

디지털 보호계전을 위한 칼만필터링 기법

金喆煥*, 申明澈**

A Kalman Filtering Techniques for Digital Protective Relaying

Kim Chul-hwan*, Shin Myong-chul**

Summary

In this study, Kalman filtering theory is applied to the estimation of symmetrical components from fault voltage and current signal when it comes to faults with the power system. Kalman filtering method which was presented by R. E. Kalman has been extensively used in many field for estimating the necessary components from the noisy measurement data. An algorithm for estimating fault location accurately and quickly by calculating the symmetrical components from the extracted fundamental voltage phasor and current phasor is presented. Also, to confirm the validity of digital distance relaying techniques using Kalman filtering, it is shown the experimental results obtained by using the digital simulation of power system.

序 論

안정적인 전원공급을 위해서는 사고를 미연에 방지해야 하며, 사고 발생시에는 가능한 한 신속하게 고장점을 찾아 고장구간을 전전구간으로 부터 분리함으로써, 전전구간에 미치는 악영향을 감소시키고, 고장부분을 복구시켜 효율적인 전력계통의 운용을 도모하기 위한 보호계전 방식은 오래 전 부터 많은 연구가 행해지고 있다.

거리계전방식(distance relaying scheme)은 고장점에 대한 거리를 계산하기 위해 단지 국부적인

전기량만을 사용하기 때문에, 송전선로 보호분야의 활발한 연구부분으로, 많은 거리계전 알고리즘들이 제안되어 왔으며, 이러한 송전선 보호알고리즘은 회로 정수를 이용한 방법, 고장시 전압과 전류의 기본파를 이용한 방법, 그리고 기본파와 과도파를 이용한 방법등이 제안되었다. 이들 중에서 널리 이용되고 있는 기본파에 의한 송전선 보호 알고리즘은 직교변환(orthogonal transform)이론에 의하여, 기본파전압, 전류성분을 추출하여 거리계전 기법에 활용하는 것이다.

R. E. Kalman(1960)이 제시한 칼만 필터링(Kalman filtering) 방법은, 잡음이 섞인 측정치로부터 원하는 성분을 추출하기에 유용한 것으로

* 工科大學 電氣工學科

** 成均館大學校 電氣工學科

제어공학 분야나 통신공학 분야에서는 널리 활용되어 왔으나(Bergland 1972, Brown 1983, Childers et al. 1975, Gelb 1974, Sorenson 1985), 전력계통분야에의 적용은 미미한 실정이며, 특히 보호계통분야에의 적용은 Girgis et al. (1981, 1984)에 의해 최초로 시도되었다. 종래의 여러 필터링 방법에 비해 칼만필터링 방법의 우수성이 입증되었으므로 최근에는 Sachdev and Wood(1985) 등의 많은 연구자들이 이 방법을 이용한 연구결과를 발표하고 있다.

본 연구에서는 고장발생시 수반되는 과도성분으로부터 칼만필터링 방법을 이용하여, 기본과 전압, 전류성분만을 추출하고, 추출된 기본과 전압, 전류로부터 대칭성분을 계산하여, 신속하고 정확한 고장점을 산정하는 알고리즘을 개발하였다(Lewis et al. 1947, Phadke et al. 1977, 1983, Shin et al. 1987, 1989). 아울러 제시된 알고리즘의 타당성을 실증하기 위하여 디지털 시뮬레이션 프로그램인 EMTP (electromagnetic transients program) 프로그램을 통해 얻은 데이터를 사용하여, 칼만필터링 방법을 이용한 대칭성분 알고리즘을 적용해 봄으로써 그 결과를 비교, 검토하였다.

칼만필터를 이용한 거리계전 기법

1960년, R. E. Kalman은 상태 공간 개념을 이용하여 최소자승 필터링 문제(least squares filtering problem)를 정식화 하기위한 방법을 제시하였다. 칼만필터는 반복적인 최적 추정기(recursive optimal estimator)로, 칼만필터의 수학적 모델은 상태 공간 개념(state space concept)에 근거를 두고 있다.

본 연구에 칼만 필터링을 도입한 이유는 전력계통에 고장발생시 기본과성분은 잡음에 의한 비 기본과 성분을 포함한다. 디지털 보호계전을 위해서는 전압과 전류의 기본과 성분만이 필요하나, 비 기본과 성분도 포함되어 있으므로 이와 같은 비

기본과 성분을 잡음으로 처리하여, 측정치로부터 잡음을 제거하고, 기본과 성분만을 추출함으로써 효율적인 보호계전 방법을 도모하고자 한다. 칼만 필터링 기법을 이용하여, 기본과 성분의 최적 추정(optimal estimation)을 하기 위해서는 고장발생시의 비 기본과성분의 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 즉, 전압과 전류에 포함된 비 기본과 성분을 잡음 신호로 처리하여 고장 발생 빈도와 고장점의 확률에 기초하여 잡음의 특성을 규정하고, 잡음의 분산, 초기 공분산행렬, 그리고 초기 상태추정치등을 구한다. 그 후 전압 파형의 잡음신호는 감소하는 분산을 갖는 white noise sequence로, 전류파형의 잡음신호는 감소하는 분산을 갖는 white noise sequence에 exponential process를 첨가한 것으로 고려하여, 기본과 전압 페이지를 추출하기 위해서 2차 칼만 필터를 사용하였으며, 기본과 전류 페이지를 추출하기 위해서는 3차 칼만필터를 이용한 칼만 필터 모델을 이용하여 디지털 거리계전 방식을 구성하였다.

1. 전압과 전류 페이지성분의 상태 모델

추정되는 신호는 정상상태의 전압과 전류이며, 잡음과 무관한(noise-free) 전압, 전류신호는 식(1)로 표시된다.

$$Q(t) = A \exp(j\omega_0 t + \phi) \quad (1)$$

여기서, A는 진폭, ϕ 는 $t=0$ 에서의 위상각이다.

