

EMS 운용을 위한 상정사고 선정

金 定 年^o · 白 榮 植
慶北大學校 電氣工學科

Contingency Selection For EMS Operation

Jung-Nyun Kim^o · Young-Sik Baek
Dept of Electrical Eng. Kyung Pook National Univ.

Abstract - Power system is becoming more and more complex and large. So system is stressed increasingly. This paper presents a method to select contingency ranking in power systems for EMS operation. Firstly, the proposed method is applied line outage using Thevenin equivalent circuit. Secondly, Contingency harmful to system is selected by loss variation between base case and fault. Thirdly, this paper prescribed simulated line sequence. Therefore this algorithm shows higher computation speed and effective memory use.

Key Words : contingency selection, Thevenin equivalent-circuit, EMS, OOP, loss variation

I. 서 론

상정사고해석은 EMS(Energy Management System)의 핵심 분야로서 계통이 거대화됨에 따라 시스템의 부담을 가중시키고 있다. 그럼으로써 상정사고해석의 중요성은 한층 더 높아지고 있다. 갑작스러운 외란에 의한 계통의 불안정 현상으로 선로조류 증가 및 계통 전압강하를 초래하여 결국에는 계통의 붕괴에 이른다. 그러므로 이러한 시스템을 위험하게 하는 사고를 미리 예견하고 사고 복구대책의 필요성이 증가하게 되었다. 상정사고 해석에 있어서 각각의 상정사고가 계통에 미치는 영향에 따라 사고의 순위를 결정하는 것은 상정사고 위험순위 결정이라고 하고, 이러한 상정사고 위험순위 결정에 관한 연구는 수행도 지수(PI:Performance Index)를 이용한 방법 [2,3,4,5,6], 선형상정사고 선정기법 [9,10,11,12], Bounding기법 [7,8] 등 이미 많은 연구가 수행되었다.

수행도 지수를 이용한 방법은 사고후의 계통의 위험정도를 나타내기 위하여 전압 또는 조류의 위험지수를 사용한다. 또한 제약을 크게 위반하지만 위반하는 개수가 적어서 PI가 작게 나오고 제약을 조금 위반하지만 위반하는 개수는 많아서 PI가 전자보다 크게 나와 더 위험한 것으로 결정되는 위험순위 결정 오류가 있을 수 있다. 따라서 계산시간과 정확성을 요구되는 상정사고 선정 알고리즘이 필요하게 되었다. 각각의 상정사고는 AC전력조류계산으로 분석되어야 정확하지만 계산시간이 너무 많아 실시간 평가에 있어서 거의 불가능하다. 상정사고 위험순위결정을 실시간으로 다루기 위해서는 계산시간을 단축시키고 정확해야 한다. 대규모 전력계통에서 상정사고의 수가 많으면 계산소요시간은 상당히 증가하므로 실시간 운영에 적합하지 않다. Bounding기법은 시스템이 사고로 인해 위험의 가능성이 있는 특정부분만을 계산함으로써 계산시간을 단축시키지만 정확도면에서 떨어진다. 이와 같이 많은 연구가 수행되었으나, 이들은 EMS에 직접 적용하기는 어렵다. 본 연구에서는 EMS에 적용 가능한 상정사고 선정기법에 대한 알고리즘을 개발하였다. 즉, EMS용 여러 패키지를 공유하기 위해 객체지향기법의 적용과 메모리의 과다한 할당을 줄였으며, 실시간용으로 운용가능하도록 계산시간을 단축하였다. 본 연구에서는 전력조류계산의 결과를 기준상태로 정하고 두 모션에서 들어다 본 등가 임피던스로서 상정사고후의 각 모션의 전압의 변화량을 구하고 선로의 조류를 구하는 알고리즘을 개발한다.

