

한국형 에너지 관리시스템용 상정고장 해석프로그램 개발

논 문
59-2-2

Development of the Contingency Analysis Program of Korean Energy Management System

조 윤 성* · 윤 상 윤†
(Yoon-Sung Cho · Sang-Yun Yun)

Abstract - This paper describes the development of robust contingency analysis program for Korean Energy Management System. The important function of contingency analysis is to determine the bus/branch model for contingency, and to calculate the state of the power network based on the network model and topology output. In the proposed method, the bus/branch models for contingencies are determined exactly using a fast linked-list method based on the application common model database. To calculate the state of the power system included contingency, the full-decoupled powerflow approach, the partial powerflow method for contingencies and the proposed contingency screening algorithm are also used to contingency analysis. To verify the performance of the developed processor, we performed a file-based test using several structured input data and online test using the database which resides on memory. The results of these comprehensive tests showed that the developed processors can accurately calculate the power system contingency state from online data and can be applied to Korea Power Exchange system.

Key Words : Korean EMS, Real time application, Network analysis, Contingency analysis, Topology processing, Load flow

1. 서 론

대규모 계통의 계획 및 운영 측면에서, 계통 운영자에게 상정고장해석(Contingency Analysis, CA)은 가장 중요한 업무 중에 하나이다 [1-3]. 계통 계획측면에서 CA는 신규 설비가 투입되기 전에 투입에 따른 계통 변화 특성을 분석 및 대책을 수립 할 수 있다. 또한, 계통 운용측면에서 CA는 계통 운영자에게 안정적으로 계통을 운영할 수 있는 다양한 정보를 제공한다. 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)의 계통해석에서 CA는 전력계통에서 발생 가능한 구성요소의 변화를 검토한다. 분석되어질 수 있는 구성요소의 변화군에는 송전선로, 변압기, 차단기, 부하 및 발전기 등이 포함된다. CA는 운영한계 값을 위반하는 상정고장에 대해 사용자에게 정보를 제공한다. 이러한 운전한계 값에는 송전선로 과부하, 모선의 이상 전압 및 사전에 정의된 계통의 이상 현상이 포함된다. 인터페이스 선로(북상조류, 인천조류, 북부조류 등) 및 노드 양단의 전압 위상차등이 사전에 정의된 계통정보이다. 독립계통을 야기 시키는 상정고장 또는 갑작스런 부하나 발전력 상실도 확인된다. 화면, 메시지 로그, 정보는 사용자에게 상정고장 해석 결과를 보여주는 데 사용된다. CA는 실시간 또는 스터디 환경에서 동작한다. 실시간 환경에서는, 현재 상태에서 계통에 심

각한 영향을 미치는 상정고장을 분석할 수 있다. 아울러 CA는 실시간 계통, 저장된 계통 조건 또는 가상의 운전 상태에서의 상정고장의 영향을 분석하기 위해 스터디 환경에서 사용되어 질 수 있다.

EMS 계통해석 프로그램은 스카다(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)로부터 취득된 온라인데이터(아날로그 측정값, 차단기 디지털 정보)를 이용해 토폴로지, 상태추정, 급전원 조류계산, 상정고장, 휴전계획, 전압계획, 송전가능용량, 송전선 과부하해소, 고장해석 등의 해석정보를 계통 운영자에게 전달한다 [4]. 특히, EMS의 실시간 모드에서 토폴로지, 상태추정, 온라인 조류계산 및 상정고장해석은 가장 중요한 프로그램들이다. 토폴로지 프로세서는 계통설비 데이터와 실시간 디지털 데이터를 받아 전기적인 모션을 생성하며, 상태추정 프로세서는 아날로그 측정값을 받아 모선의 전압 및 설비의 현재 상태값을 추정한다. 또한, 온라인 조류계산은 상태추정 결과를 바탕으로 매우 작은 유/무효전력의 Mismatch를 갖는 계통상태의 값을 계산한다. 온라인 조류계산의 결과는 다양한 어플리케이션에서 사용하므로 뛰어난 수렴특성 및 EMS 환경에 맞는 다양한 기능을 포함하고 있어야 한다. 토폴로지 및 조류계산의 기능을 포함하고 있는 상정고장해석은 사전에 정의된 상정고장 정의 리스트를 이용하여 고장에 따른 계통의 상태를 분석한다. 상정고장해석에서 토폴로지 처리기능은 차단기 조작에 의한 부하/발전의 탈락, 모선 분리/개방, 설비의 개방/투입 및 독립계통의 변화를 감시되고 분석된다. 조류계산 기능은 토폴로지 처리에 의해 변화가 발생하는 계통설비의 값을 계산하여 설비의 위반 유무를 체크한다. EMS 기반의 상정고장해

* 정 회 원 : LS산전 전력연구소 선임연구원 · 공박

† 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 책임연구원 · 공박

E-mail : syyun@kepri.re.kr

접수일자 : 2009년 8월 27일

최종완료 : 2009년 12월 18일

석과 PSS/E 기반의 상정고장해석의 차이점은 상정고장을 발생시키기 위해 물리적 노드(Node)를 조작하느냐 전기적 모선(Bus)를 조작하느냐이다. 상정고장을 발생시키기 위해 차단기를 조작함으로써 주변 설비에 많은 영향을 발생시킨다. 이와같이 EMS 기반의 상정고장해석은 빠른 연산시간 내에 토폴로지 및 조류계산을 수행해야 한다.

지금까지 이러한 빠르고 정확한 상정고장해석을 위해 다양한 연구노력이 있었다. 참고문헌 [5-9]에서는 온라인 안전도 해석을 위해 다양한 지수를 이용해 상정고장을 선정하는 방안을 제시하였다. 또한 참고문헌 [6]에서는 EMS 환경에서 상정고장의 필요성 및 중요성에 대해 설명하였다. 그러나 상정고장해석을 위한 토폴로지 처리를 효과적으로 해결하기 위한 방안에 관한 참고자료는 구하기 힘든 실정이다.

본 논문에서는 K-EMS 계통해석 프로그램으로 빠르고 정확한 상정고장해석 프로그램 개발에 대해 설명하였다. 우선 K-EMS의 공통 데이터베이스 모델(Application Common Model, ACM)에 상정고장해석에 관한 모델을 추가하였다. 강인한 계층 구조의 데이터베이스를 구축하기 위해 대규모 계통해석에 많이 사용되는 링크구조를 이용한 데이터베이스 모델을 개발하였다. 또한 빠른 토폴로지 변경 및 다른 설비의 영향을 분석하기 위해 효율적인 토폴로지 검색 알고리즘을 제안하였다. 제안된 Linked-List 방법은 상정고장 주변을 단계적으로 검색하여 토폴로지 변화를 판단 및 분석한다. 빠른 상정고장 스크리닝을 위해 새로운 지수를 제안하였다. 개발 프로세서의 유용성을 검증하기 위해서 2가지의 검증 방법을 사용하였다. 첫째, 시험계통에 대해 상정고장해석을 위한 입력 데이터를 ACM 형식으로 생성하였다. 임/출력 파일의 형태는 엑셀의 Comma Separated Values(CSV) 형태로 구성되어 있다. CSV 데이터를 이용하여 개발 프로그램의 유용성을 검증하였다. 둘째, K-EMS의 서버에 개발 프로세서 탑재하여 전계통에 대해 다양한 조건을 이용하여 검증하였다.