고장점에 대해 uniform distribution, 진폭에 대해 Rayleigh distribution, 위상각에 대해 uniform distribution을 고려하면, 고장 발생에 따르는 잡음과 무관한 전압, 전류는 식(2)로 표시되며,

$$\begin{aligned} Q(t) &= A \cos(\omega_0 t + \theta) \\ &= X_1 \cos \omega_0 t - X_2 \sin \omega_0 t \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, X_1 과 X_2 는 independent, zero-mean, Gaussian random variable이다. 그때 $Q(t)$ 는 임의의 진폭과 위상을 갖는 random process이며, 이것이 고장전압과 전류의 신호성분을 구하려는

모델이다. 이제 잡음신호가 포함된 신호에서 X_1 과 X_2 를 추정하는 것이 문제이며, X_1 과 X_2 의 분산은 전압신호에 대해서는 σ_v^2 , 전류신호에 대해서는 σ_i^2 로 정의한다.

2. 기본파 성분 추출을 위한 칼만 필터모델

전압추출을 위한 2차 칼만필터는 다음과 같이 정의된다. 상태방정식 $X_{k+1} = \Phi_k X_k + W_k$ 는 다음 식(3)과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} X_{1k+1} \\ X_{2k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1k} \\ X_{2k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

어떤 시간(t)에서의 측정 샘플은 신호 Q(t)에 잡음을 포함하며, 잡음이란 비 기본파 성분, 측정 오차, 그리고 A/D 변환등에 기인하는 잡음등을 포함한다. 측정 방정식 $Z_k = H_k X_k + V_k$ 는 다음 식(4)와 같이 표시되며,

$$Z_k = [\cos(\omega_s K \Delta t), -\sin(\omega_s K \Delta t)] \begin{bmatrix} X_{1k} \\ X_{2k} \end{bmatrix} + V_k \quad (4)$$

초기 공분산 행렬은 다음 식(5)와 같이 표시된다.

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

전류추출을 위해 3차 칼만필터를 고려하며, third state는 전류잡음신호의 exponential process이다. 상태 방정식 $X_{k+1} = \Phi_k X_k + W_k$ 는 다음 식(6)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} X_{1k+1} \\ X_{2k+1} \\ X_{3k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1k} \\ X_{2k} \\ X_{3k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

$k=0, 1, 2, \dots, N, T=\beta\Delta t$

또한, 측정 방정식 $Z_k = H_k X_k + V_k$ 는 다음 식(7)로 표시하며,

$$Z_k = [\cos(\omega_s K \Delta t), -\sin(\omega_s K \Delta t), 1] \begin{bmatrix} X_{1k} \\ X_{2k} \\ X_{3k} \end{bmatrix} + V_k \quad (7)$$

$$K=0, 1, 2, \dots, N$$

초기 공분산 행렬은 다음 식(8)과 같이 표시된다.

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

X_1 과 X_2 의 초기 프로세스 벡터 \hat{X}_{10} 와 \hat{X}_{20} 는 2차 모델과 동일하다. 그러므로, \hat{X}_{10} , \hat{X}_{20} 는 전류의 고장전 데이터를 이용하여 얻어지며, X_3 의 초기 추정치는 프로세스가 영인 평균을 갖기 때문에 영으로 고려한다.

칼만 필터링을 디지털 거리계전 기법에 적용하기 위해서는 3상의 전압, 전류 신호로 부터 기본파 성분을 추출하고 이들을 이용하여 대칭성분을 산정하여야 한다. 그러므로, 위에 기술한 바와 같이 전압, 전류 신호로 부터 페이저 X_1 , X_2 를 추출하고, 이들 페이저를 이용하여 3상의 전압과 전류 페이저 X_u, X_v, X_w 를 계산하며, X_u, X_v, X_w 로 부터 대칭성분 페이저 X_0, X_1, X_2 를 산정한다.

디지털 거리계전 알고리즘

앞 절에 기술한 바와 같이 전압, 전류 신호로 부터 칼만필터링을 이용하여 대칭성분을 산정한 후, 그 결과를 디지털 거리계전 알고리즘에 적용한다.

그림 1과 같은 3상 평행 2회선 모델 송전선로에서

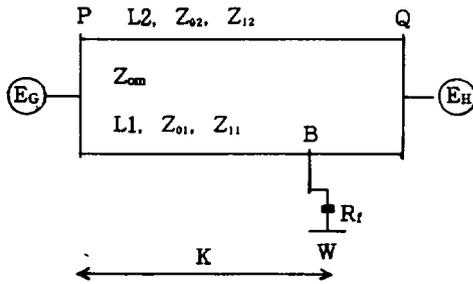


Fig. 1. Parallel two-circuit transmission line.

고장저항 R_f 를 통과하여 점 B에서 사고가 발생되었을 때, W점의 전압을 구하면 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} E_{0w} &= E_0 - KI_0 Z_{01} - KI_2 Z_{0m} - R_{0f} I_{0f} \\ E_{1w} &= E_1 - KI_1 Z_{11} - R_{1f} I_{1f} \\ E_{2w} &= E_2 - KI_2 Z_{11} - R_{2f} I_{2f} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, I_{0f} , I_{1f} , I_{2f} 는 고장전류의 대칭성분이다. I_0' , I_1' , I_2' 을 고장전 전류의 대칭성분이라고 할 때, 이들과 대칭분 전류 I_0 , I_1 , I_2 와의 차를 각각 dI_0 , dI_1 , dI_2 라고 정의하면, 전압강하와 전압비는 다음 식(10), (11)로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} dE_0 &= dI_0 Z_{01} + dI_2 Z_{0m} \\ dE_1 &= dI_1 Z_{11} \\ dE_2 &= dI_2 Z_{11} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{E_0}{dE_0}, \quad K_2 = \frac{E_2}{dE_2} \\ K_1 &= \frac{E_1}{dE_1}, \quad K_3 = \frac{I_1 Z_{11}}{dE_1} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 식(9)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{0w} &= dE_0 (K_0 - K) - R_{0f} I_{0f} \\ E_{1w} &= dE_1 [K_1 - K(1 + K_3)] - R_{1f} I_{1f} \\ E_{2w} &= dE_2 (K_2 - K) - R_{2f} I_{2f} \end{aligned} \quad (12)$$

이때, 식(12)는 기준상 (reference phase)과 선로의 평형 또는 불평형에 관계없이 독립적으로

된다. 따라서, 대칭성분에 대한 비 K_0 , K_1 , K_2 , K_3 를 이용하여 샘플 시스템 B점에서 발생하는 3종류의 1선지락 고장, 3종류의 2선지락 고장, 3종류의 선간단락 고장, 3상고장등 10가지 형태, 각종고장에 관계없이 고장거리 K를 식(13)과 같이 단일 식으로 표시할 수 있으므로,

$$K = \frac{K_1 + K_2 K_3' + K_2 K_2'}{1 + K_0' + K_2' + K_3} \quad (13)$$

고장시에 식(13)을 적용하면 고장점 산정이 가능하다.