II. 본 론

1. 상정사고 선정 알고리즘

본 논문의 상정사고해석 알고리즘은 3부분으로 구성되어 있다. 첫째는 선로사고순서에 관한 결정부분이다. 본 연구에서는 계산량의 최소화를 위한 선로사고의 모의순서를 결정했다. 이 순서에 따라 선로사고의 모의가 수행되며, 그럼으로써 역행렬계산을 최소화시켰다. 둘째는 선로손실의 추정계산에 의한 사고모의의 단축에 관한 부분이다. 손실의 변화에 따른 시스템의 위험정도를 판단하고 위험한 선로사고만을 1차적으로 선별해 낸다. 선로손실계산에 새로운 해법을 적용함으로써 모의해야 할 선로사고의 수를 감소시키고 계산시간을 단축시킨다. 세 번째는 상정사고를 해석하는 부분이다. 본 연구에서는 테브링 등가회로를 이용한 기법을 적용하였다. 본 알고리즘은 그림1과 같다.

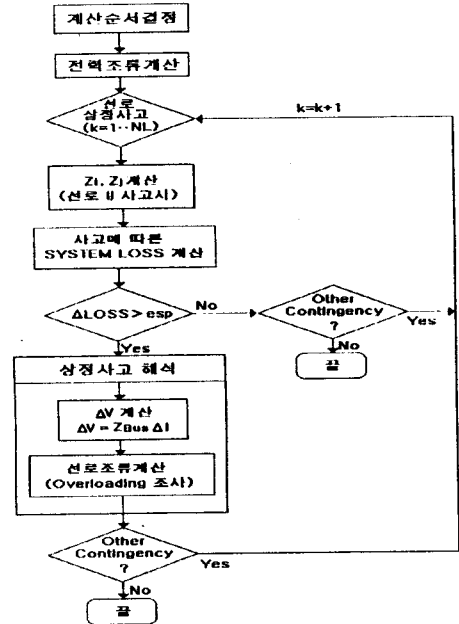


그림 1 상정사고 선정 알고리즘

2. 제한한 상정사고 선정법

2-1. 선로사고의 모의

계통의 전압, 전류식은 식(1)과 같다. 다수의 전압원 또는 전류원을 포함하고 있는 선형 회로망에서의 전류 및 전압은 각 전압원 또는 전류원이 단독으로 있을 때의 전류 또는 전압분포의 총합과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

계통을 선형 회로망으로 가정할 때 중첩의 원리가 성립하므로 사고후의 각 모선의 전압은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ V_3' \\ V_4' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 선로의 사고에 의한 전압의 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이식에서 사고에 의한 전류의 변화량 I_F 를 알 경우 ΔV 가 구해지며, I_F 의 계산은 아래와 같이 한다. 우선 I_F 를 구하기 위해 다음과 같은 선형 회로를 생각하자.

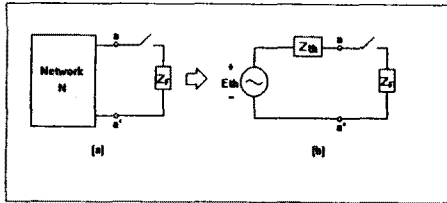


그림 2. 테브낭 등가회로

Z_F : 사고 임피던스

E_{th} : 테브낭 등가전압

Z_{th} : 테브낭 등가 임피던스

선형 회로망N을 등가화(a)시키고 Z_F 에 그림(b)과 같이 연결할 경우 전류는 다음과 같다.

$$I_F = \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_F} \quad (4)$$

테브낭 임피던스와 Z_{BUS} 와의 관계를 살펴보면

$$Z_{th} = V_{i=1} = Z_{ii} \quad (5)$$

모선 i에 단위전류 $I_i=1$ 인 모선 전류를 주입할 때 V_i 입을 알 수 있다. 이는 기준모선과 모선 i에서 들여다 본 임피던스이다. 선로 탈락을 모델링하기 위해서는 기준 모선과의 관계가 아닌 두 모선사이의 등가 임피던스를 구할 필요가 있다.