2. K-EMS 상정고장해석의 구조 및 기능

그림 1은 K-EMS 기반의 상정고장해석의 전체적인 구조 및 기능에 대해 나타내었다. 그림 1에서 상정고장해석의 기능은 상정고장 정의, 유효성 검증, 토폴로지 처리, 발전력 재수립, 스크리닝, 자동선택, 완전해석, 조건부 상정고장 처리, 감시로 구분할 수 있다.

2.1 상정고장 정의 및 유효성 검증

상정고장 정의 기능은 상정고장해석의 입력데이터 생성에 데이터로서 사용자가 분석하고자 하는 현상을 만드는 작업을 수행한다. 사용자는 송전선로/변압기, 발전력/부하/조상설비 탈락 및 투입 및 차단기 투입 및 개방을 상정고장으로 모델링 할 수 있다. 또한, 조건부 상정고장 처리 및 고장과 과급방지시스템을 상정고장으로 정의할 수 있다. 사용자의 분석 목적에 따라 복사조류 상정고장해석, 765kV 2회선 고장해석, 345kV 2회선 고장해석 및 변압기 1뱅크 고장시 대책해석 등으로 상정고장을 정의할 수 있다.

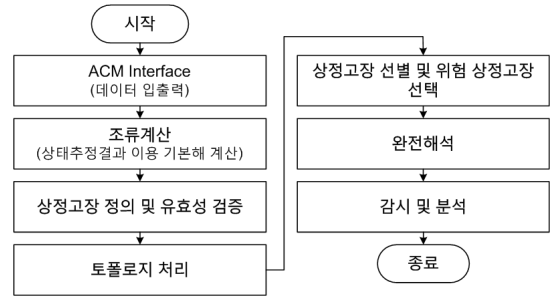


그림 1 상정고장해석의 전체적인 구조도
Fig. 1 Overall structure of contingency analysis

유효성 검증 기능은 상정고장 해석 프로그램에 의해 사용되는 데이터가 정확한지 검증한다. 정의된 상정고장이 계통의 구성 요소와 일치하는지를 확인한다. EMS 계통 데이터베이스가 주기적으로 갱신되기 때문에 사용자가 이전에 정의된 상정고장이 현시점의 계통모델과 불일치하는 경우가 발생한다. 상정고장이 실행이 시작될 때 유효성 검증을 자동으로 수행 후 사용자에게 메시지 로그를 통해 전달한다.

2.2 토폴로지 처리

토폴로지 처리 기능은 상정고장 정의에 맞게 모델링된 계통의 토폴로지를 수정 후 계통 구성 요소의 탈락 및 독립계통(Island)의 생성 및 고립을 판단한다. 특히 발전소 부근의 상정고장은 신규 독립계통을 생성 한다. 다음은 그림 2의 시험계통을 사용하여 토폴로지 처리 기능을 살펴본다.

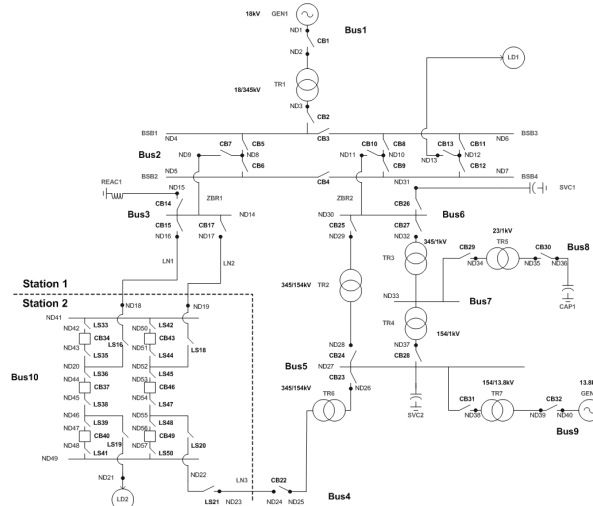


그림 2 상정고장해석용 시험계통
Fig. 2 Test system for contingency analysis

- 단계 1) 그림 2의 변전소 2에서 차단기 #40을 제외한 모든 차단기 및 단로기의 상태는 닫힘이다.
- 단계 2) 변전소 2에 대해 토폴로지 해석을 하면 전기적 모선이 1개 생성되며 모든 설비는 투입상태이다.
- 단계 3) 상정고장은 선로 1(LN1)으로 정의한다. 토폴로지 처리를 위해 선로 1 양단의 차단기를 조작한다.
- 단계 4) 차단기 조작으로 인해 변전소 2의 차단기 #34와

#37이 열림 상태로 변경된다.

단계 5) 변전소 2의 변화를 분석한다. 상정고장 선로를 제외하면 기존의 부하(LD2)가 탈락된다.

EMS 기반의 상정고장 해석에서는 토폴로지 처리를 통해 정확한 설비 탈락을 계산한 후 조류계산을 수행한다. 그러나 PSS/E 기반의 상정고장 해석에서는 위 경우에서처럼 부하의 탈락을 계산할 수 없으므로 정확한 조류계산에 반영할 수 없다. K-EMS 상정고장해석의 토폴로지 처리 기능은 3장에서 자세히 설명하였다.

2.3 발전력 재수립

발전력 재수립은 상정고장의 효과에서 발생하는 유효전력 불균형을 재분배한다. 전력의 불균형을 맞추기 위해 필요한 조정은 발전기 최대출력 및 참여계수와 일련의 규칙에 따라 발전기에 할당된다. 본 연구에서 사용되는 발전력 재분배 방법은 다음과 같이 3가지 방법을 사용한다.

방법1) 개별 발전기 출력 변화량 = 유효전력 불균형값 * 개별 발전기 최대출력 / 전체발전기 최대출력 (1)

방법2) 개별 발전기 출력 변화량 = 유효전력 불균형값 * 개별 발전기 참여계수 / 전체발전기 참여계수 (2)

방법3) 기준(Slack) 발전기 출력 변화량 = 유효전력 불균형값 (3)

방법 1)과 방법 2)는 유효전력 불균형값을 개별 발전기에 분배하는 메커니즘은 동일하나 발전기 참여계수가 계산되지 못할 경우(경제급전 프로그램의 오류 발생)는 자동으로 방법 1을 사용하게 된다. 또한 사용자가 상정고장 계산값을 PSS/E와 비교할 경우에는 방법 3)을 선택한다.

2.4 상정고장 스크리닝 및 자동선택

EMS의 계통해석 수행주기 내에 모든 상정고장을 완전해석 하기 힘들기 때문에 상정고장 스크리닝을 수행한다. 일반적으로 상정고장 스크리닝은 하나의 상정고장에 대해 토폴로지 처리를 후 1회 Iteration 조류계산의 결과를 이용하여 스크리닝을 수행한다. 스크리닝은 다양한 지수를 이용하여 모든 상정고장에 대해 우선순위를 부여한다. 가장 일반적으로 사용되는 Performance Index[6]는 다음과 같다.

$$J(P) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{m} \left(\frac{|P_j|}{P_j} \right)^m \quad (4)$$

여기서, P_j 는 선로에 흐르는 유효전력, $|P_j|$ 는 선로의 정격용량, n 은 선로개수, m 은 PI의 차수이다. 모든 상정고장에 대해 식 (4)를 이용해서 PI인덱스를 사용하기 때문에 DC 조류계산 및 Fast Decoupled 조류계산 방식이 많이 사용된다. 또한 사용자는 높은 우선순위를 갖는 상정고장 및 Must Run으로 설정된 설비에 대해 완전 해석을 수행한다. K-EMS 상정고장해석의 스크리닝 처리 기능은 4장에서 자세히 설명하였다.

