

# 4 단자망을 이용한 고장해석

김 주용<sup>o</sup>                      백 영식  
 경북대학교 전기공학과

## Fault Analysis , Using Two-Port Network

Ju-Yong Kim                      Young-Sik Baek  
 Def. of Elect. Engin. Kyung Pook National Univ

### Abstract

This paper presents the new algorithm for fault analysis and the fault analysis package for executing this algorithm. This algorithm obtains requisite term for fault analysis by the two-port network technique.

Therefore, the fault calculation time is minimized because  $Y_{BUS}^{-1}$  calculation time is removed.

And, the graphic user environment for fault analysis is implemented in mouse-oriented user interface with window and pull-down menu.

Therefore, this package can be a useful tool for fault analysis.

### 1. 서론

계통에서의 사고는 크게 모선사고와 선로사고로 나눌수있으며 이러한 사고의 계산을 위해서  $Y_{BUS}$ 의 역행렬인  $Z_{BUS}$ 를 구하여야한다.

일반적으로 계통이 정상상태 일때의  $Y_{BUS}^0$ 와  $Z_{BUS}^0$ 는 사고 발생 이전에 계산 되며, 모선사고의 경우에는 이때 계산된  $Z_{BUS}^0$ 를 이용하여 해석 될수있다. 그러나 선로사고의 경우에는 사고가 발생한 지점에 모선이 하나 더 추가됨으로써 초기에 계산된  $Z_{BUS}^0$ 으로는 해석 될수없고  $Y_{BUS}^{n+1}$ 을 새로 구성하고 그것의 역행렬  $Z_{BUS}^{n+1}$ 을 구함으로써 가능하다.

본 논문에서는 4 단자망을 이용하여, 사고 발생 이전에 계산된  $Z_{BUS}^0$ 만으로 사고 계산에 필요한 term 들을 구함으로써 사고 해석에 소요 되는 계산 시간을 극소화 하였다.

그리고 본 알고리즘의 수행은 Workstation에서 UNIX OS상의 X-WINDOW를 이용하여 그래픽 통합환경을 구축한 고장해석 패키지 제시함으로써, 계통의 선로와 모선을 그래픽으로 나타내고 모선과 선로의 데이터를 그래픽 환경에서 직접 키보드를 통해 입력 할수있게 하였으며 고장 계산후의 결과를 그래픽상에 나타냄으로써 계통의 상태를 쉽게 파악할수 있게 하였다.

본 연구에서 개발한 방법은 사고전의  $Z_{BUS}$ 를 off-line으로 미리 계산 해둘경우 계통크기에 상관없이 일정한 빠른 시간 내에 계산가능 하므로 실시간 운용에 적용 가능하다.

### 2. 대칭 성분에 의한 사고 해석.

모선 i에서 사고가 발생 했을때 각 사고에 대한 사고 해석 방정식은 아래와 같다. 사고 임피던스를  $Z_f$ 라 하고  $j = 1, 2, \dots, n$  ( $j \neq i$ )이다.

1) Balanced 3 $\phi$  Fault  
 $V_0 = V_2 = 0$   
 $I_0 = I_2 = 0$

$$I_i^1 = \frac{E}{Z_f + Z_{ii}^1}$$

$$V_j^1 = E - Z_{ji}^1 I_i^1$$

2) Single - Line - to - Ground Fault

$$I_j^0 = I_j^1 = I_j^2 = 0$$

$$I_i^0 = I_i^1 = I_i^2$$

$$I_i^1 = \frac{E}{Z_{ii}^0 + Z_{ii}^1 + Z_{ii}^2 + 3Z_f}$$

$$V_j^0 = -Z_{ji}^0 I_i^0$$

$$V_j^1 = E - Z_{ji}^1 I_i^1$$

$$V_j^2 = -Z_{ji}^2 I_i^2$$

3) Line-to-Line Fault

$$V_0 = I_0 = 0$$

$$I_i^2 = -I_i^1$$

$$I_i^1 = \frac{E}{Z_{ii}^1 + Z_{ii}^2 + Z_f}$$

$$V_j^1 = E - Z_{ji}^1 I_i^1$$

$$V_j^2 = -Z_{ji}^2 I_i^2$$

4) Double-line-to-ground Fault

$$V_i^1 = V_i^2$$

$$V_i^1 = \frac{Z_{ii}^2(3Z_f + Z_{ii}^0)E}{Z_{ii}^1 Z_{ii}^2 + Z_{ii}^1(3Z_f + Z_{ii}^0) + Z_{ii}^2(3Z_f + Z_{ii}^0)}$$