시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 모델 전력계통

칼만 필터를 이용한 디지털 거리제전 기법을 시뮬레이션 하기 위해 선택한 모델 전력계통은 345[KV], 1회선 송전선로로 최대 180[KM]의 공장을 갖는 것으로, 선로정수는 EMTP의 선로정수 루틴 (line constant subroutine)을 이용하여 계산했으며, 모델 전력계통의 시뮬레이션은 VAX-11/750 컴퓨터를 이용하여 수행하였고 시뮬레이션 결과 얻어진 정상상태 및 과도상태의 전압, 전류 데이터는 전압과 전류 잡음신호의 산출, 칼만 필터의 평가, 시뮬레이션 결과 및 고찰등에 사용할 목적으로 KERMIT 소프트웨어를 이용하여, 플로피 디스크에 저장하였다.

전력계통에서 고장발생시, 고장후 발생하는 전압과 전류신호는 전원 파라메타(source parameter), 선로의 길이, 계통주파수, 고장점 (fault location), 고장형태 및 고장발생각, 직렬 보상선로, 기타 등과 같은 요소들에 의해 영향을 받는다. 그러나, 본 연구에서는 선로의 길이, 계통주파수, 고장점, 그리고 고장형태 및 고장발생각등을 고려하여 모델계통을 시뮬레이션 하였으며, 고장시 발생하는 과도현상을 모의하기 위한 시험조건은 표1과 같다.

모델 계통의 20[KM] 지점에서 여러가지 형태의 고장을 발생시켰으며, 1선지락, 2선지락, 선간

Table 1. Test fault conditions

Fault Distance [KM]	2 0				1 0 0				1 6 0			
Type of Fault	1LG	2LG	L-L	ABC	1LG	2LG	L-L	ABC	1LG	2LG	L-L	ABC
Sampling Rate [S/C]	8, 12, 16, 24, 32, 64, 96				8, 12, 16, 24, 32, 64, 96				8, 12, 16, 24, 32, 64, 96			
Fault Angle [DEG]	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
Fault Resist. [OHM]	2, 20				2, 20				2, 20			
Frequency 60 [HZ]	1				1				1			
Total No. of Fault	7 2											

단락, 3상 고장 발생시 송전단에서의 전압파형은 그림 2, 3, 4, 5와 같고 전류파형은 그림 6, 7, 8, 9와 같다.

정상상태 성분 중첩되는 전압과 전류의 과도 성분은 잡음으로 고려하였다. 따라서, 전압과 전류파형의 잡음신호는 고장발생후 처음 2 사이클의 과도해(transient solution)로 부터 정상상태 고장해를 제거함으로써 산출하였다. 또한, 이 산출과정은 각 형태의 고장에서 고장상과 전전상의 전압, 전류신호에 대해 수행되었다.

선로에 고장발생시 임피던스를 계산하여 고장점을 정확하게 산정하기 위해서는, 고장시의 전압과 전류로부터 각 상의 전압과 전류 변화의 상태를 추정하여야 한다. 그림 10, 11, 12, 13은 각각 1선지락, 2선지락, 선간단락 고장과 3상고장 발생시 3상전류와 영상 전류 변화치를 나타낸다.

2. 시뮬레이션 방법 및 결과

선로에 고장발생시 신속하고, 정확하게 고장점을 추정함으로써 전전구간에 미치는 악영향을 감소시키고 안정적인 전력공급을 도모하기 위해 본 연구에서 제안한 거리계전 기법은 크게 두 부분으로 나누어 진다.

첫 번째 단계는 칼만 필터를 이용한 전압, 전류

의 기본과 추출단계이며, 두 번째 단계는 추출된 기본과 성분을 이용하여 계산한, 전압, 전류의 대칭성분을 이용하여 거리계전 기법을 수행하는 단계이다. 첫 번째 단계에서, 고장이 발생하지 않은 건전상태에서 전압, 전류 데이터를 1 사이클분석 받아 돌이면서 고장 발생 여부를 시험하다가, 만일 고장이 발생되면 고장 발생시의 전압, 전류의 데이터를 이용하여 상태추정을 하는 블록으로 이동한다. 상태 추정 부분은 전압추정과 전류 추정부분으로 구성되어 있으며, 전압 추정은 2차 칼만 필터를 이용하여 3상의 전압을 추출하고, 전류 추정은 3차 칼만 필터를 이용하여 3상의 전류와 영상전류성분을 추출하게 된다. 칼만 필터를 이용하여 전압, 전류의 기본과 성분 추출이 완료되면 이들을 이용하여 대칭성분을 계산하는 다음 블록으로 이동한다. 전압과 전류의 대칭성분 계산을 수행한 뒤 거리계전기법인 K-routine으로 이동하며, 이 두 번째 단계에서, 전압, 전류의 대칭성분을 이용하여, 디지털 거리계전 알고리즘에 기술된 거리계전 알고리즘을 이용 고장 형태 판별, 고장거리 산정등을 수행하여 송전선로의 고장점을 추정한다. 이와 같은 거리계전 알고리즘의 흐름도는 그림 14와 같다.