2.5 완전해석 및 조건부 상정고장 처리

완전해석 기능은 상정고장이 계통에 미치는 효과에 관한

엄격한 검토를 수행한다. 이 기능은 연산시간이 길기 때문에 위의 자동선택에서 선정된 상정고장에 국한된다. 완전해석에서는 발전기, 변압기, 조상설비, SVC의 제어요소가 모두 포함된다. 조건부 상정고장은 사전에 정의된 고장이 발생 후 특정 지점에 감시 요소가 사용자가 설정한 값을 위반할 경우에만 추가적인 가상의 요소가 변경되도록 정의한다. 예를 들어 신서산~신안성 2회선 사고시 신용인의 모선 전압이 0.986 pu 이하로 떨어질 경우 추가적인 설비를 탈락시킨다. K-EMS 상정고장해석의 반복 조류계산 처리 기능은 4장에서 자세히 설명하였다.

2.6 위반 감시

감시 기능은 계통 구성요소가 사용자가 입력한 한계값을 위반하는지를 점검한다. 상정고장에 대해 상정고장 스크리닝 및 완전해석을 수행 후 위반 감시 여부를 확인한다. 위반 감시는 송전선로 위반, 전압 위반, 인터페이스 위반, 노드 간 위상차 위반으로 모델링할 수 있다. 전압 레벨별로 위반을 감시할 수 있도록 모델링되어 있다.

3. 토폴로지 처리 알고리즘

앞장에서 EMS 기반의 상정고장해석을 위해서는 고속의 토폴로지 처리 알고리즘의 필요성을 언급하였다. 변전소 부스바(Busbar)를 이루고 있는 차단기 및 단로기의 조작에 따라 발생 가능한 토폴로지 조합은 매우 많다. 본 논문에서는 고속의 상정고장해석을 위해 효율적인 알고리즘을 제안하였다.

3.1 EMS 계통해석용 토폴로지 프로세서

상정고장해석을 위한 토폴로지 처리 방식을 위해서는 일반적인 토폴로지 처리 방식에 대한 이해가 필요하다. 그림 3은 ACM 기반의 토폴로지 처리를 위한 시험계통이며, 그림 4는 시험계통을 ACM 형태로 나타내고 있다. K-EMS의 토폴로지 해석 프로그램(Topology Processor)의 모션 생성 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1) 토폴로지 처리를 위해서는 설계된 데이터베이스(ACM)의 구조를 확인한다[X]. 그림 4와 같이 노드와 차단기간의 연결정보가 가장 중요하며 해당 설비간의 정보는 Head/Sibling Index로 연결되어 있다.

단계 2) 노드의 Head Index를 이용하여 노드에 연결된 차단기로 이동한다. 해당 노드는 신규 모선에 할당한다.

단계 3) 차단기의 상태가 닫혀있을 경우 반대쪽 노드를 위에서 생성된 동일한 모선에 할당 후 단계 5)로 이동한다.

단계 4) 차단기의 상태가 열려있을 경우는 단계 2)로 이동 후 다음 노드에 대해 작업한다.

단계 5) 차단기의 Sibling Index가 Zero가 아니면 단계 3)와 4)에 대해 동일한 작업을 수행한다.

단계 6) 차단기의 Sibling Index가 Zero면 단계 2)로 이동 후 다음 노드에 대해 동일한 작업을 수행한다.

제안된 과정을 통해 시험 계통의 토폴로지 처리는 모션 1-노드 그룹(1, 5, 7, 6, 8, 4), 모션 2-노드 그룹(2, 3)으로

결정된다. 그림 3에서 보듯이 투입된 차단기에 의해 연결된 모든 노드를 그룹으로 분류 후 각 그룹을 하나의 모선으로 정의(Node-Bus Mapping, NBM)한다. 동적인 모선 모델은 차단기 상태에 의해 결정되므로 2개 이상의 모선으로 분리 및 2개 이상의 모선이 합쳐서 하나의 모선으로 변경이 가능하다는 점에 주의해야 한다.

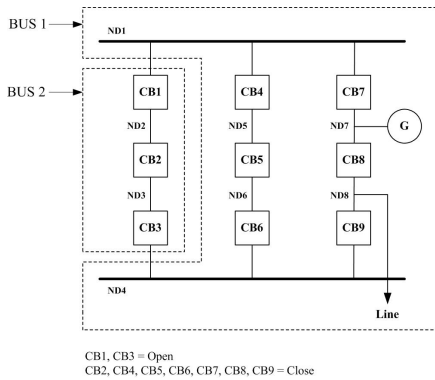


그림 3 토폴로지 처리 시험 계통
Fig. 3 Test system for topology processing

Table Name: Node

Name	Head Index(=NB)	Head Index(=UI)	Head Index(=FCB)	Head Index(=TCB)
ND1	0	0	1	0
ND2	0	0	0	0
ND3	0	0	0	0
ND4	0	0	0	3
ND5	0	0	0	0
ND6	0	0	0	0
ND7	0	1	0	0
ND8	1	0	0	0

Table Name: Circuit Breaker

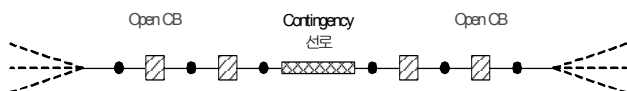
Name	Indirect Index(from FCB)	Indirect Index(from TCB)	Sibling Index(from FCB)	Sibling Index(from TCB)	Status
CB1	1	2	4	0	Open
CB2	2	3	0	0	Close
CB3	3	4	0	6	Open
CB4	1	5	7	0	Close
CB5	5	6	0	0	Close
CB6	6	4	0	9	Close
CB7	1	7	0	0	Close
CB8	7	8	0	0	Close
CB9	8	4	0	0	Close

그림 4 계통시험 계통(그림 3)의 ACM 데이터
Fig. 4 ACM data for test system (Fig. 3)

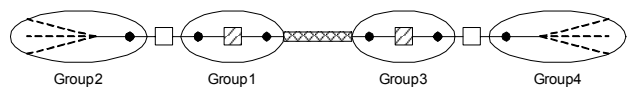
3.2 상정고장해석용 토폴로지처리 해석 알고리즘

다음과 같은 예제 계통을 통해 상정고장해석을 위한 토폴로지 처리 알고리즘을 제안하였다.

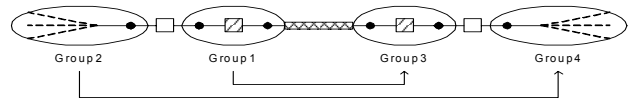
단계 1) 상정고장 대상(송전선로, 변압기, 발전기, 부하 등)을 확인 후 송전선로 양단의 CB를 탐색 후 해당 CB를 개방한다.



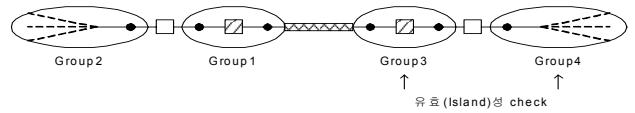
단계 2) 상정고장 양단의 변전소에 대해 위에서 언급한 NBM을 수행한다. NBM 수행 후 생성된 Group에 임시의 모선 번호를 부여한다.



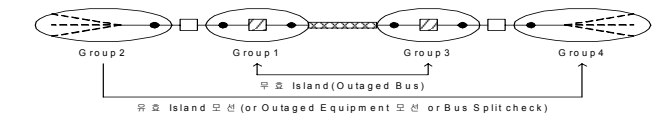
단계 3) 생성된 모선을 이용하여 생성된 모선과 기존 모선간의 토폴로지 측면에서의 연관관계를 탐색한다.



