

실용적 접근 기반의 전력계통 해석 프로그램 상정고장, 해소방안 자동화 기법: 휴전검토 자동화 툴 개발

A Study on Methodology for Automated Contingency and Remedial Action Analysis based on Practical Approach: Development of Automated Scheduled Outage Analysis Tool

송 지 영[†] · 고 백 경* · 신 정 훈* · 한 상 옥* · 남 수 철* · 이 재 걸* · 김 태 균*

(Jiyoung Song · Baekkyung Ko · Jeonghoon Shin · Sangwook Han · Suchul Nam · Jaegul Lee · Taekyun Kim)

Abstract - ISO(Independent System Operator) or TSO(Transmission System Operator) use power system analysis program to simulate contingency analysis and remedial actions to operate power system stably. Generally, power system analysis program provides automated analysis functions(or modules) to deal with wide area power system. However, because of missed contingency cases, automated contingency analysis has no practical use or has limitation. And in case of remedial action, it doesn't support automated function or takes a lot of times to study, because of simulation in manual for each cases. This paper suggests that new relation with buses and transmission line properties of power system DB used for power system analysis program to simulate automated contingency including all contingency cases needed in the field without missed cases. And it proposes automated remedial action scheme based on practical approach analysis to alleviate overloading or voltage problems. Finally it deals with automated contingency/remedial action analysis(automated scheduled outage) program which is developed by KEPCO and its performance and proposed schemes are proven by case study for real Korean power system data.

Key Words : PAZ, Remedial Action Analysis, Contingency Analysis, Scheduled Outage Analysis, Power System Analysis Program

1. 서 론

안정적인 전력계통 운영을 위해 계통운영자는 주기적으로 설비를 점검(휴전)하여야 하며, 휴전 중에 발생할 수 있는 계통 사고에 대비하여 다양한 상정고장을 모의하고 사전 대책을 수립해야 한다. 이러한 일련의 업무를 휴전검토라 하며, 국내에서는 연간 약 1,500건 정도의 휴전검토를 시행하고 있다[1]. 휴전검토는 일반적으로 “휴전설비 조작 → 인근 계통 상정고장 모의 → 과부하, 과/저전압 등 해소방안 수립”으로 이루어지며, 일반적으로 전력계통 해석 프로그램을 이용하여 검토한다[2]. 최근 한전에서 국산 전력계통 해석 프로그램(PAZ 3.0, Power system AnalyZer)을 개발 완료하여 관련 업무 활용 중에 있다[3].

전력계통 해석 프로그램에서는 대규모 계통의 상정고장을 단시간에 빠르게 모의하기 위해 상정고장 자동 모의 기능을 지원한다. 하지만 제공되는 자동 2회선 고장모의 기능은 대부분 모선분리, 편단개방 구성선로, II분기 등의 병행 2회선(N-2상정고장)고장 모의가 불가능하기 때문에, 현장에서 일반적으로 자동화 기능을 제한적으로 사용하거나, 자동화 기능을 사용하지 않고 직접 모든 케이스를 일일이 검토하고 있어, 계통 검토에 오랜 시간이 소요되고, 케이스 수립 시

누락되는 케이스가 발생할 우려가 있다. PSS/E등의 일부 프로그램은 IPLAN이나 PYTHON 등 사용자가 직접 프로그래밍할 수 있는 환경을 제공하지만, 고도의 프로그래밍 기술을 요하고 사용자 편의환경이 떨어지기 때문에 일반 사용자가 활용하기 매우 어렵다.

한편, 이렇게 상정고장 검토 중 과부하, 과/저전압 등이 발생하는 상정고장 케이스의 경우 이를 해소하기 위한 대책을 사전에 수립해놓아야 한다. 해석적 기반의 해소방안 도출에 관한 연구는 기존에 이루어져있지만, 국가별 계통의 특징, 전력시장 및 운영구조 등에 차이가 있어 해석적 접근방식의 도입이 어렵기 때문에, 현재 국내에서는 상정고장 케이스별로 개별적으로 접근하여 계통 검토자의 경험에 의존적으로 해소방안을 수립하고 있다. 하지만 이러한 개별적 경험적 접근 방식은 검토에 많은 시간이 소요되고, 최선의 해소방안을 수립하지 못할 수 있는 가능성을 내포하기 때문에 업무의 효율성이나 계통운영의 신뢰성 측면에서는 이를 시스템화(프로그램화, 자동화)할 필요가 있다[4].

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 전력계통 해석 프로그램 계통DB의 모선 간 관계, 송전선로 속성을 새롭게 제한하여, 모선분리, 편단개방 구성 선로 등에 대한 병행 2회선 고장 자동 모의를 포함하여 실무에서 검토하는 모든 상정고장의 자동화를 가능케 하였다. 또한 약 1,000여 건의 과거 해소방안 적용 사례를 분석하여 해소방안의 일반적인 그 특징을 도출하고, 실용적 접근 기반의 해소방안 자동화 기법을 제안하였다. 마지막으로 이러한 상정고장/해소방안 자동화 기능을 갖는 프로그램(휴전검토 자동화) 개발

[†] Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Korea.

E-mail: jysong@kepcoco.kr

* KEPCO Research Institute, Korea.