전압추출을 위한 2차 칼만필터와 전류추출을 위

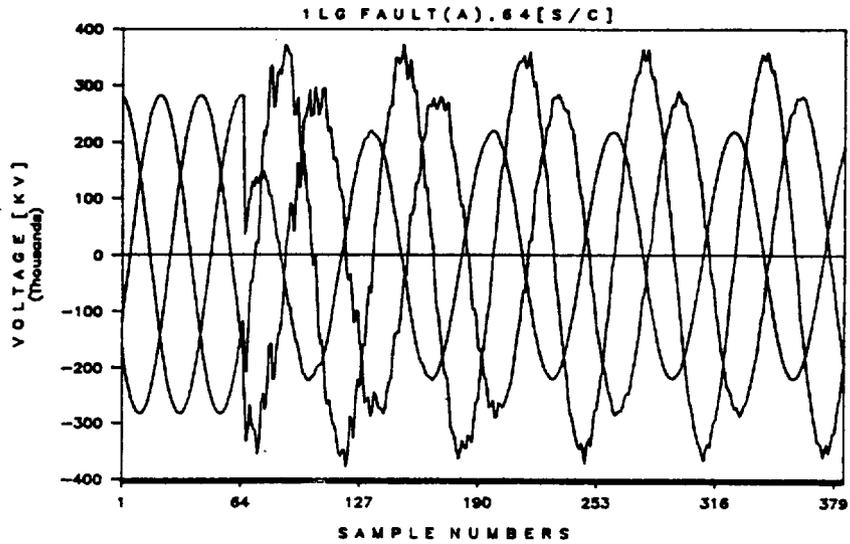


Fig.2. Voltage waveforms for a single-line-to-ground fault.

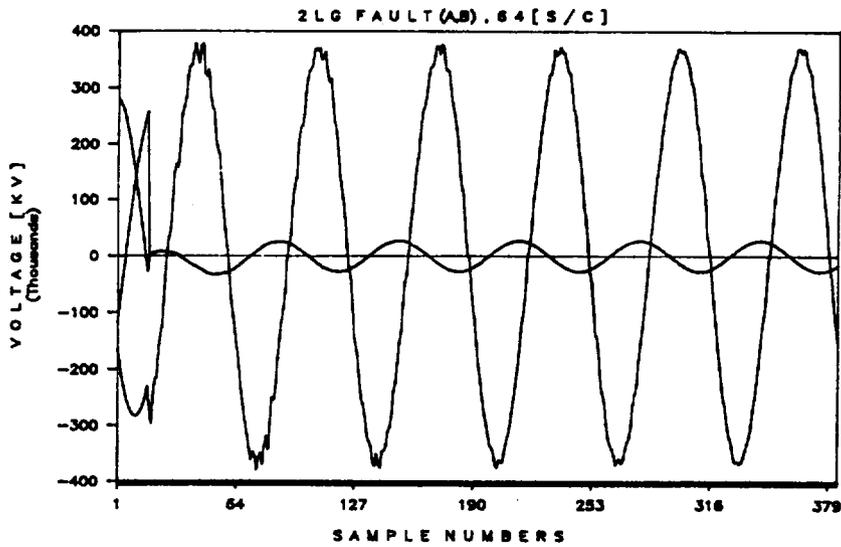


Fig.3. Voltage waveforms for a double-line-to-ground fault.

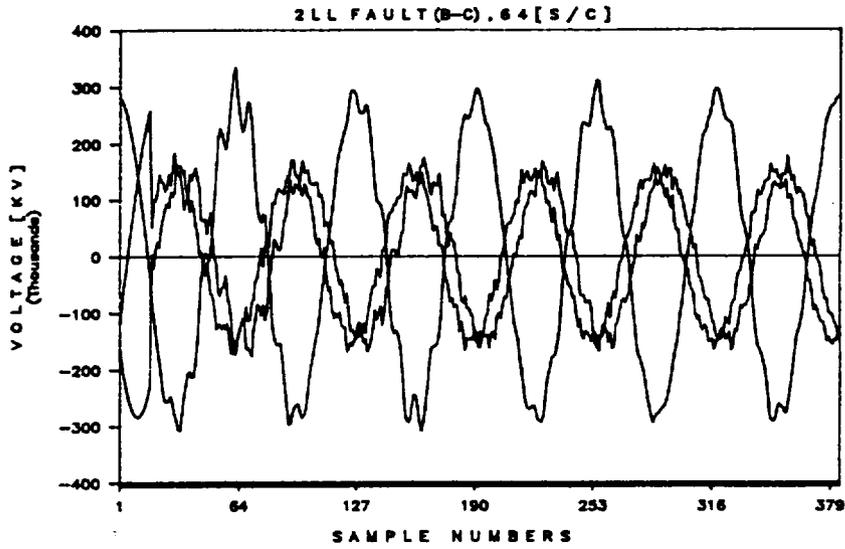


Fig. 4. Voltage waveforms for a line-to-line fault.

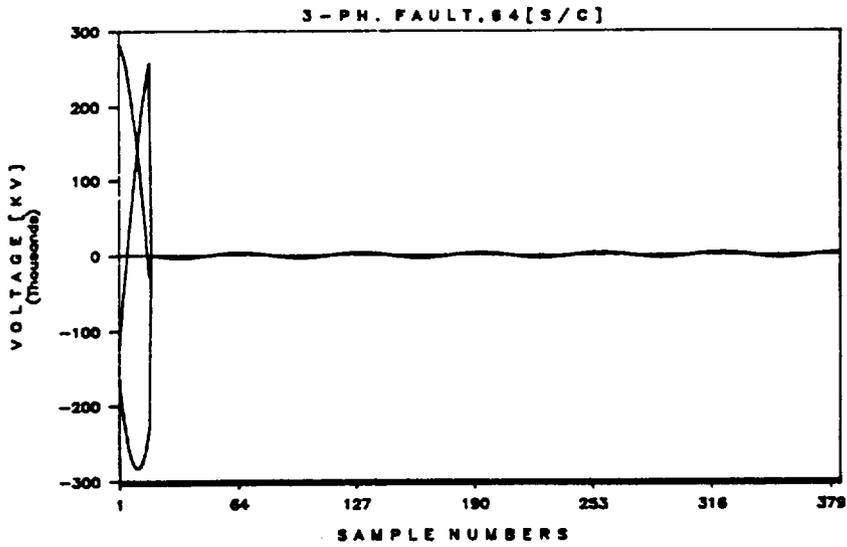


Fig. 5. Voltage waveforms for a 3-phase fault.