단계 4) 생성된 모선의 유효성을 체크한다. 기존 모선에 연결된 신규 모선은 유효성이 확보된다. 만약 신규 모선들이 신규의 독립계통(Island)을 생성한 경우는 신규 독립계통의 유효성을 검사한다.



단계 5) 유효성 검사 후 유효한 신규모선에 대해서는 모선번호를 부여하며, 각 유효 독립계통에 대해 모선 타입을 결정한다.



-정지된 모선: 무효한 독립계통에 속해 있는 모선으로 이 모선에 연결된 설비는 정지된(Outage) 설비로 처리됨

-편단 모선: 유효한 독립계통에 속해 있는 모선이나 이 모선에 연결된 설비 중 일부가 전기적으로 고립됨 (De-energized)

-신규 모선: 유효한 독립계통에 속해 있는 모선으로 상정고장 상황 이전에는 없던 새로 추가된 모선

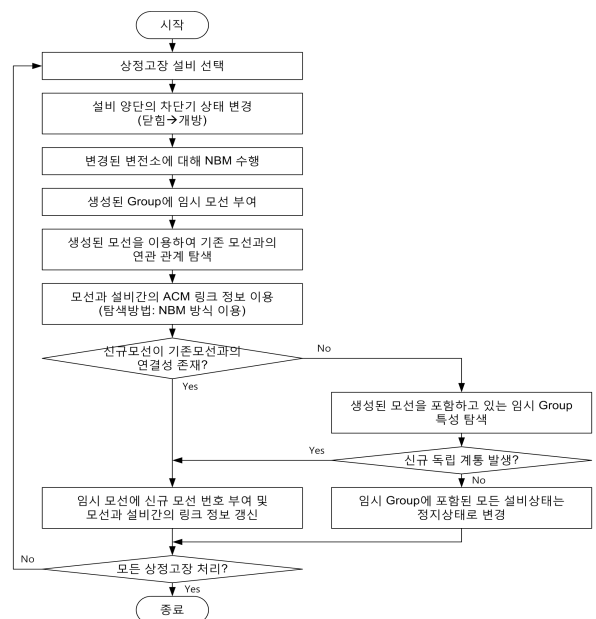


그림 5 토폴로지 처리의 전체적인 순서도
Fig. 5 Overall flowchart of contingency topology processing

그림 5는 위에서 설명된 단계를 전체적인 순서도로 나타내고 있다. 그림 6는 차단기 스위칭에 따른 상정고장 영향 분석을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 상정고장 전의 변전소 단선소이다. 그림 6(a)에서 345측에 있는 #7372 차단기가 개방되어 있어도 변압기(MTR#2)는 정상적으로 운전될 수 있

다. 상정고장을 고령T/L 1회선으로 가정한다면 그림 6(b)와 같이 차단기 #7371과 #7300으로 개방해야 한다. 이와 같이 운전된다면 변압기(MTR#2)는 편단된 설비로 분석되며 변압기에 흐르는 조류는 매우 적으며, 영향받는 변압기로 인해 해당 부근의 조류계산 결과는 상정고장 전후에 많은 차이를 나타낸다. 실제통에서는 그림 6의 일부 설비의 편단뿐만 아니라 신규 독립계통의 생성 및 일부변전소에 속한 모든 설비의 정지같은 현상이 발생한다. 본 논문에서 제안된 데이터베이스를 기반으로 설비의 변경 여부를 판단하는 알고리즘은 다양한 토폴로지 특성을 해석할 수 있다.

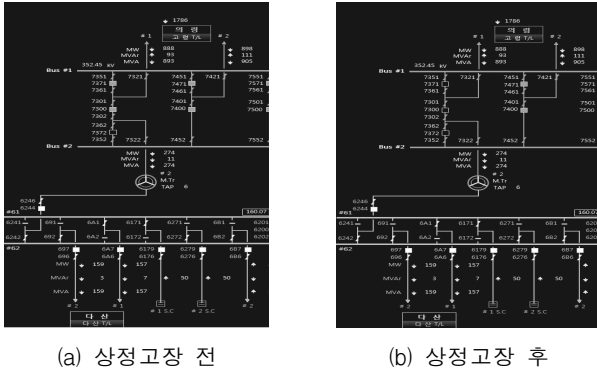


그림 6 차단기 스위칭에 따른 상정고장 영향 분석
Fig. 6 Effect of contingency analysis due to CB switching

4. 상정고장 스크리닝 및 반복 조류계산 처리 알고리즘

상정고장해석에서 조류계산은 수많은 반복 연산을 수행한다. K-EMS 상정고장 스크리닝에서는 1회 반복연산 후 제안된 지수를 이용하여 위반 정도를 평가한다. 심각한 상정고장에 대해서는 완전해석을 통해 해당고장에 대해 자세히 분석한다.

4.1 상정고장 스크리닝

일반적으로 빠른 상정고장 스크리닝을 위해서 DC 조류계산 또는 Fast Decoupled 조류계산을 이용한다. 본 연구에서는 빠르고 정확한 스크리닝을 위해 Full Decouple 조류계산을 이용해 스크리닝을 수행하였다. 상정고장 스크리닝을 위해 계통의 위반 요소를 모델링 후 해당 요소의 위반정도를 지수로 계산하였다. 우선 계통의 위반 요소는 4개(송전선로/변압기, 전압, 인터페이스 선로, 노드간 위상차)로 구분하여 모델링하였다. 그림 7은 각각의 모델에 대해 위반 여부를 체크하는 기준을 나타낸다.

상정고장의 위반 여부는 식 (5)에 따르며, 수식에서 V_a 는 조류계산 후 구성요소의 현재값(actual value)이며, V_l 은 구성요소의 기준값(limit value)이다.

$$Violation = \frac{V_a - V_l}{V_l} \quad (5)$$

식 (5)를 바탕으로 본 논문에서 제안한 상정고장 스크리닝을 위한 최종적인 수식은 다음과 같다.

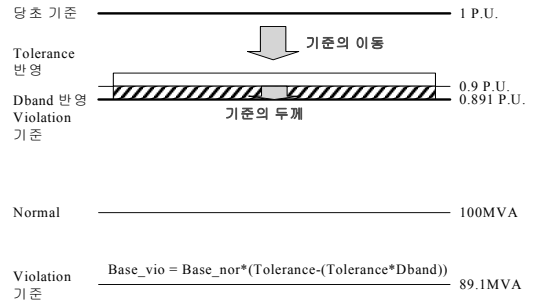


그림 7 상정고장 위반 검사 기준
Fig. 7 Condition of violation check

$$Cost_{Total} = Cost_{Branch} + Cost_{Volt} + Cost_{Nodepair} + Cost_{Interface}$$

$$Cost_{Branch} = W_{kV} \left(W_{BR} \frac{BR_a - BR_l}{BR_l} \right)$$

$$Cost_{Volt} = W_{kV} \left(W_{BSB} \frac{BSB_a - BSB_l}{BSB_l} \right) \quad (6)$$

$$Cost_{Nodepair} = W_{kV} \left(W_{NP} \frac{NP_a - NP_l}{NP_l} \right)$$

$$Cost_{Interface} = W_{kV} \left(W_{IL} \frac{IL_a - IL_l}{IL_l} \right)$$

여기서, W_{kV} 는 공칭 전압별 가중치이다. W_{BR} , W_{BSB} , W_{NP} 및 W_{IL} 은 송전선로/변압기, 전압, 노드간 위상차 및 인터페이스 선로의 감시 대상 설비별 가중치이다. BR, BSB, NP, IL은 각각 선로/변압기, 모선전압, 위상차, 용통선로를 나타낸다. 첨자 a, l은 각 감시요소의 기준치 및 상정고장 후 계산된 조류계산(Post contingency value) 값이다. 본 제안된 식에서 BR/IL은 유효전력 상한치, NP는 위상차 최대치에 대해서 감시한다. 그러나 BSB는 모선전압 상한치, 모선전압 하한치, 전압강하분에 대해서 계산한다. BSB의 경우 다른 3개의 감시요소보다 위반비용(Cost)에 더 많은 영향을 미친다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 사용자의 요구에 의해 전체 위반 비용으로 상정고장 스크리닝을 수행할 수 있으며, 각각의 감시요소에 대해 상정고장 스크리닝 지수를 계산할 수 있다. 본 연구의 상정고장 스크리닝은 다음과 같은 절차로 수행된다.