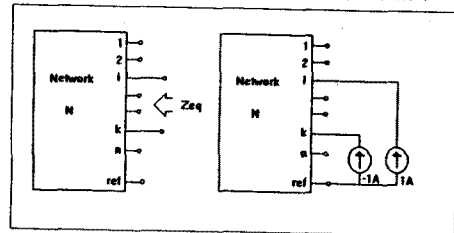


그림 3. N-port회로망

선로가 연결된 두 모선에서 들여다 본 등가 임피던스는 그림 2에서와 같이 두모선(i모선과 k모선)에서 들여다 본 등가 임피던스는

$$Z_{th(i,k)} = V_{i=1, i=1, i=-1} = V_{i=1, i=1, i=-1} - V_{i=1, i=1, i=-1} \quad (6)$$

이되고,

$$\text{여기서 } V_{i=1, i=1, i=-1} = Z_{ii} - Z_{ik} \quad (7)$$

$$Z_{th(i,k)} = Z_{ii} + Z_{kk} - Z_{ik} - Z_{ki} \quad (8)$$

이것은 두모선에서 들여다 본 등가 임피던스가 된다.

선로가 탈락하기전의 상태 즉, 기준 상태에서 테브낭 등가회로로 표현하면 그림 4와 같다.

E_{th} 는 식(9)와 같이 얻어 질 수 있다.

$$E_{th} = V_i^0 - V_k^0 \quad (9)$$

V_i^0, V_k^0 : 기준 상태에서의 모선 i,k에서의 전압

두 모선(i,k)사이의 선로의 임피던스를 Z_F 이라고 하였을 경우 이 선로의 탈락은 선로 탈락 이전의 Network를 테브낭 등가회로로 바꾼 후 그 두 모선사이에서 Z_F 의 임피던스를 병렬로 연결시키으로써 선로 탈락을 모델링 할 수 있다.

두 모선 사이의 전압차에 의해서 Z_F 을 통하여 전류 I_F 이 흐르게 된다.

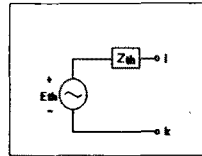


그림 4. 기준상태

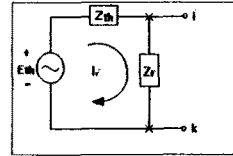


그림 5. 선로의 탈락

선로 탈락의 모델링은 다음과 같다

$$I_F = \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_F} \quad (10)$$

$$Z_F = -Z_{ik} \quad (11)$$

Z_{ik} : ik선로의 임피던스

두 모선 사이의 전압차에 의해서 Z_F 을 통하여 흐르는 전류는 두 모선에 주입되는 전류원이 되며 그림 6과 같이된다.

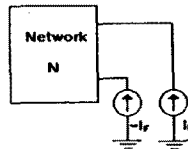


그림 6. 사고 전류의 주입

이 전류는 사고로 인하여 각 모선에서는 전압의 변동분이 생기게 된다. 사고후의 전압은 중첩의 원리를 사용함으로써 구할 수 있다.

2-2. 선로손실 변화량 계산

사고로 인하여 심각한 영향을 미치는 사고의 경우 시스템의 손실은 급격히 증가한다. 반대로 사고가 미약한 영향을 미치는 경우 손실은 조금 변하게 된다. 그럼으로써 미약한 영향을 미치는 상정사고에 대해서는 무시할 수 있으며 상정사고를 모의하지 않아도 된다. 그럼으로써 모의해야 할 선로의 수를 감소시킨다. 사고전후의 손실의 변화로써 시스템에 미치는 영향을 예측할 수가 있으며 손실의 변화량으로서 시스템에 미약하게 영향을 미치는 사고를 선별해 낼 수가 있다.

우선 사고가 시스템에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림과 같은 시스템을 예로 들어보기로 하자. 사고 전후의 손실의 변화는 다음과 같이 구해진다.