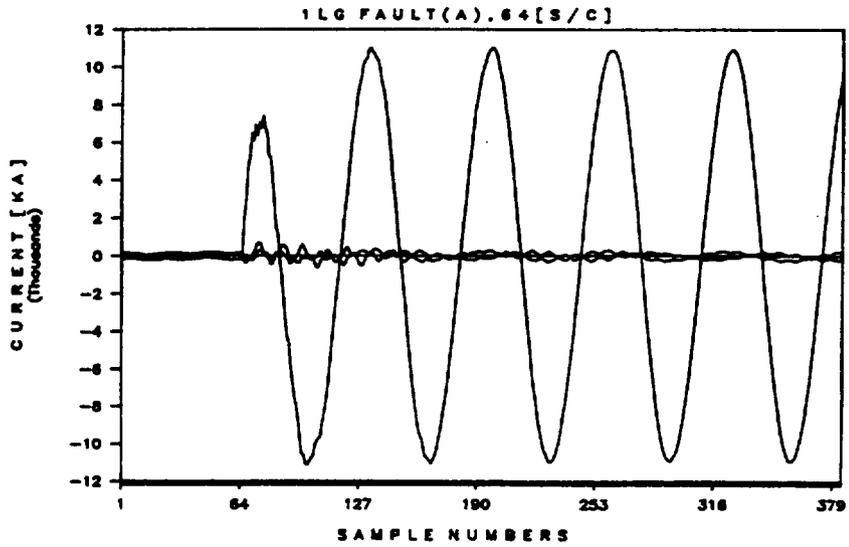


Fig.6. Current waveforms for a single-line-to-ground fault.

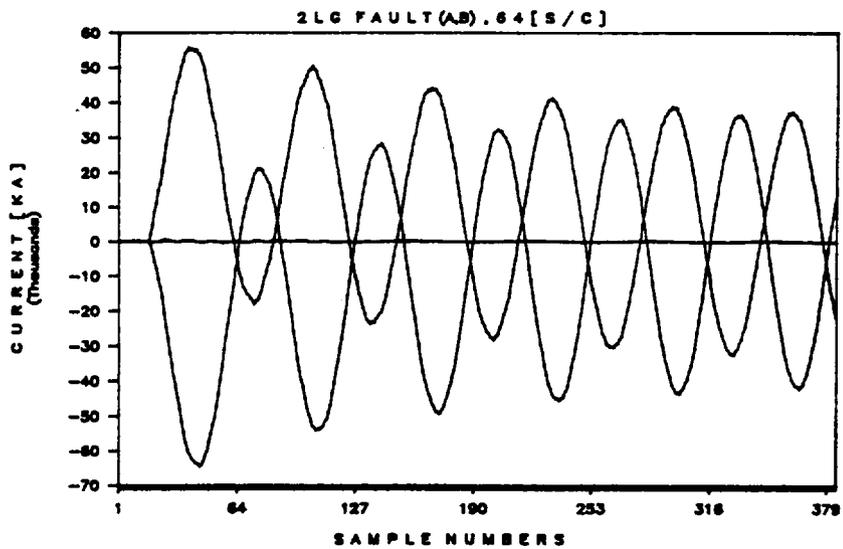


Fig.7. Current waveforms for a double-line-to-ground fault.

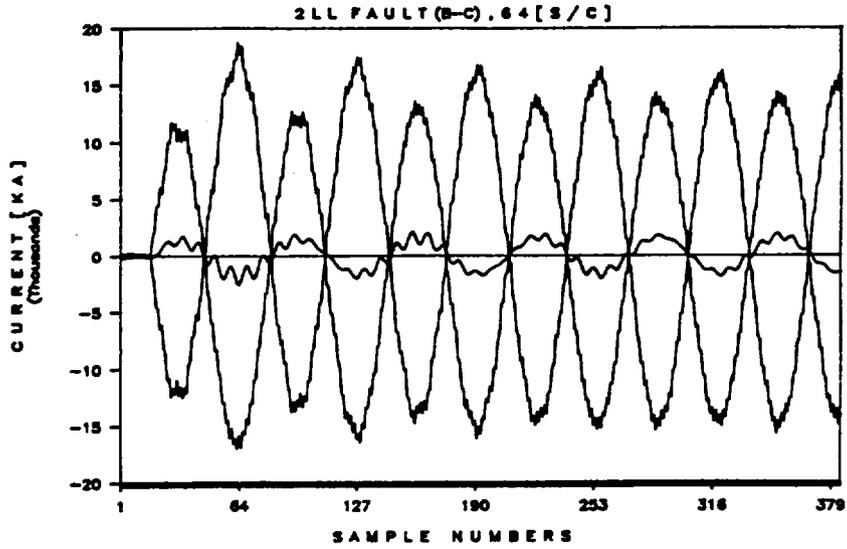


Fig.8. Current waveforms for a line-to-line fault.

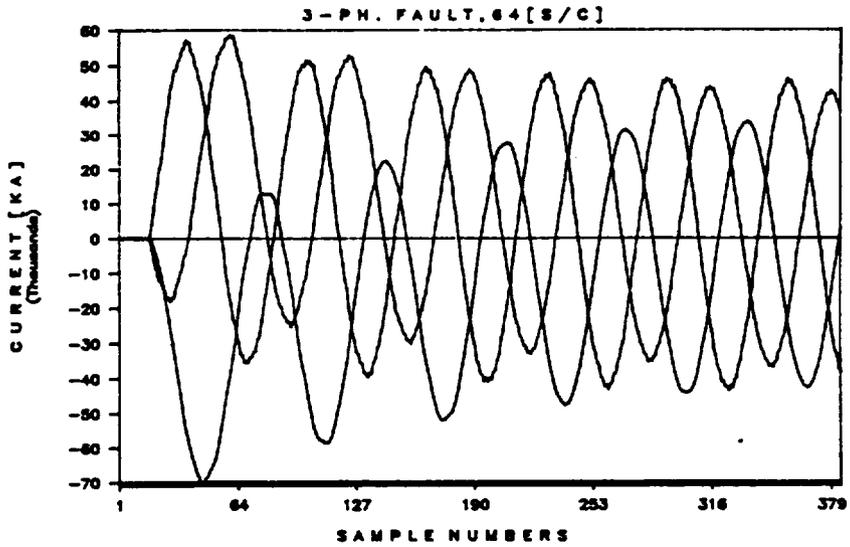


Fig.9. Current waveforms for a 3-phase fault.