단계 1) 상태추정 결과에 대해 Basecase 조류계산을 수행한다. 변압기, 조상설비의 제어요소는 Basecase 조류계산에서 수행되지 않는다.

단계 2) 상정고장에 대해 토폴로지 해석을 수행 후 유/무효 모션들을 검사한다.

단계 3) 조류계산 결과와 토폴로지 해석 결과를 이용하여 1회 반복 조류계산을 수행한다.

단계 4) 식 (6)의 수식을 이용하여 상정고장 위반 비용을 계산한다.

단계 5) 모든 상정고장에 단계 2)에서 단계4)를 반복 수행 후 상정고장 위반 비용에 대해 정렬한다. 심각한 사고리스트를 완전해석에 전달한다.

상정고장 스크리닝 해석을 위해 제안된 절차에서 조류계산은 수많은 연산을 수행한다. 특히 각각의 상정고장마다

토폴로지 해석을 수행하기 때문에 모선 구조가 상정고장에 따라 변경한다. 본 연구에서는 빠른 연산을 위해 조류계산은 자코비안을 부분적으로 갱신 후 계산하는 방식을 사용하였다.

4.2 반복 조류계산 기반의 상정고장해석

상정고장해석은 토폴로지 처리와 조류계산의 반복으로 수행되므로 빠른 조류계산은 필수적이다. 그림 8은 본 연구에서 개발된 상정고장해석의 전체적인 순서도를 나타낸다. 그림 8의 상정고장해석은 3개의 모듈로 구성되어 있으며 각 모듈의 특성은 다음과 같다.

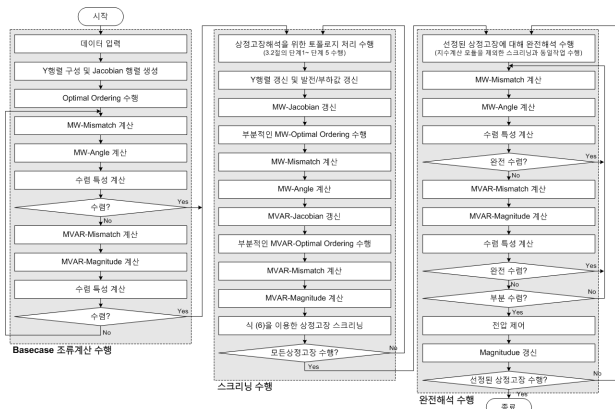


그림 8 상정고장해석의 전체적인 순서도
Fig. 8 Overall flowchart of the developed program

- Basecase 조류계산 모듈: 상태추정 결과를 이용하여 조류계산을 수행, Mw-Angle과 Mvar-Magnitude 부분으로 분리하여 계산, 변압기/조상설비의 제어요소는 동작하지 않음, 발전기 단자전압과 유효전력만을 고정하고 계산
- 스크리닝 모듈: 토폴로지 처리 부분과 조류 계산 부분으로 구성, 상정고장에 따른 토폴로지 특성 분석, 조류계산은 1회만 수행 후 위반정도 평가
- 완전해석 모듈: 스크리닝 모듈과 제어요소가 포함된 조류계산 수행 모듈을 모두 포함하고 있음, 위험한 상정고장으로 판정된 사고에 대해 자세히 분석

상정고장해석 빠른 연산을 위해서는 부분적인 갱신을 이용한 조류계산은 매우 중요하다 [10, 11]. 본 연구에서 사용하는 부분적인 갱신의 전체적인 순서도는 그림 9와 같다. 본 연구에서 사용한 부분적인 갱신을 이용한 반복 조류계산은 상정고장 스크리닝 및 완전해석에 사용되며 상정고장해석의 연산속도를 줄이는 가장 큰 요인중에 하나이다.

5. 사례 연구

본 논문에서는 개발된 상정고장해석 프로그램의 유용성을 검증하기 위해 시험 계통 및 전 계통에 대해 시험하였다. 시험 계통의 모의를 통해 개발된 알고리즘(토폴로지 처리 및 조류계산)의 정확성을 검증하였으며, 전 계통의 모의를 통해 개발 프로그램의 속도 및 EMS에 탑재가 가능한지를 검증하였다.

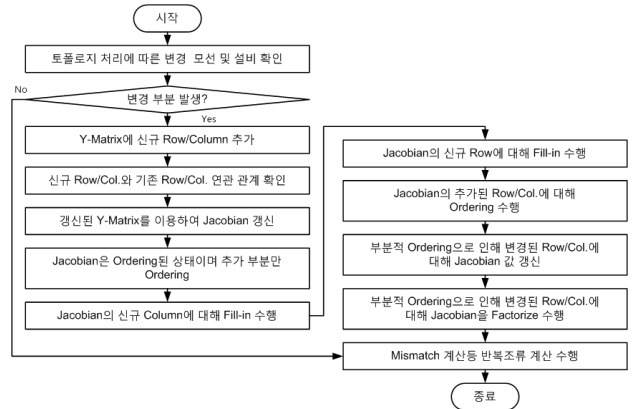


그림 9 부분적인 갱신을 통한 반복 조류계산
Fig. 9 Powerflow program using partial updating method

5.1 시험 계통

그림 2의 상정고장해석을 위한 시험 계통의 특징은 다음과 같다.

- K-EMS 계통 모델에 사용되는 모든 설비(발전기, 부하, 조상설비, SVC, 송전선로, 변압기, 영임피던스 선로)로 구성되어 있다.
- 자세한 토폴로지 해석이 가능하도록 차단기와 단로기의 구조로 구성되어 있다.
- 3권선 변압기가 2권선 변압기 3대로 모델링 되었다.
- 조상설비(Capacitor/Reactor) 및 SVC가 모델링 되었다.
- 모든 데이터는 CSV 파일구조를 사용하여 모의하였다.

본 연구에서 설계된 시험계통을 이용하여 상정고장해석 프로그램의 성능을 평가하였다. 표 1은 상정고장해석 모의 시나리오이다.

표 1 시험 계통 모의 시나리오

Table 1 Summary of scenarios for test system

시험 번호	시험 항목	설명	검증 방법
5.1.1	Basecase 해석	조류계산 결과 검증	PSS/E
5.1.2	토폴로지 처리	선로고장 처리 기능 (다른설비 영향 無)	이론적 결과
5.1.3		부하 탈락 처리 기능 (다른설비 영향 有)	
5.1.4	완전 해석	전압제어 기능	PSS/E

5.1.1 Basecase 해석

본 시나리오는 개발된 조류계산과 PSS/E 결과 비교를 통해 개발된 조류계산의 유용성을 검증하는 것이다. 그림 2에서 모든 차단기/단로기의 상태는 모두 닫힘으로 설정 후 토폴로지 프로세서를 수행한다. 수행결과 모선은 10개 생성되며 모든 설비는 투입되어 있다. 발전기 모선은 1, 9번, 부하 모선은 2번 10번으로 할당되었다. 두 대의 발전기는 Local로 설정되어있다. Local 모드는 발전기 단자 전압 제어를 의미한다.