$$\Delta = Z_{ii}^1 Z_{ii}^2 + Z_{ii}^1(3Z_f + Z_{ii}^0) + Z_{ii}^2(3Z_f + Z_{ii}^0)$$

$$I_i^0 = \frac{-Z_{ii}^2 E}{\Delta}$$

$$I_i^1 = \frac{(Z_{ii}^2 + 3Z_f + Z_{ii}^0)E}{\Delta}$$

$$I_i^2 = \frac{-(3Z_f + Z_{ii}^0)E}{\Delta}$$

$$V_j^0 = -Z_{ji}^0 I_i^0$$

$$V_j^1 = E - Z_{ji}^1 I_i^1$$

$$V_j^2 = -Z_{ji}^2 I_i^2$$

이상에서, 사고 해석을 위해서는 고장 모선 i에 대해 영상, 정상, 역상분 구동 Impedance  $Z_{ii}^0, Z_{ii}^1, Z_{ii}^2$  및 전달 Impedance  $Z_{ki}^0, Z_{ki}^1, Z_{ki}^2$  ( $Z_{ki} = Z_{ik}; k = 1, 2, \dots, n$ )을 구해야 함을 알수 있다. 선로사고의 경우는 사고지점에 새로운 모선 (F)를 추가하여  $Y_{BUS}$  행렬 및  $Z_{BUS}$  행렬을 재 구성하고, 고장점 F에 대한 대칭분 임피던스를 계산 하여 구할 수 있다.

### 3. 본 알고리즘의 흐름도.

모선 사고시는 그림(1)에서 처음에 계산된 대칭분 모선 임피던스 행렬을 그대로 사용하여 계산 되며, 선로 사고시의 사고절에서 본 구동 임피던스는 그림(1)과 같은 알고리즘으로 구해진다.

선로 사고의 경우 그림(1)에서와 같이  $Z_{BUS}$ 를 재 계산할 필요가 없으며 4단자망을 이용하여 계산이 가능하다. 즉 모선 사고에 대해 한번만의  $Z_{BUS}$  계산으로 가능하다. 그리고 그 이후의 사고계산 부분은 계통크기에 무관하며, 계산시간이 다음에 설명 하는것과 같이 무시할수 있을 정도로 짧은 시간내에 계산 가능하다.  
본 알고리즘의 흐름도를 그림(1)에 나타내었다.

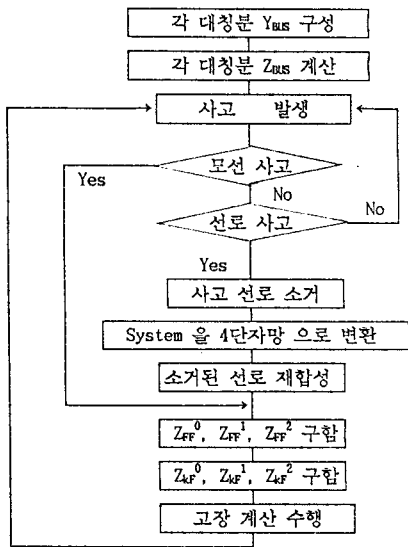


그림 (1) 본 알고리즘의 흐름도.

#### 4. 사고계산 알고리즘.

먼저 전체 계통도와 사고 선로 i-j 를 그림(2)와 같이 나타낼수 있다

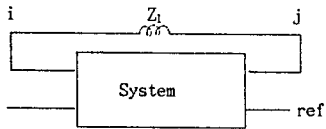


그림 (2)

이때,  $Z_{BUS}$ 는 off-line으로  $Z_{BUS}=(Y_{BUS})^{-1}$  와같이 계산되어 진다.

이 계통에서 선로 ( i - j ) 사이의 F 점에서 사고가 발생하면 변화된 계통은 그림 3 처럼 나타낼수 있다. 이것은 fault 가 발생하여 사고 지점에서 모선이 하나 추가되고 line의 impedance 가 fault 위치에 의해 분리된 형태이다.