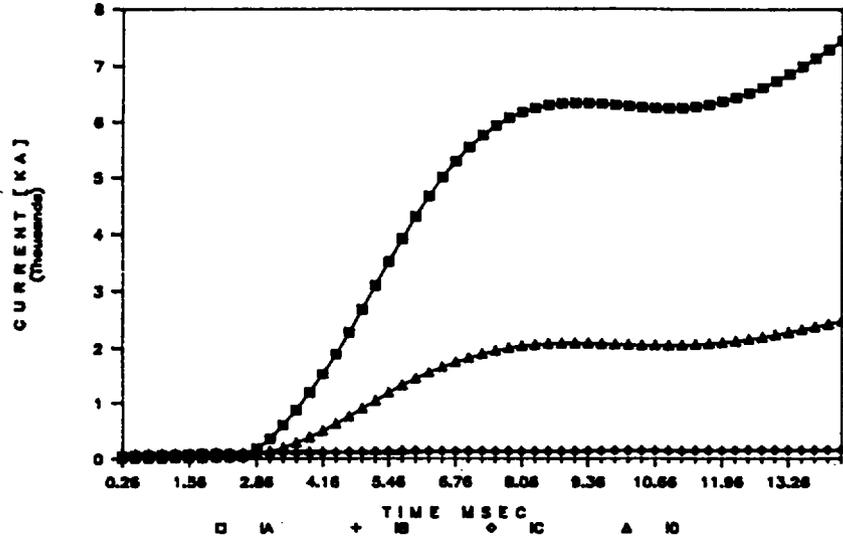


Fig. 10. Estimation of the change in the 3-phase currents for a single-line-to-ground fault.

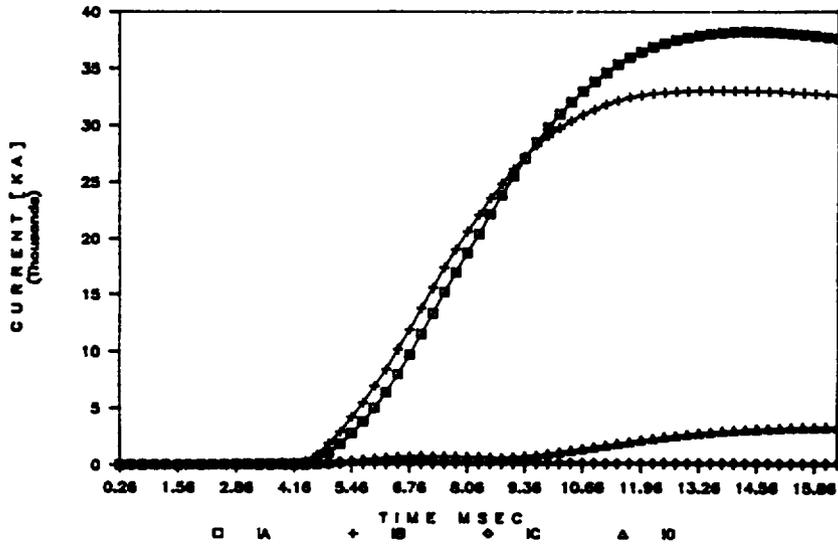


Fig. 11. Estimation of the change in the 3-phase currents for a double-line-to-ground fault.

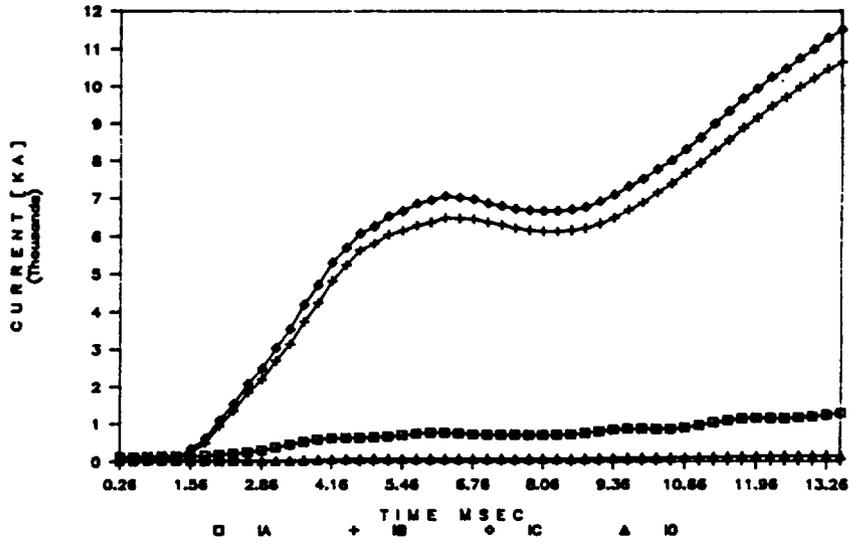


Fig. 12. Estimation of the change in the 3-phase currents for a line-to-line fault.

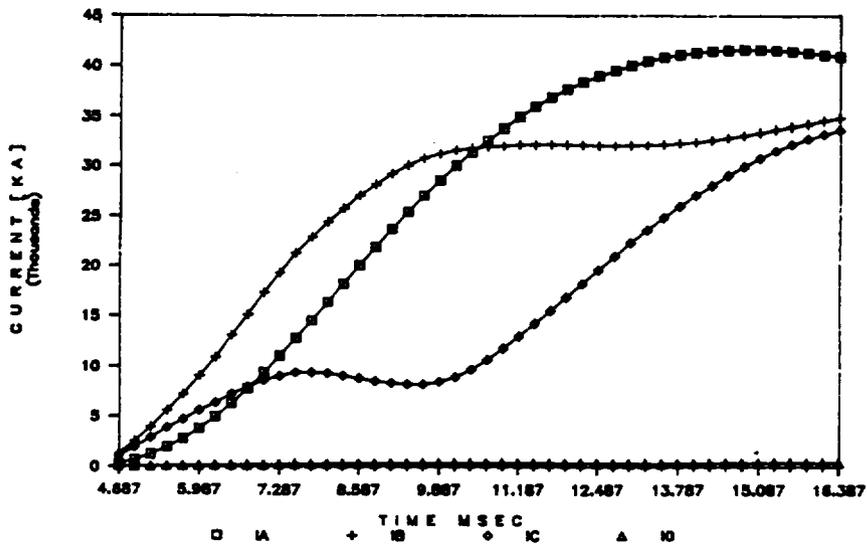


Fig. 13. Estimation of the change in the 3-phase currents for a 3-phase fault.