표 2 시나리오 5.1.1에 대한 조류계산 결과 비교

Table 2 Result of powerflow for scenario 5.1.2

모선 번호	전압 크기			전압 위상각		
	K-EMS	PSS/E	차이	K-EMS	PSS/E	차이
1	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.99439	0.99435	0.00004	-1.43456	-1.43450	0.00006
3	0.99439	0.99435	0.00004	-1.43456	-1.43450	0.00006
4	0.99366	0.99362	0.00004	-1.49102	-1.49100	0.00002
5	0.99711	0.99707	0.00004	-1.18067	-1.18070	0.00003
6	0.99439	0.99435	0.00004	-1.43456	-1.43450	0.00006
7	0.99807	0.99804	0.00003	-1.09179	-1.09180	0.00001
8	0.99807	0.99804	0.00003	-1.09179	-1.09180	0.00001
9	1.00000	1.00000	0.00000	-0.46554	-0.46550	0.00004
10	0.99317	0.99313	0.00004	-1.51860	-1.51860	0.00000

표 2는 기본해에 대한 K-EMS와 PSS/E의 결과를 나타내고 있다. 결과 비교를 통해 K-EMS와 PSS/E의 조류계산 결과는 매우 유사하다. 표 2에서 모선 2, 3, 6은 영 임피던스 선로로 연결되어 있기 때문에 동일한 전압이 계산된다. 본 연구에서는 영 임피던스 선로로 연결된 모선은 1개의 모선으로 간주하여 계산한다.

5.1.2 토폴로지 처리: Branch(송전선로/변압기) 탈락

그림 2에서 모든 차단기/단로기의 상태는 모두 닫힘으로 설정 후 토폴로지 프로세서를 수행한다. 수행결과 모선은 10개 생성되며 모든 설비는 투입되어 있다. 본 시나리오에서는 선로 1을 상정고장으로 선정하였다. K-EMS 상정고장 해석은 우선 CB #13, 34, 37을 개방 후 NBM을 수행한다. 선로 1 개방으로 인해 인근 설비 및 모선 구조에 영향을 미치지 않음을 판정한다. 토폴로지 처리 결과는 이론적 결과와 동일하다.

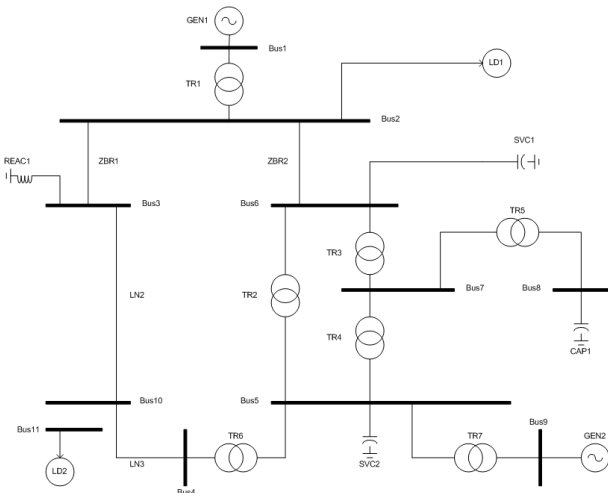


그림 10 토폴로지 처리 후 모선 결과
Fig. 10 Hierarchy common database structure

5.1.3 토폴로지 처리: Injection(발전기/부하/조상설비) 탈락

그림 2의 차단기 #40을 제외한 모든 차단기 및 단로기의 상태는 모두 닫힘으로 설정 후 토폴로지 프로세서를 수행한다. 수행결과 모선은 10개 생성되며 모든 설비는 투입되어 있다. 본 시나리오에서는 선로 1을 상정고장으로 선정하였다. K-EMS 상정고장 해석은 우선 CB #13, 34, 37을 개방 후 NBM을 수행한다. 그림 10은 토폴로지 처리 후 모선 구조를 나타내고 있다. NBM으로 인해 모선 #11이 생성되었으며, 부하 #2가 새롭게 생성된 모선에 연결되어 있다. 또한 모선의 유효성 검사 결과 해당 모선 및 설비는 정지설비로 판정된다. 부하가 탈락하기 때문에 조류의 방향은 많은 변화를 나타낸다.

5.1.4 완전 해석: 전압제어

본 시나리오의 모의 조건은 발전기 전압제어 모드를 제외한 모든 조건은 Basecase 수행과 동일하다. 모선#1에 연결된 발전기#1는 Local모드로 설정, 모선#9에 연결된 발전기#2는 Remote로 설정되어 있다. Remotel 모드는 발전기 단자 전압을 제어하지 않고 발전기 모선에서 떨어져있는 모선을 제어한다. 본 시나리오에서는 발전기#2는 모선#5를 제어로 설정되어 있다.

표 3 시나리오 5.1.5에 대한 조류계산 결과 비교

Table 3 Result of powerflow for scenario 5.1.5

모선 번호	전압 크기			전압 위상각		
	K-EMS	PSS/E	차이	K-EMS	PSS/E	차이
1	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	1.00000	1.00000	0.00000	-1.17905	-1.17900	0.00005
9	1.00496	1.00499	0.00003	-0.46951	-0.46950	0.00001

표 3는 완전해석 대한 K-EMS와 PSS/E의 결과를 나타내고 있다. 결과 비교를 통해 K-EMS와 PSS/E의 조류계산 결과는 매우 유사하다. 발전기#2가 제어하는 모선#5의 전압은 두 프로그램이 매우 유사하다.

표 4 전 계통 모의 시나리오

Table 4 Summary of scenarios for KEPCO system

시험 번호	시험 항목	설명	검증 방법
5.2.1	Basecase 해석	조류계산 결과 검증	PSS/E
5.2.2	토폴로지 처리	대규모 설비 탈락 처리 기능	이론적 결과
5.2.3	스크리닝	제안된 지수를 이용한 스크리닝 처리 기능	-
5.2.4	완전 해석	전압제어 기능	PSS/E
5.2.5	조건부 상정고장	조건부 상정고장 해석	-
5.2.6	연산 속도	상정고장해석 연산속도	-

5.2 전 계통

전 계통에 대한 상정고장해석 프로그램의 성능을 검증하기 위해 본 연구에서는 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째, K-EMS Prototype 시스템에 설치하여 개발프로그램의 성능을 사용하여 검증하였다. 둘째, K-EMS Prototype 시스템의 데이터를 CSV 파일 형태로 내려 받아 오프라인 환경에서 검증하였다. 본 연구에서 사용한 두 가지 방법에 대한 결과는 동일하며, 단지 검증환경이 윈도우 기반과 유닉스 기반의 차이이다. 표 4는 본 논문에서 사용한 전 계통에 대한 상정고장해석 모의 시나리오이다.

5.2.1 Basecase 해석

본 시나리오의 목적은 대규모 계통에 대해 K-EMS와 PSS/E의 조류계산 성능 비교를 통해 개발된 상정고장해석 프로그램의 유용성을 검증한다. 본 시나리오는 Basecase 조류계산이므로 변압기 및 조상설비의 제어는 수행하지 않는다. PSS/E 데이터는 상정고장해석 프로그램의 변환프로그램을 통해 생성된다. 그림 11은 345kV 모선에 대한 두 프로그램의 조류계산 결과를 나타낸다. PSS/E와 K-EMS는 0.0009 pu의 평균 오차를 갖으며, 모든 발전기의 단자 전압은 동일하다. 표 5는 수도권 345kV 모선의 조류계산 결과를 나타낸다.