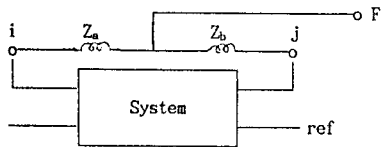


그림 (3)

이와같은 선로사고를 해석하기 위해서는 F점에서 들여다본 구동 임피던스 및 다른 모선과 F 모선 사이의 전달 임피던스를 구하여야 한다.

##### 4.1 구동 임피던스 계산 알고리즘.

F 점에서의 구동 Impedance는 4 단자망을 사용하여 다음과 같이 구할수 있다.

Step 1 ) 사고 선로를 계통에서 소거 한다.

i , j 단에서 본 4 단자망의 어드미턴스 계수는 식(1)과 같이 되며, 사고 선로  $Z_i$ 를 소거했을 경우의 4 단자망의 임피던스 계수는 식 (2) 와 같다.

$$\begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} \\ Z_{ji} & Z_{jj} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Y_a & Y_b \\ Y_c & Y_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{ii}' & Z_{ij}' \\ Z_{ji}' & Z_{jj}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_a - 1/Z_i & Y_b + 1/Z_i \\ Y_c + 1/Z_i & Y_d - 1/Z_i \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

$Z_i$  = 사고선로의 Impedance.

다음의 계산을위해 식(2)의 4개의 임피던스값으로 4 단자망의 네정수 ( A B C D )를 구해보면

$$\begin{aligned} A &= Z_{ii}' / Z_{ij}' \\ B &= ( Z_{ii}' Z_{jj}' - Z_{ij}' Z_{ji}' ) / Z_{ij}' \\ C &= 1 / Z_{ij}' \\ D &= Z_{jj}' / Z_{ij}' \end{aligned}$$

이된다.

따라서 사고 선로가 제거된 계통은 그림 (4) 과 같이 나타낼수 있다.

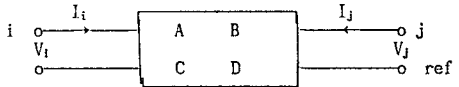


그림 (4)

Step 2 ) 사고에 의해 분리된 선로를 i, j 단에 각각 연결하면 그림(5)와 같다.

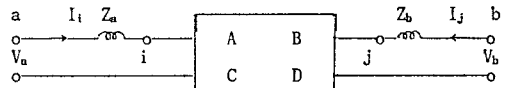


그림 (5)

그림(5)와 같이 사고선로 (a,b 는 사고점 F 에 해당)를 연결한 계통을 새로운 A'B'C'D' 정수로 나타내면 식(3)과 같다

$$\begin{bmatrix} 1 & Z_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \quad (3)$$

Step 3 )고장점 F 에서 본 구동점 임피던스를 구한다.

우선 식(3)에서 구한 4단자정수를 Y-parameter 로 바꾸면

$$\begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Y_{aa} &= D' / B' \\ Y_{ab} &= - ( A'D' - B'C' ) / B' \\ Y_{ba} &= - 1 / B' \\ Y_{bb} &= A' / b' \end{aligned}$$

식 (4) 가 성립하며 이것으로부터

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{aa}V_a + Y_{ab}V_b \\ I_j &= Y_{ba}V_a + Y_{bb}V_b \end{aligned} \quad (5)$$

가 얻어 진다.

다음에 그림(5) 의 a,b 두 node를 접속 시키면 사고시의 계통이 된다.

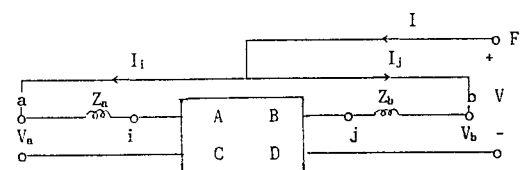


그림 (6)

그림(6) 의 계통으로 부터

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_j \\ V &= V_a = V_b \end{aligned}$$

가 성립 하므로 여기에 식 (5) 를 대입하면

$$I = ( Y_{aa} + Y_{ab} + Y_{ba} + Y_{bb} ) V$$

가 되어 사고 지점에서의 Impedance  $Z_f$  는

$$Z_f = \frac{1}{Y_{aa} + Y_{ab} + Y_{ba} + Y_{bb}}$$

과 같이 구해진다.

