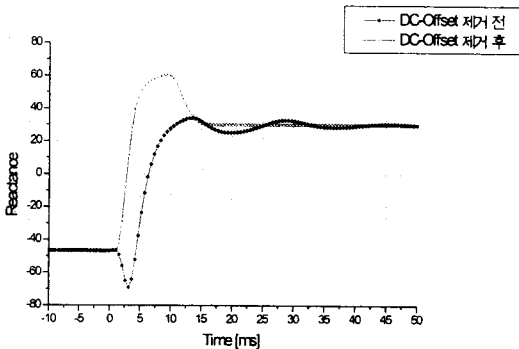


그림 2 사고 위상각 0° 고장거리 80% 지점(DFT)

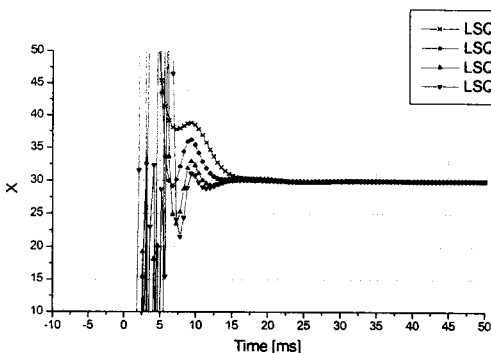


그림 3. 사고 위상각 0° 고장거리 80%지점(LSQ)

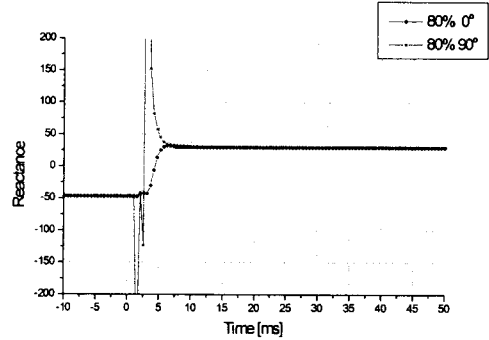


그림 4. 사고 위상각 0°, 90° 고장거리 80%지점(MDAA3)

직교변환법은 사고 발생시 입력 신호에 직류오프셋이 포함되면 임피던스 수렴시 진동하는 특징을 보이게 된다. 그림 2는 직교변환법을 적용했을 때 직류오프셋의 영향을 알아보기 위한 것으로 사고 위상각 0°, 고장거리 80%지점에서 직류오프셋의 제거 전·후의 리액턴스의 수렴 특성을 비교한 것이다. 각각의 수렴 시간은 고장 시점을 0[ms]로 했을 때 구해진 리액턴스의 값이 오차범위 $\pm 5\%$ 이내로 수렴하는 시간을 측정한 것으로 직류오프셋을 제거하기 전에는 31.77[ms], 제거 후에는 15.1044[ms]로 측정되었다. 따라서 직교변환법을 거리계전 방식에 적용한다면 직류오프셋을 제거하는 것이 필수 요건임을 알 수 있다.

그림 3은 사고 위상각 0°, 고장거리 80%지점에서 최소자승법을 적용했을 때의 리액턴스값의 수렴특성을 나타낸 것으로 이 경우에는 필터 특성 및 데이터 윈도우 크기에 따른 수렴 속도를 비교해 볼 수 있다. 일반적으로 데이터 윈도우의 크기가 작으면 수렴속도는 빠르게 되는데, 윈도우가 작아짐에 따라 대응할 수 있는 고조파 성분의 수가 적어지고, 따라서 입력측 저역통과필터의 차단 주파수가 낮아져 필터의 과도지연 특성이 나빠져 오히려 데이터 윈도우가 클 때(저역통과 필터의 차단주파수를 높게 잡았을 때)보다 수렴 속도가 늦게 나타났다. 그리고 미지수 수와 방정식 수의 적절한 비를 설정하기 위해서 경험치를 바탕으로 방정식의 수를 달리해가면서 수렴 특성을 본 결과 미지수 수와 방정식 수의 비율을 1 : 1.25로 했을 때가 안정된 수렴 결과를 보이는 최소 데이터 윈도우가 되었다.

그림 4는 사고 위상각 0° 와 90° 고장거리 80% 지점에 대한 수정미분방정식법의 결과이다. 일반적으로 90° 사고시 고조파의 영향이 최대로 나타나게 되는데 수정미분방정식법은 미분식을 연속적으로 샘플된 전류신호의 차로 근사한 방식이기 때문에 고조파 함유시 오차율이 크게 나타날 수 있다. 본 결과는 저역통과 필터를 사용해서 수정미분방정식법이 대처하지 못하는 고조파를 제거한 후의 결과이다. 임피던스가 수렴하기 전의 과도기간에서는 90° 사고의 경우 임피던스가 크게 흔들리고 있으나, 두 경우 모두 특정시간 경과 후의 수렴안정성은 거의 동일하게 나타난다.

2.2.3. 거리계전 알고리즘간의 비교

각 알고리즘을 사고 위상각 0°, 90° 시 80[km]선로에서 고장거리 20%, 80%지점에서의 1선 지락사고에 대해서 비교 검토하였다. 표 1에 정리한 저역통과 필터 사양에 따른 데이터 윈도우 크기가 다른 4경우를 고려하면 직교변환법(알고리즘 특성상 한주기 데이터 윈도우 사용)을 제외한 나머지 두 알고리즘은 각 경우별 총 16가지에 대해서 검토하였다. 그중 표 1의 3번째 조건에 속하는 즉, 데이터 윈도우 크기가 직교변환법 32개, 최소자승법 12개, 수정미분방정식법 7개 일 때의 결과를 수록하였다. 그림 5는 사고 위상각 0°, 고장거리 20%지점, 그림 6은 사고 위상각

90°, 고장거리 20% 지점, 그림 7은 사고 위상각 0°, 고장거리 80%지점, 그림 8은 사고 위상각 90°, 고장거리 80%지점에서의 직교변환법, 수정미분방정식법, 최소자승법의 수렴 특성을 각각 보여주었고 있다. 표 2에 각 경우에서의 수렴시간을 정리하였다.