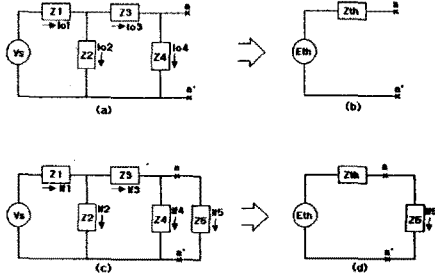


그림 7. 테브낭 등가회로

$I_{a'}$: 사고전의 각 임피던스에 흐르는 전류

$I_{a''}$: 사고후의 각 임피던스에 흐르는 전류

회로 그림7-(a)를 테브낭 등가회로 변경하면 그림7-(b)처럼 되고, 선로의 탈락은 모의 하기 위해 다음과 같이 a-a'단에 Z5라는 임피던스를 연결하고 모의한다.

이때 전체 시스템의 모든 량들을 계산하고 손실을 구하면 원래 시스템(a)과 변경후의 시스템(c)의 차를 구하면 이는 Z5를 연결함에 따른 손실의 변화가 된다.

그림7-(b)와 같이 그림7-(a)를 등가화 될 수 있고, 변경에 따른 손실의 변화량은 (d)에서 Z5에서의 손실로써 쉽게 구해줄 수 있다.

위와 같이 어떤 시스템의 등가임피던스와 등가 전압을 알다만 사고로 인한 손실의 변화량을 구할 수가 있다.

표 1. 입력 데이터

V_s	$10+j0[V]$
Z1	$2+j4[\Omega]$
Z2	$4+j2[\Omega]$
Z3	$1+j3[\Omega]$
Z4	$4+j7[\Omega]$
Z5	$4+j5[\Omega]$

표 2. 결과 데이터

그림 (a)		그림 (c)	
I_{a1}	$0.0877-j1.0380$	I_{f1}	$0.8055-j1.1430$
I_{a2}	$0.7308-j0.6538$	I_{f2}	$0.6700-j0.5692$
I_{a3}	$0.0769-j0.3846$	I_{f3}	$0.1355-j0.5733$
I_{a4}	$0.0769-j0.3846$	I_{f4}	$0.0379-j0.0259$
I_{a5}	$0.0000+j0.0000$	I_{f5}	$0.0976-j0.3145$
손실	$8.0770-j10.3800$	손실	$8.0650-j11.430$

그림(a)와(c)에서 각각의 임피던스에 흐르는 전류와 전체 시스템의 손실은 다음과 같다.

모든 량들을 계산한 결과 두 시스템의 손실의 변화량은

$$\sum (I_{a'} - I_{a''})^2 Z_i = 0.2169 + j1.041 \quad (12)$$

이는 (d)에서와 같이 등가회로에서 손실을 구하면

$$\frac{V_{a'}^2}{Z_m + Z_5} = 0.2169 + j1.041 \quad (13)$$

과 같다. 손실의 변화가 기준상태 손실의 변화의 기준치 이상일 때만 해석하고 그 미만일 때는 상정사고를 행하지 않는다. 그 기준치는 모의 해본 결과 5%가 적당하다.

2-3. 상정사고 모의순서 결정

선로(i-k)의 탈락으로 인한 모선 m에서의 전압의 변화분은 식(14)에서와 같이 구해진다.

$$\Delta V_m = (Z_m - Z_{im}) I_f \quad (14)$$

위 식과 같이 선로사고를 모의할 경우 Z_{BUS} 의 두개의 열(column) 즉, $[Z_{ij}], [Z_{ji}]$ 가 필요하다. EMS용 상정사고를 개발하는데 있어서 메모리의 효율화를 위해서 Z_{BUS} 전체를 저장하는 것은 비효율적이고 기존에는 IMML(역행렬 수정법)에 의해서 계산되었다. 이 계산량을 최소화하여 메모리의 절약과 계산 시간을 단축하며 EMS용으로 사용 가능하게 하는 알고리즘을 개발하였으며, 그 방법은 다음과 같다. 본 알고리즘에서는 전체 Z_{BUS} 를 저장하지 않고 계산시 필요한 열(column)만을 계산하고 전체 선로사고를 모의하는데 있어서 각각의 칼럼은 단 한번의 계산하며 중복을 피하도록 한다.