#### 4.2 전달 임피던스 $Z_{kf}$ 의 계산.

모선 임피던스를 사용한 전압, 전류간의 관계는 식 (6) 과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_n \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2n}I_n \\ &\vdots \\ V_n &= Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \dots + Z_{nn}I_n \end{aligned} \quad (6)$$

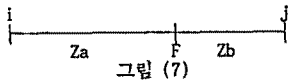
식 (6) 에서,

$$I_k = 1 \\ I_1 I_2 \dots I_n = 0 \quad (\neq I_k) \quad \text{라면}$$

$$V_i = Z_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

이 된다.

이것은 k 모선에 1(A) 를 주입 했을때 i 모선의 전압을 측정하면 이것이 바로 모선 임피던스  $Z_{ik}$  인 것을 뜻한다. 이 방법으로 선로사고에 의해 새로이 구성되는  $Z_{kf}$ 를 구하면 다음과 같다.



그림(7)과 같이 F 점에서 사고가 난경우, k 모선에 1(A) 를 주입 했다고 하면 i, j 모선의 전압이  $Z_{ki}, Z_{kj}$  로 주어지므로 F 점에서의 전압  $Z_{kf}$  는 다음 식과 같다.

$$Z_{kf} = Z_{ki} - \frac{Z_{ki} - Z_{kj}}{Z_a + Z_b} Z_a \quad (8)$$

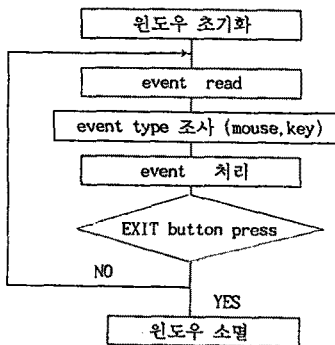
따라서  $Z_{kf}$ 는 k 모선에 1(A)를 주입했을 경우 F점에서의 전압이며 이것이 바로 전달 임피던스와 같게되며, 이값은 이미 구해놓은  $Z_{ij}$  ( $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n$ ) 를 사용하여 식(8)과 같이 구할수 있다.

### 5. 고장 해석기의 제시.

본 논문에서는 사용자가 고장해석을 효과적으로 할수있도록 하기위해 Man - Machine 인터페이스의 수단으로 다양한 그래픽 처리기능을 제공 하는 그래픽 통합환경을 구축 하였다. 이 그래픽 통합환경은 UNIX OS상의 X-WINDOW SYSTEM 을 이용하여 구성 하였으며 고장 해석에 필요한 데이터를 그래픽 환경에서 키보드를 통해 입력받고 고장 해석후의 선로와 모선에서의 전압과 전류를 해당 선로와 모선위치에 나타냄으로써 고장에 의한 계통 상태를 쉽게 파악할수 있게 하였다.

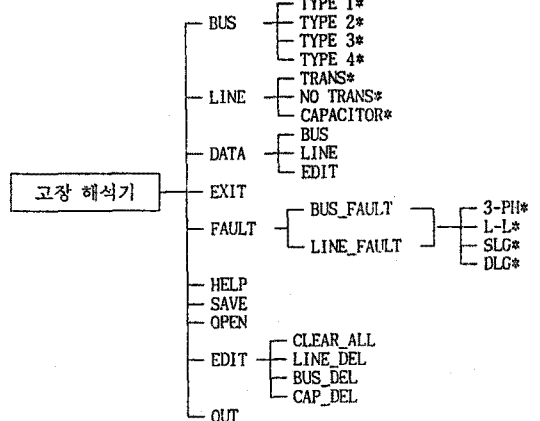
#### 5.1 그래픽 프로그램

윈도우는 X - WINDOW SYSTEM 중 Xlib Programming 에 의해 구성되며 그래픽 프로그램의 수행 알고리즘은 그림 (8) 과 같다.



#### 5.2 Menu 의 구성 및 기능

전체 그래픽에 사용된 Menu는 10개의 Main - Menu 와 그의 Sub - Menu 들로 구성되며 그 구조가 그림 (9) 에 나와있다.



주) \* 표는 Pixmap 을 나타냄.