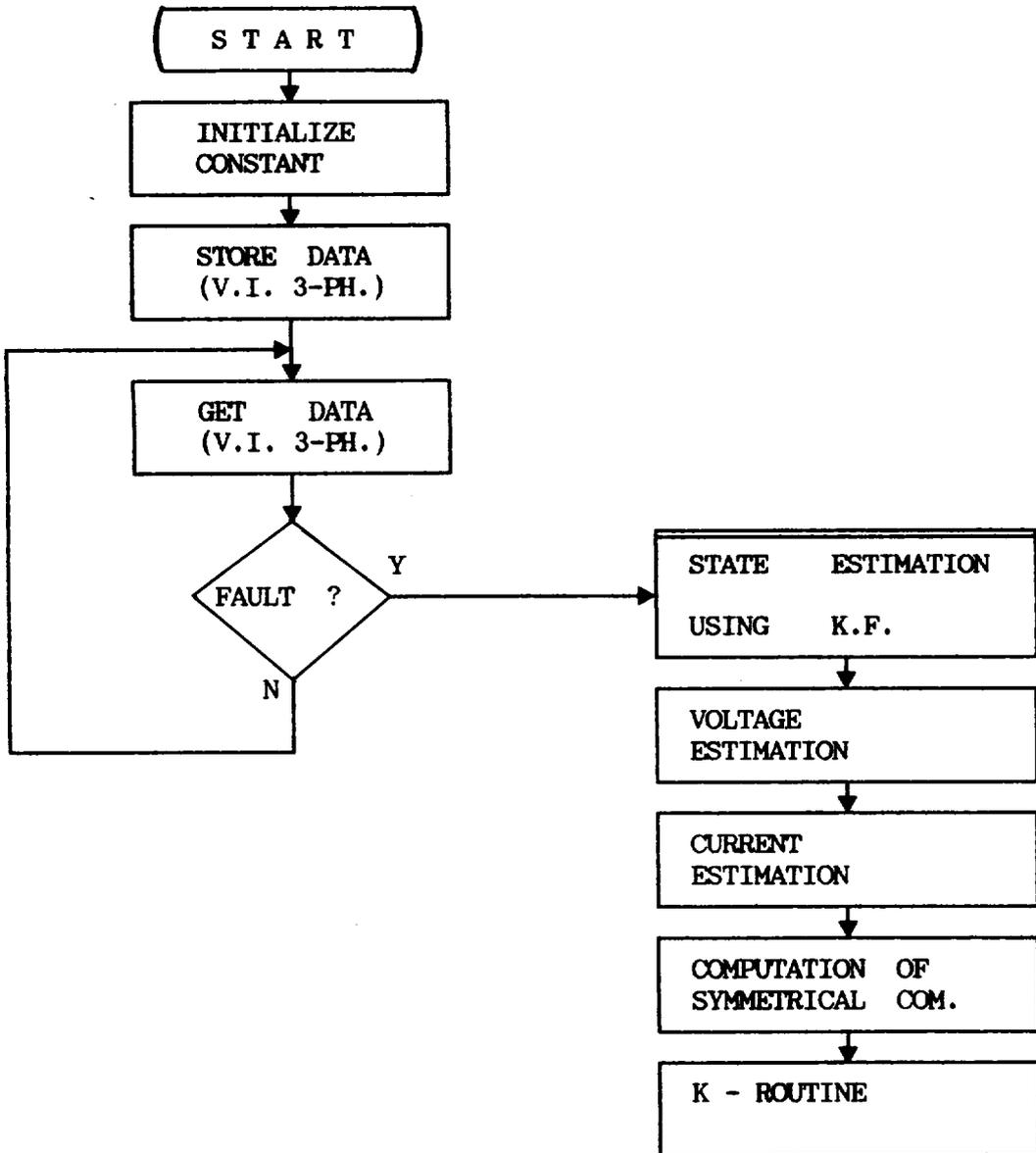


Fig.14. Flowchart of distance relaying algorithm using Kalman filtering.

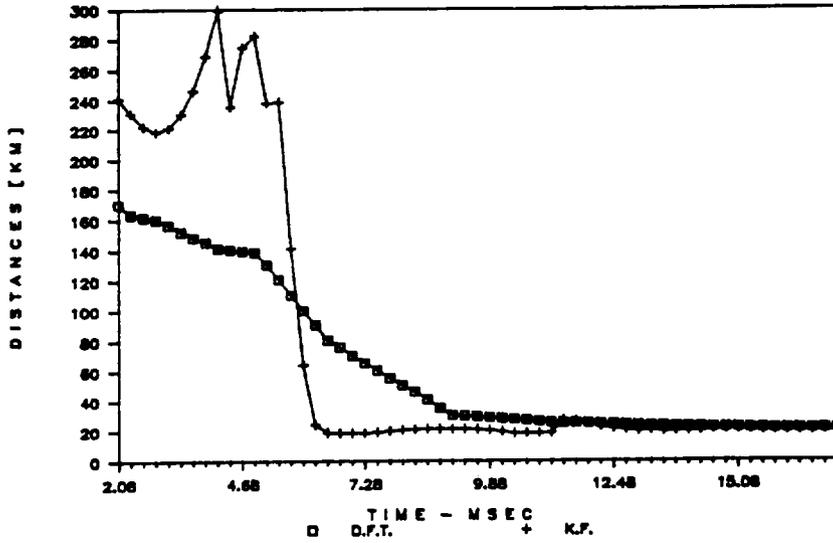


Fig.15. Computed fault location using Kalman filter, DFT algorithms (for 1lg fault).