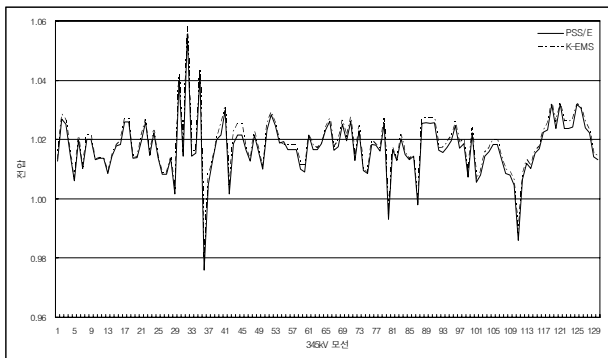


그림 11 345kV 모선에 대한 조류계산 결과

Fig. 11 Results of powerflow for 345kV

표 5 수도권 지역 345kV 모선의 전압 결과 비교

Table 5 Results of powerflow for 345kV in metropolitan area

모선명	K-EMS	PSS/E	차이	모선명	K-EMS	PSS/E	차이
의정부	1.0173	1.0157	0.0016	영서	1.0207	1.0195	0.0012
미금	1.0190	1.0173	0.0017	영등포	1.0276	1.0262	0.0014
양주	1.0211	1.0196	0.0015	곤지암	1.0140	1.0129	0.0011
중부	1.0262	1.0248	0.0014	화성	1.0066	1.0057	0.0009
성동	1.0189	1.0172	0.0017	신성남	1.0201	1.0184	0.0017
신가평	1.0090	1.0072	0.0018	서서울	1.0144	1.0134	0.0010
신덕은	1.0239	1.0223	0.0016	신용인	1.0099	1.0086	0.0013
동서울	1.0176	1.0163	0.0013	신안성	1.0062	1.0047	0.0015
신양재	1.0196	1.0177	0.0019	신수원	1.0079	1.0066	0.0013

5.2.2 토폴로지 처리: 대규모 설비 탈락

본 시나리오는 상정고장으로 인한 대규모 설비 탈락에 대한 토폴로지 처리 기능을 확인한다. 미금 변전소의 미금~화양 154kV 선로, 미금~광정 154kV 선로의 선로 고장에 대한 모의 하였다. 그림 12은 상정고장 발생 부근의 변전소 구조이다.

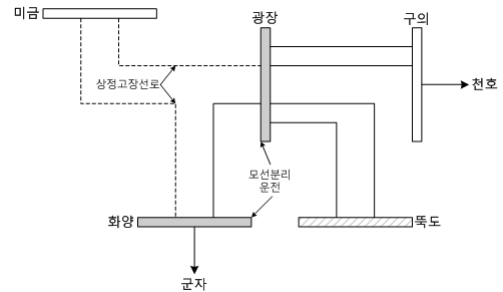


그림 12 미금변전소 인근의 모선 구조

Fig. 12 Bus structure of migum substation

그림 12에 대한 토폴로지 처리 결과 죽도 변전소의 모든 설비는 정지 상태로 설정된다. 그림 12에서 상정고장으로 선정된 선로 양단의 차단기를 개방하면 광장과 화양변전소가 모선분리 상태로 운전하고 있기 때문에 죽도 변전소는 전기적으로 고립상태로 설정되며 모든 설비는 정지 상태로 변경된다.

표 6 상정고장 스크리닝 결과

Table 6 Summary of contingency screening

순 위	상정 고장명	고장 유형	위반 Cost			토폴로지 해석 (주변설비 변경)
			Branch* (순위)	Volt (순위)	Final	
1	당진화12	765#2	511.83(1)	3609.00(1)	4120.83	No
2	신태백12	SPS	7.78(17)	1285.22(2)	1293.00	
3	신영신포	345#2	0.00(-)	1057.31(3)	1057.31	
4	신고성12	345#2	39.89(6)	510.64(4)	550.53	
5	동전주12	SPS	1.85(21)	411.06(5)	412.91	
6	신고고성	SPS	58.43(4)	162.53(7)	220.95	
7	신서산12	SPS	22.68(10)	187.75(6)	210.43	
8	당진T1	SPS	136.59(2)	43.54(21)	180.13	
9	대불12	SPS	46.09(5)	86.39(10)	132.48	
10	부산남부	154#2	66.61(3)	34.74(164)	101.34	

*Branch: 송전선로 및 변압기를 나타냄

5.2.3 상정고장 스크리닝 해석

본 논문에서는 기존 EMS에서 사용하고 있는 1978개의 상정고장에 대해 모의를 수행하였다. 상정고장은 12개의 그룹으로 구성되어있다 (765kV 1회선~2회선 고장, 345kV 1회선/2회선 고장, 154kV 1회선/2회선 고장, 345~154kV방사상계통 1회선고장, 발전기 단일고장, 765kV~345kV 1뱅크 고

장, 1회선고장시 대책방안적용선로, 2회선고장시 대책방안적용선로, MTR1 뱅크고장시 대책방안적용, 고장급방지시스템 적용선로). 표 5은 전체 상정고장에 대한 상위 10개의 스크리닝 결과를 나타낸다. 식 (6)을 이용하여 최종적인 위반 비용 순으로 정렬되어 있다. 식 (6)에서 공칭 전압별 WkV는 1.0으로 설정하였다. 감시 대상 설비별 가중치 WBR 및 WBSB는 1로 설정, WNP 및 WIL는 0으로 설정하였다. 인터페이스 및 노드간 위상차는 위반비용에서 제외하였다. 표 6은 신고성12 고장에 대한 자세한 위반 정보를 나타내고 있다. 신고성12 고장 발생시 선로 위반 정보에 대해 나타내고 있다. 표 7을 통해 전압 위반이 전체 위반 비용에 많은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Branch(송전선로/변압기)가 유효전력 상한치에 대해서만 감시하는 반면에 Volt(모선 전압)는 전압 상한치/하한치/전압강하의 3개 요소에 대해 감시하기 때문에 더 많은 영향을 반영한다.

표 7 신고성12 고장에 대한 자세한 위반 정보

Table 7 Violation information for contingency (sin-kosung 12)

번호	위반선로명	전압 레벨 (kV)	고장전 조류 (MW)	고장후 조류 (MW)	Emer. 용량 (MW)	위반Cost (%)
1	고성SS~진동SS	154	43.04	287.26	271.20	16.06
2	중리SS~신마산PO	154	52.21	268.79	234.00	34.79
3	중리SS~신마산PO	154	52.21	268.79	234.00	34.79
4	중리SS~가야SS	154	40.14	238.95	234.00	4.95
5	중리SS~가야SS	154	40.14	238.95	234.00	4.95

5.2.4 완전 해석

전 계통에 대한 완전해석 기능을 검증하기 위해 신제천~곤지암 북상선로에 대한 고장 발생시 결과를 PSS/E와 비교하였다. 해당 사고 발생시 주변 설비의 탈락은 발생하지 않는다.

표 8은 북상선로 고장 발생시 수원 및 제천 전력관리처에 속한 345kV 모선 전압을 나타낸다. 표 7를 통해 북상선로 양단 전력관리처의 모선 전압이 PSS/E와 K-EMS가 유사함을 알 수 있다. 표 9는 해당고장에 대한 발전기 단자전압을 나타내고 있다. 북상조류 고장으로 인해 발전기 단자전압은 무효전력 범위 내에서 목표 전압을 제어하지 못하고 무효전력이 가능한 최대 범위에서 전압을 계산한다. 두 프로그램은 동일하게 11개의 발전기가 목표전압을 제어하지 못하고 무효전력이 가능한 범위내에서 단자전압을 계산하였다.