그림 (9) 전체 메뉴의 구조

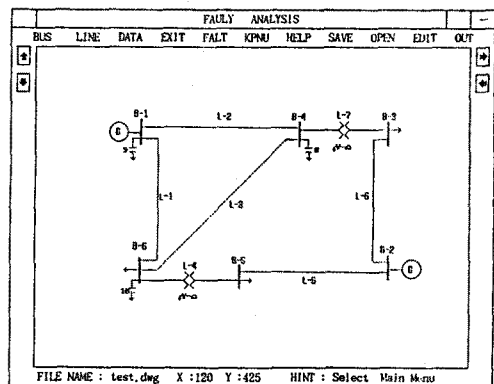
각 Button 의 기능을 살펴보면

- BUS : 모선 그리기
- LINE : 선로 그리기
- DATA
  - BUS : 계통 전체의 모선 DATA 를 DISPLAY
  - LINE : 계통 전체의 선로 DATA 를 DISPLAY
  - EDIT : 선로와 모선 DATA 를 입력, 수정
- EXIT : 프로그램의 종료
- FAULT
  - BUS\_FAULT : 모선 사고 해석후 결과를 화면에
  - LINE\_FAULT : 선로 사고에 Display
- HELP : 구성된 Window 환경에 대한 소개
- SAVE : 원하는 이름의 File로, 작성된 계통도와 DATA 를 저장
- OPEN : 선택된 File 을 Loading
- EDIT
  - CLEAR\_ALL : 화면 전체 지우기
  - LINE\_DEL : 선로 지우기
  - BUS\_DEL : 모선 지우기
  - CAP\_DEL : 콘덴서 지우기
- OUT : 고장 해석후 전체 결과를 Display

이외에 Window Scroll 을 위한 Button 이 존재하며 사용자 에게 편의를 주기위해 Window 하단에 Hint 를 표시 하였다.

### 6. 사례연구

본 논문에서 제시한 고장해석기를 통해 6모선 7선로 계통을 그림(10)과 같이 나타내고, 이 계통의 Line 2 에서 SLG fault 가 발생한 경우의 예를 들어보면, 그 결과가 사고지점에 모선을 하나 추가해서 모선사고를 수행 한 결과와 일치함을 알수있다.



그림(10) Sample System

이때 사고지점은 BUS 1 에서 2/3 지점이며, 계통 데이터는 Table(1)과 같다.

System Element	Connecting Nodes	Self Impedance	
		$Z_1 = Z_2$	$Z_0$
L-1	1 - 6	0.123 +j 0.518	0.492 +j 1.042
L-2	1 - 4	0.080 +j 0.370	0.400 +j 0.925
L-3	4 - 6	0.097 +j 0.407	0.450 +j 1.030
L-4	5 - 6	0.000 +j 0.300	0.000 +j 0.300
L-5	2 - 5	0.282 +j 0.640	1.410 +j 1.920
L-6	2 - 3	0.723 +j 1.050	1.890 +j 2.630
L-7	3 - 4	0.000 +j 0.133	0.000 +j 0.133
8	0 - 4	0.000 -j 34.10	....
9	0 - 1	0.000 -j 29.50	....
10	0 - 6	0.000 -j 28.50	....
B-1	Gen 1	0.010 +j 0.120	0.000 +j 0.016
B-2	Gen 2	0.015 +j 0.240	0.000 +j 0.016

TABLE (1). Sample System Data

해석후의 결과는 아래와 같다.

SHUNT FAULT AT LINE 2

FAULT LOCATION : 66.7 PERCENT POINT FROM BUS 1 TO BUS 4  
 FAULT CASE---SINGLE LINE TO GROUND

VOLTAGE ( SEQUENCE )

BUS NO.	POSITIVE SEQUENCE	NAGATIVE SEQUENCE	ZERO SEQUENCE
1	0.883+J -0.015	-0.117+J -0.015	-0.008 +J -0.002
2	0.936+J -0.021	-0.064+J -0.021	-0.000 +J 0.000
3	0.735+J 0.000	-0.265+J 0.000	-0.000 +J 0.000
4	0.716+J -0.010	-0.284+J -0.010	-0.089 +J -0.017
5	0.853+J -0.004	-0.147+J -0.004	-0.000 +J 0.000
6	0.817+J -0.012	-0.183+J -0.012	-0.016 +J -0.008
7	0.668+J -0.016	-0.332+J -0.016	-0.336 +J 0.031

VOLTAGE ( PHASE )