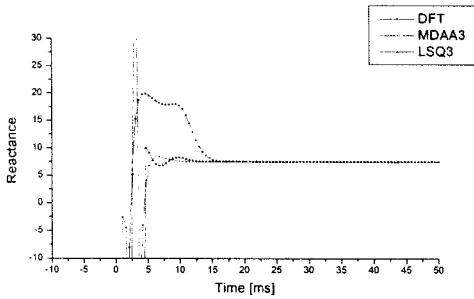


그림 5. 사고 위상각 0° 고장거리 20% 지점

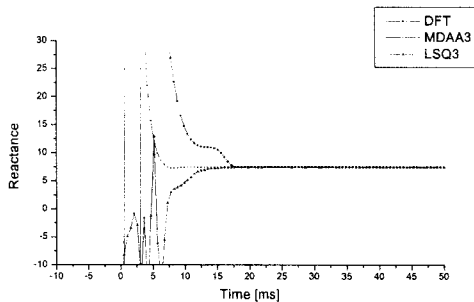


그림 6. 사고 위상각 90° 고장거리 20% 지점

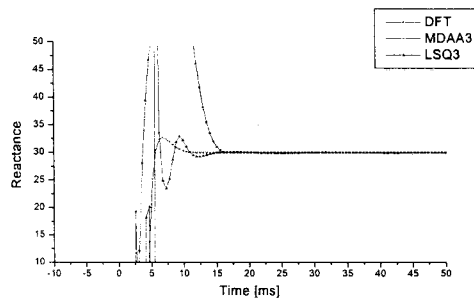


그림 7. 사고 위상각 0° 고장거리 80% 지점

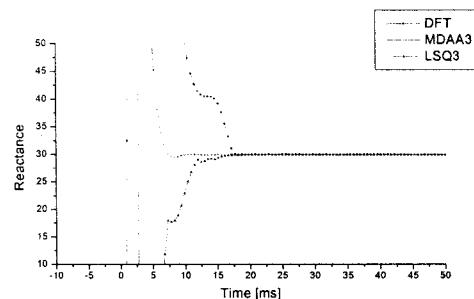


그림 8. 사고 위상각 90° 고장거리 80% 지점

표 2. Reactance 오차가 ±5% 이내로 수렴하는 시간

사고종류 (1선지락)	고장거리 (80km선로)	수렴시간[ms]		
		DFT	LSQ3	MDAA3
0° 사고	20%	15.1044	9.8964	8.8548
	80%	15.1044	10.4172	8.8548
90° 사고	20%	17.1876	13.5420	7.2924
	80%	17.1876	11.9796	7.2924

3. 결 론

본 논문에서는 거리계전 알고리즘의 대표적인 3가지 방식인 직교변환법, 최소자승법, 수정미분방정식법에 기초한 방식의 특성을 비교 검토하였다. 각 알고리즘의 비교를 위한 조건은 직교변환법의 경우 필연적으로 데이터 윈도우의 크기를 한주기로 했으며 직류옴셋 제거를 위한 FIR(Finite Impulse Response)필터를 적용했다. 또한 최소자승법과 수정미분방정식법은 저역통과 필터 사양에 따라 데이터 윈도우의 크기를 가변적으로 적용해서 그 때의 수렴 속도 및 오차를 비교했다. 그 결과 직교변환법의 경우 한주기 데이터를 사용해야하는 취약점 때문에 수렴시간이 한주기 시간에 준하는 15~17[ms] 근처에서 수렴을 보여 다른 알고리즘에 비해 수렴 속도면에서 느리다는 약점을 보였다. 최소자승법의 경우는 검토한 범위 내에서는 저역통과 필터의 차단 주파수를 높이고 데이터 윈도우의 크기를 늘렸을 경우에 수렴속도가 향상되는 특징을 보였는데 이는 저역통과 필터의 차단주파수를 낮게 잡았을 때 과도 지연 특성이 강하게 나타나는 특징이 반영되었기 때문이다. 수정미분방정식법의 경우 수렴 속도가 다른 두 방법에 비해 빠른 특징과 함께 오차를 또한 가장 적게 나타나 수렴 안정성이 가장 우수한 결과를 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] P.G. McLaren, M.A. Redrem "Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection", PROC.IEE, Vol. 122, No.11, November 1975
- [2] M.S. Sachdev, M.A. Baribeau, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, N0.6 Nov./Kec. 1979
- [3] Y.Ohura, T.Matsuda, M.Suzuki etc. "Digital Distance Relay with Improved Characteristics Against Distorted Transient Waveforms", IEEE Transactions on Power Deliveery, Vol.4, No.4, October 1989
- [4] Sang Hee. Kang, Nam Ho. Kim etc. "Digital Filter Design for Removing Exponentially Decaying DC-Offset Component from Relaying Signal", Trans. of IEE Japan, Vol.114-B, No.6, June 1994, pp. 601-608
- [5] A.T.Johns, S.K. Salman, Digital Protection for Power Systems, IEE Power Series 15, pp. 72-114