5.2.5 조건부 상정고장 처리

본 논문에서는 신태백12 고장에 대한 조건부 상정고장에 대해 모의하였다. 신태백12 고장시 동서울 변전소의 모선 전압이 임의의 한계값 이하로 떨어지면 지정된 발전과 부하를 탈락시킨다. 조건부 상정고장 처리를 사용하지 못할 경우 완전해석에서 조류계산은 수렴에 도달하지 못한다.

표 8 북상선로 고장에 따른 345kV 모선의 전압 결과

Table 8 Result of 765kV buses for interface line contingency

모선명	수원전력관리처			제천전력관리처			
	K-EMS	PSS/E	차이	모선명	K-EMS	PSS/E	차이
곤지암	1.0059	1.0071	0.0012	청원	1.0167	1.0175	0.0008
화성	1.0137	1.0139	0.0002	동해	1.0343	1.0349	0.0006
신성남	1.0174	1.0175	0.0001	신제천	1.0250	1.0266	0.0016
서서울	1.0176	1.0171	0.0005	신진천	1.0121	1.0130	0.0009
신용인	1.0075	1.0079	0.0004	신태백	1.0193	1.0201	0.0008
신안성	1.0051	1.0051	0.0000	양양	1.0411	1.0416	0.0005

표 9 북상선로 고장에 따른 발전기 단자 전압 결과

Table 9 Result of plant buses for interface line contingency

모선명	목표전압 (A)	K-EMS (B)	PSS/E (C)	차이 (A-B)	차이 (A-C)
무림	0.9948	1.0191	1.0201	0.0243	0.0253
주암	1.0000	1.0432	1.0473	0.0432	0.0473
여수	0.9962	1.0521	1.0599	0.0559	0.0637
목동	0.9888	1.0157	1.0146	0.0269	0.0258
고리	1.1028	1.0720	1.0747	0.0308	0.0281
팔당	1.0000	1.0212	1.0214	0.0212	0.0214
팔당	0.9997	1.0211	1.0213	0.0214	0.0216
노원	1.0375	1.0282	1.0289	0.0093	0.0086
수원TP	1.0404	1.0297	1.0300	0.0107	0.0104
KG에너지	0.8925	0.9912	1.0177	0.0987	0.1252
포스코	1.0000	1.0091	1.0093	0.0091	0.0093

표 10 조건부 상정고장에 따른 765kV 모선의 전압 결과

Table 10 Result of 765kV buses for cascading contingency

모선명	모선 전압					
	조건부 상정고장 처리 無				조건부 상정고장 처리 有	
	고장 전		고장 후		고장전	고장후
	K-EMS	PSS/E	K-EMS	PSS/E		
신가평	0.9662	0.9647	발산	발산	0.9662	0.9514
신태백	0.9753	0.9738			0.9753	1.0026

표 10은 신태백12 고장 발생시 조건부 상정고장 처리 결과를 나타낸다. 표 9를 통해 조건부 상정고장 처리를 못한 경우는 발산함을 알 수 있다. PSS/E를 이용해서는 조건부 상정고장 처리가 불가능하다.

5.2.6 상정고장해석 연산속도

표 11은 개발된 상정고장 해석 프로그램의 연산속도를 나타내고 있다. 상정고장 개수는 1978개이며 완전해석 개수는 200개이다.

표 11 상정고장해석 프로그램의 연산속도

Table 11 Computational speed of contingency analysis

연산 프로세서*	시간(sec)
Basecase 수행	0.078
토폴로지 처리 및 상정고장 스크리닝 수행	17.172
완전해석 수행	5.609

*모의 환경: Intel(R) Xeon(R) CPU 2.33GHz, 2.0GB RAM

6. 결 론

본 논문은 K-EMS의 계통해석을 위해 상정고장해석 프로그램의 알고리즘 및 다양한 기능을 소개하였으며 각각의 기능은 PSS/E 및 기존 EMS 결과와 비교하였다. 개발된 프로그램은 Basecase 수행, 토폴로지 및 상정고장 스크리닝, 완전해석 수행으로 구분되어있다. 토폴로지 처리 기능은 토폴로지에 변경을 야기하는 상정고장의 전기적 모션 및 설비 탈락을 판단하며, 상정고장 스크리닝은 수많은 상정고장 개수에서 심각한 사고를 필터링한다. 본 논문에서 제안된 토폴로지 처리 방법, 상정고장 스크리닝 지수 및 빠른 조류계산 방법은 EMS의 상정고장해석 프로그램에 적용할 수 있음을 나타내고 있다. 개발된 프로그램의 유용성을 검증하기 위해 10모션 시험계통 및 전계통에 대해 다양한 시험 모의 조건을 사용하여 검증하였다.

향후에는 상정고장해석 프로그램을 안정도 해석 프로그램과의 연계에 관한 연구 및 빠른 연산을 위한 패턴인식 방법을 이용한 해석에 관한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] F. F. Wu, K. Moslehi, and A. Bose, "Power system control center: Past, Present, and Future," Proc. IEEE, vol. 93, no. 11, pp. 1890-1908, Nov. 2005.

[2] R. Qiantu, H. Guangyu, M. Shengwei, and L. Qiang, "Advanced EMS and its application to shanghai power grid," in Proc. IEEE Int. Conf. Electro/Information Technology, Chicago, IL, May. 2007, pp. 312-317.

[3] Y. Liao, "Interface paradigms in energy management system," in Proc. IEEE Southeastcon, Huntsville, Alabama, Apr. 2008, pp. 485-490.

[4] F. Maghsoodlou, R. Masiello, and T. Ray, "Energy management systems," IEEE Power Energy, vol. 2, no. 5, pp. 49-57, Sep/Oct. 2004.

[5] G. C. Ejebe, B. F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS-98, no. 1, pp. 97-109, Jan./Feb. 1979.

[6] G. D. Irisarri, A. M. Sasson, "An Automatic Contingency Selection Method for On-line Security Analysis", IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS-100, no. 4, pp. 1838-1844, Apr. 1981.

[7] M. K. Enns, J. J. Quada, B. Sackett, "Fast Linear Contingency Analysis", IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS-101, no. 4, pp. 783-791, Apr. 1982.

[8] S. Vemuri, R. E. Usher, "On-line Automatic Contingency Algorithm", IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS-102, no. 2, pp. 346-354, Feb. 1983.

[9] I. Dabbaghchi, G. D. Irisarri, "AEP Automatic Contingency Selector: Branch Outage Impacts on Load Bus Voltage Profile", IEEE Trans. Power Syst., vol PWRS-1, no. 2, pp. 37-44, May 1986.

[10] W. F. Tinney, J. W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proc IEEE, Vol. 55, no. 11, pp. 1801-1809, Nov. 1967.

[11] W. F. Tinney, W. S. Meyer, "Solution of Large Sparse Systems by Ordered Triangular Factorization", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 18, no. 4, pp. 333 - 346, Aug. 1973.

저 자 소 개



조 윤 성 (趙尹晟)

1977년 7월 5일생. 2008년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원.

E-mail : yscho1@lss.biz



윤 상 윤 (尹尙潤)

1970년 8월 28일생. 2002년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2003-2009년 LS산전 전력연구소 책임연구원. 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 책임연구원.

E-mail : syyun@kepri.re.kr