주어진 계통이 있을때 선로사고 수행순서 결정 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 시작모선을 지정한다(모선 k).
- ② 중심이 되는 모선을 지정한다(모선 k)
- ③ 중심모선(k모선)에 연결된 선로L을 차례로 선택한다. (선로 L지정 ; 연결모선은 k-m)
- ④ 모선 m은 스택에 저장한다.
- ⑤ 모선 k에서 더이상 연결된 선로가 없으면 단계⑥로 가고 아직 연결된 선로가 더 있으면 단계③로 간다.
- ⑥ 스택에 수행해야 될 것이 있으면 맨 처음 것을 끄집어내어 k로 하고 단계② 간다. 그렇지 않으면 끝낸다.

그림8과 같은 IEEE 14모선 시스템의 예를 들어 설명한다.

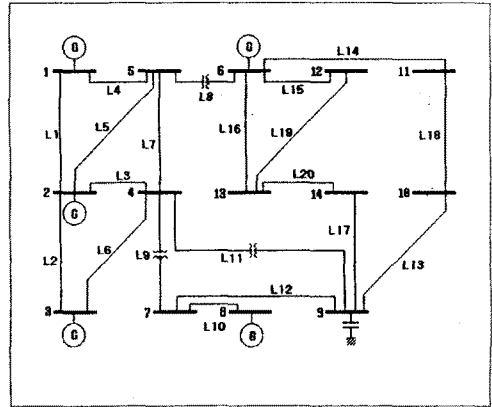


그림 8. IEEE 14모선

위와 같은 알고리즘으로 선로사고 순서를 표로 구성하면 다음과 표 4와 같다.

표 4에서 pivot을 중심으로한 모의순서를 정하며 선로 L1과 L2 선로사고를 모의할때 1번째 열이 공통적으로 사용되며 그 다음부터는 더이상 필요 없게 된다. 마찬가지로 L2,L3,L4가 모의 될때는 2번째 열이 공통적으로 사용되며, 모의후에는 더이상 필요없게 되며 차지하고 있던 메모리를 해제한다.

표 3. 인덱스(Index) 테이블 구성

순서	선로 No	연결상태	Pivot	저장된 열
1	L1	B01-B02	B1	B2
2	L4	B01-B05	B1	B2,B5
3	L2	B02-B03	B2	B5,B3,B4
4	L3	B02-B04	B2	B5,B3,B4
5	L5	B02-B05	B2	B5,B3,B4
6	L7	B05-B04	B5	B3,B4
7	L8	B04-B06	B5	B3,B4,B6
8	L6	B03-B04	B3	B4,B6
9	L9	B04-B07	B3	B6,B7
10	L11	B04-B09	B4	B6,B7,B9
11	L14	B06-B11	B6	B7,B9,B11
12	L15	B06-B12	B6	B7,B9,B11,B12
13	L16	B06-B13	B6	B7,B9,B11,B12,B13
14	L10	B07-B08	B7	B9,B11,B12,B13,B8
15	L12	B07-B09	B7	B9,B11,B12,B13,B8
16	L13	B09-B10	B9	B11,B12,B13,B10
17	L17	B09-B14	B9	B11,B12,B13,B10,B14
18	L18	B11-B10	B11	B13,B10,B14
19	L19	B12-B13	B12	B13,B14
20	L20	B13-B14	B13	B14

3. 사례연구

이 시스템의 모의 결과는 논문12의 결과와 동일하다. 참고논문의 방법은 시스템이 변경할 때마다 IMML(역행렬수정법)에 의해서 역행렬의 수정과정이 필요하므로 많은 시간이 소요된다. 그러나 제안한 방법은 Z_{BUS} 의 필요한 두 칼럼만을 이용하므로 참고논문과 결과는 동일하지만 계산시간면에서 우수한 방법이다.