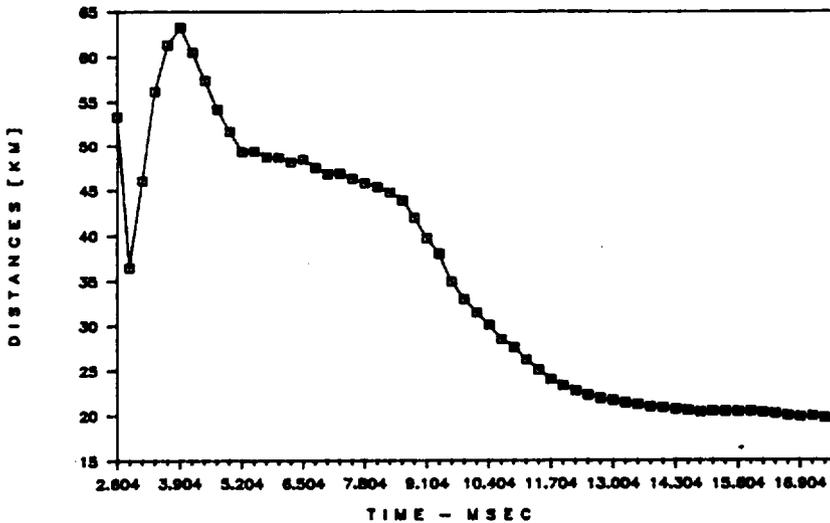


Fig.16. Computed fault location using Kalman filter (for 2ll fault).

한 3차 칼만필터를 이용하여, 여러 가지 형태의 고장발생시 송전단에서 측정된 전압과 전류 데이터를 이용하여 기본파 성분을 추출하고, 추출된 기본파 성분으로 부터 대칭성분을 산정한 후, 이를 이용하여 고장점을 산정한 결과는 그림 15, 16과 같으며, 그림 15에 본 연구에서 제안한 칼만필

터를 이용한 거리계전 알고리즘과 DFT 방법을 이용한 결과를 비교, 제시하였다. 그림 15에서 알 수 있는 바와 같이, 칼만 필터링에 의한 방법은 DFT 방법에 비해 빨리 수렴치에 근접하여 평균 13[m-sec]이내에 실제 고장거리에 수렴하여, 본 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

摘 要

본 연구에서는 디지털 거리계전 알고리즘으로 널리 이용되어온, DFT를 이용한 대칭성분 거리계전 알고리즘이 기본파 전압, 전류 추출과정에서 Aliasing, Picket-fence effect 및 Leakage 등에 의한 단점을 가지므로, 효율적인 거리계전 알고리즘을 개발하기 위해 필터링 방법의 개선을 시도하였다. 그러므로, 본 연구에서는 칼만 필터링 기법을 도입하여 기본파 성분을 추출함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고장발생시 전압과 전류의 비 기본파 성분을 잡음으로 처리하여, 측정치로 부터 잡음을 제거할 수 있는 칼만필터를 이용하여 기본파 성분만을 추출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

(2) 2차, 3차 칼만필터 모델을 이용하여 기본파 성분을 추출하고, 그 결과로 부터 대칭성분을 산정함으로써 본 연구에서 제안한 방법이 DFT를 이용한 방법보다 신속하게 수렴하는 효율적인 기법임을 입증하였다.

(3) DFT방법에 부수되는 Aliasing, Picket-fence effect 및 Leakage 등의 단점을 제거하기 위하여, 종래에 사용되어 왔던 아날로그 필터나 샘플링을 변경 등의 방법을 이용하지 않고도, 칼만 필터링 기법을 이용함으로써 해결이 가능함을

제시하였다.

(4) 송전선로상에서 고장발생시 본 연구에서 제시한 칼만필터를 이용한 디지털 거리계전 기법을 적용함으로써, 선로의 고장점을 추정하고, 고장상을 판별하여 송전선로에 설치된 차단기에 적절한 트립 명령을 보내어 차단시킴으로써, 고장구간이 전전구간에 미치는 악영향을 감소시킬 수 있는 일련의 알고리즘을 개발하였다.

위와 같은 결과를 얻기 위하여 EMTP를 이용한 디지털 시뮬레이션을 통해 고장거리, 고장형태, 고장 발생각, 고장저항등을 다양하게 변경시켜 72번의 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정은 대량의 데이터와 다양한 조건들을 취급하여야 하므로, 컴퓨터 수행시간 뿐만 아니라 자료의 처리시간이 많이 소요되는 애로점이 있었다. 추후 연구되어야 할 과제로는 본 연구에서 고려하지 못한 조건들까지 고려하여 전압과 전류의 잡음신호를 산출하고, 필터링 방법도 적응 칼만필터(adaptive Kalman filter)와 같은 기법을 사용하면 더욱 우수한 결과를 얻을 수 있으리라 여겨진다. 또한 본 연구는 오프-라인으로 수행되었으나 온-라인으로 수행시키는 과제도 연구되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

Bergland, G.D., 1972. A guided tour of the fast Fourier transform, in digital signal processing, Rabiner L.R. and Rader, C.M.

(ed.), New York, IEEE press, pp.228-239.
Brown, R.G., 1983. Introduction to random signal analysis and Kalman filtering, John

- wily and Sons.
- Childers, D. and A., Durling, 1975. Digital filtering and signal processing, Los Angeles, West Publishing Co.
- Gelb, A. (ed.), 1974. Applied optimal estimation, M.I.T.Press.
- Girgis, A. A. and R. G., Brown, 1981. Application of Kalman filtering in computer relaying, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 7, pp. 3387-3397.
- Girgis, A. A. and T. L., Daniel Hwang, 1984. Optimal estimation of voltage phasors and frequency deviation using linear and non-linear Kalman filtering: theory and limitations, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 10, pp. 2943-2951.
- Kalman, R. E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems, J. Basic Eng., pp. 35-45.
- Lewis, W. A. and L. S., Tippet, 1947. Fundamental basis for distance relaying on 3-phase systems, AIEE Proceedings, Vol. 66.
- Phadke, A. G. and M., Ibrahim, 1977. Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-96, No. 2, pp. 635-646.
- Phadke, A. G. and J. S., Thorp, 1983. A new measurements technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025-1038.
- Sachdev, M. S. and H. C., Wood, 1985. Kalman filtering applied to power system measurements for relaying, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No. 12, pp. 3565-3573.
- Sorenson, H. W., 1985. Kalman filtering: theory and application, IEEE press.
- Shin, M. C. and C. H., Kim, 1987. A study on the digital relaying techniques by real-time symmetrical components of the power system, Journal of the KIEE, Vol. 36, No. 10, pp. 1-8.
- Shin, M. C. and C. H., Kim, 1989. A study on the digital distance relaying scheme using Kalman filter, IFAC Symposium on Power System and Power Plant Control, pp. 879-884.