BUS NO.	VA	ANGA	VB	ANGB	VC	ANGC
1	0.759	-2.474	0.938	-114.589	0.962	113.961
2	0.874	-2.728	0.951	-117.307	0.988	116.201
3	0.470	0.053	0.898	-105.176	0.897	105.183
4	0.345	-6.082	0.925	-109.313	0.912	109.599
5	0.705	-0.702	0.931	-112.252	0.939	112.052
6	0.619	-3.018	0.924	-111.107	0.932	110.909
7	0.000	0.000	0.962	-121.592	1.043	118.890

LINE CURRENT DURING FAULT

LINE NO.	POSITIVE SEQUENCE	NAGATIVE SEQUENCE	ZERO SEQUENCE
1( 1, 6)	0.0236+J-0.1221	0.0236+J-0.1221	0.0073+J-0.0044
2( 1, 7)	0.1820+J-0.8323	0.1820+J-0.8323	0.1478+J-0.4684
2( 4, 7)	0.1257+J-0.3660	0.1257+J-0.3660	0.1597+J-0.7299
3( 4, 6)	-0.0499+J 0.2348	-0.0499+J 0.2348	-0.0335+J 0.0569
4( 5, 6)	0.0268+J-0.1192	0.0268+J-0.1192	0.0263+J-0.0525
5( 2, 5)	0.0268+J-0.1192	0.0268+J-0.1192	0.0000+J 0.0000
6( 2, 3)	0.0760+J-0.1395	0.0760+J-0.1395	0.0000+J 0.0000
7( 3, 4)	0.0760+J-0.1395	0.0760+J-0.1395	0.1262+J-0.6729

LINE CURRENT DURING FAULT ( PHASE )

LINE NO.	IA	ANGA	IB	ANGB	IC	ANGC
1( 1, 6)	0.254	-77.643	0.119	97.899	0.119	97.899
2( 1, 7)	2.194	-76.509	0.366	95.358	0.366	95.358
2( 4, 7)	1.518	-74.293	0.366	84.650	0.366	-84.650
3( 4, 6)	0.543	104.215	0.179	-84.733	0.179	-84.733
4( 5, 6)	0.302	-74.657	0.067	90.437	0.067	90.437
5( 2, 5)	0.244	-77.339	0.122	102.661	0.122	102.661
6( 2, 3)	0.318	-61.405	0.159	118.595	0.159	118.595
7( 3, 4)	0.992	-73.702	0.536	-84.622	0.536	-84.622

))))))))) E.O.F <<<<<<<< KPNU 1993

## 7. 결과 및 고찰

본 논문에서는 선로사고시에 선로사고 해석에 요구되는 Impedance 요소 들을 4 단자망을 이용하여 구함 으로서, 사고 해석의 on-line 화가 가능 하게 되었다

또한 본 연구에서 개발한 알고리즘을 EWS (Engineering Workstation)에 적용하여 사용이 편리한 MMI 기능을 실현하였다. 그러나 본 논문에서는 mutual 이 없는 선로 사고만을 고려했고 mutual 이 있는 선로에서의 사고 에 대한 적용이 과제로 남아있다. 본 연구는 한국 전력공사의 자원에 의해서 수행 되었음.

## 8. 참고 문헌

- [1] Charles A. Gross " Power System Analysis " John Wiley & Sons, Inc 1986.
- [2] Paul M. Anderson " Analysis of Faulted Power Systems" The Iowa State University Press 1973.
- [3] Curtis F. Gerald, Patrick O. Wheatlsy "Applied Numerical Analysis " Addison-Wesley Publishing Company 1989.
- [4] N. Pahalawaththa, C.P. Arnold, M.Shurety, " A Power System Cad Package For The Workstation And Personal Computer Environment " IEEE Transaction on Power Systems, Vol 6 , No 1 February 1991.
- [5] M.E.Van Valkenburg " Network Analysis " Prentice Hall 1974.
- [6] Adrian Nye " XLib Programming Manual " O'Reilly & Associates, Inc 1990.
- [7] Dan Heller " Motif Programming Manual " O'Reilly & Associates, Inc 1991.
- [8] Douglas A. Young " X Window System " Prentice Hall 1990.
- [9] 이 계영 " X - Window application programming " 지산사 1991.
- [10] 김 용성 " Unix System V 입문 "영진 출판사 1991
- [11] 류 성렬 " Unix 에서 ANSI C " 광일 출판사 1991
- [12] 백 영식, 이 재용 " PC를 이용한 교육용 전력조류 Package의 개발 " 전력계통 Workshop 및 학술 연구 발표회 논문집 1992.