아래의 표는 같은 사고를 반복적으로 계산함으로써 참고논문의 방법과 제안한 방법의 계산시간을 나타낸 것이다. 단, 참고논문에 제시한 방법중 Pre-Compensation 방법을 사용하였다.

표 6. 참고 논문과의 시간 비교

반복횟수	제안한 방법 (TIME1)	참고논문 (TIME2)	TIME2 / TIME1
20회	0.0333	1.0666	32.000
40회	0.1333	2.0833	15.625
60회	0.2333	3.1165	13.357
80회	0.2999	4.1832	13.944
100회	0.3999	5.2331	13.083

위의 표에서 보듯이 처럼 제안한 방법이 계산 시간면에서 대략 13배 이상이나 빠르게 계산할 수가 있다.

III. 결 론

본 연구는 EMS개발을 위한 한 분야로서 상정사고 알고리즘 개발으로써 객체지향 기법을 적용함으로써 EMS개발을 용이하게 함에 목적이 있다. 객체지향기법을 적용함으로써 다른 분야의 확장성이 용이하게 함에 목적이 있고 프로그램의 보수·수정을 용이하게 한다.

그리고 그 세부적인 연구성과는 다음과 같다.

첫 번째, 상정사고를 해석하는데 테브나 등가회로를 이용함으로써 쉽게 사고의 영향을 판단할 수 있도록 구성하였다.

두 번째, 선로사고를 모의하는데 있어서 모의 순서를 미리 정해 놓음으로써 역행렬계산의 중복을 피하고 계산시간을 단축시키고 Z_{BUS} 를 저장시키는 메모리를 절약하였다.

세 번째, 사고전·후의 손실을 비교함으로써 손실의 변화에 따른 시스템에 미치는 영향을 판단함으로써 모의여부를 결정할 수 있다. 그렇게 함으로써 계산시간을 단축시켰다.

<참고문헌>

- [1] 백영식, "경제운용 및 상정사고를 고려한 전력계통 신뢰도 산정에 관한 연구", 서울대학교 대학원 전기공학과.
- [2] G.C. Ejebe, B.F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-98, No.1 Jan/Feb 1979, pp97-109
- [3] Atif S. Debs, "Modern Power Systems Control And Operation", Kluwer Academic Publishers Boston/Dordrench/London.
- [4] T.A. Mikolinnas, B.F.Wollenberg, "An Advanced Contingency Selection Algorithm", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.2, February 1981, pp608-617
- [5] A.O.EKWUE, "On Ranking Of Contingencies For On-Line Applications", Electric Power Systems Research, 19(1990), pp207-212
- [6] S.Vemuri, R.E.Usher, "On-Line Automatic Contingency Selection Algorithms", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, February 1983, pp346-354
- [7] F.D. Galiana, "Bound Estimates Of The Severity Of Line Outages In Power System Contingency Analysis And

Ranking", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.9, September 1984, pp2612-2624

[8] P.Lagonotte, J.C.Sabonnadiere, J.Y.Leost, J.P.Paul, "Structural Analysis Of The Electrical System : Application To Secondary Voltage Control In France", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2, May 1989, pp479-486

[9] Mark K. Enns, John J. Quada, Bert Sackett, "Fast Linear Contingency Analysis", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101, No.4 April 1982, pp783-791

[10] Norris M. Peterson, William F. Tinney, Ronald W. Bree, Jr, "Iterative Linear AC Power Flow Solution For Fast Approximate Outage Studies", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-91, 1972, pp2048-2056

[11] N.Hadjsaid, M.Benahmd, J.Fandino, J.C.Sabonnadiere, and G.Nerin, "Fast Contingency Screening For Voltage-Reactive Consideration In Security Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.1, February 1993, pp144-150

[12] O.Alsac, B.Stott, W.F. Tinney, "Sparsity-Oriented Compensation Method For Modified Network Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.5, May 1983, pp1050-1060

[13] F. Albuyeh, A.Bose, B.Heath, "Reactive Power Considerations In Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.1, January 1982, pp107-110