Received : June 23, 2014; Accepted : August 13, 2014

을 다루고 사례연구를 통해 제안된 기법의 효과와 신뢰성을 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 이러한 기법과 자동화 프로그램을 통해 계통 운영방안 수립, 휴전검토 등 계통 검토 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있으며, 계통 운영자는 해소방안 자동화를 통해 도출되는 다양한 해소방안을 이용하여 최적 운영 방안 수립을 가능케 함으로써 계통운영의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대한다.

2. 휴전검토 절차

2.1 상정고장 모의

특정 전력설비의 휴전 시에도 계통을 안정적으로 운영하기 위해서는 시장운영 규칙에서 정의하는 상정고장을 모의하고, 사고 시에도 일정 범위 내 운전 점을 확보해야 한다. 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 전력시장 운영규칙에서 정의하는 전압 유지범위는 아래 표 1과 같다. 송전선로, 변압기 부하율은 정상 시 100%이하로 운전하며, 고장 시 장시간 과부하를 발생시키지 않도록 규정하고 있다.

표 1 전압 유지범위

Table 1 Voltage operation range

기준전압(kV)	전압유지범위(kV)	
765	765 ± 5%	726~800
345	345 ± 5%	328~362
154	154 ± 10%	139~169

계통 검토 시 표 2와 같은 단일고장(N-1) 및 이중고장(N-2)을 모의하며, 계통 검토자는 계통 상황이나 검토 목적에 따라 선별적으로 검토한다.

표 2 단일, 이중고장의 정의

Table 2 Definition of single, parallel contingency

고장 종류	내용
단일고장	· 송전선 1회선, 변압기 1 Bank, 발전기 1기 고장 · 그밖에 고장 시 전력계통 운영에 영향을 미칠 수 있는 1개 설비의 고장
이중고장	· 송전선 1회선 + 변압기 1 Bank 고장, · 송전선 1회선 + 발전기 1기 고장 · 발전기 2기 탈락, · 병행 2회선 가공송전선로 고장 · 차단기의 차단실패 및 · 부분모선(Bus Section) 고장 · 그밖에 고장 시 전력계통 운영에 영향을 미칠 수 있는 2개 설비의 동시 고장

대규모 계통 검토 시 기존 전력계통 해석 프로그램의 상정고장 자동화 기능의 2회선 고장 자동 모의 기능은 그림 1과 같이 계통 운영상 발생하는 특징적인 2회선 상정고장 모의(모선분리 운전 개소, 편단개방 구성 선로, II분기)가 불가

능하며, 양단 모선 사이의 아주 작은 임피던스값을 갖는 선로 정보를 이용하여 PYTHON등 별도의 사용자 프로그램으로 탐색 자동화를 구현 하더라도 그림 2와 같이 양단 모선 간의 관계 정보가 없기 때문에 모선분리 개소를 구분하기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 이유로 아직까지 현장에서는 각각의 상정고장을 개별적으로 검토하거나 제한적으로 상정고장 자동화 기능을 활용하고 있다.

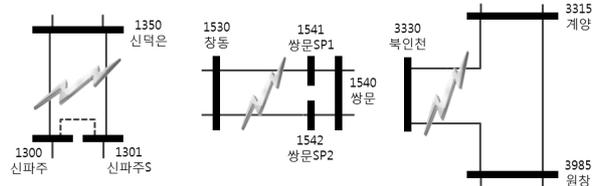


그림 1 모선분리, 편단개방, II분기의 2회선 상정고장 예시

Fig. 1 Split bus, One end open, IIsection parallel contingency

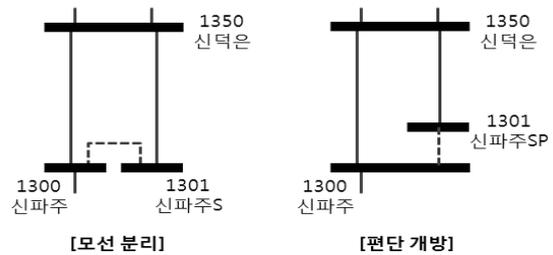


그림 2 동일한 계통 데이터로 표현되는 서로 다른 네트워크 구성

Fig. 2 Different network topology with same input data

2.2 해소방안 모의

상정고장을 모의하고 송전선로, 변압기의 과부하, 모선 과/저전압 등의 문제가 발생하면 그에 따른 해소방안을 검토하여 대책을 마련한다. 특히 송전선로나 변압기의 부하율이 120%를 초과하는 경우는 사후조치(실제 휴전 중 사고가 발생했을 때 취하는 조작), 150%를 초과하는 경우는 150%이하를 유지할 수 있도록 사전 조치(휴전을 시행하기 전 미리 취하는 조작)를 행하게 된다.

2.2.1 해석적 접근 기반의 해소방안 자동화

계통의 과부하를 해소하기 위한 대표적인 해석적 기법으로는 민감도 분석 혹은 유효전력 추적 기법을 이용한 발전력조정이 있다[5]. 이는 해당 선로에 흐르는 조류에 각각의 발전기들이 얼마나 기여하는지를 분석하여 발전기 출력을 변경하는 방법으로, 우리나라처럼 독립계통으로 전력 시장이 발달되지 않아 주로 선로 스위칭을 통해 과부하를 해소하는 계통에는 적합하지 않다. 또한 모선분리 지수를 이용한 모선 재배열을 통해 과부하 해소가 가능하지만 이 기법은[5] 과부하 선로 양단 모선을 대상으로만 모선분리를 검토하기 때문에 실제 과부하 선로로부터 전기적으로 멀리 떨어진 개소의 모선분리를 통해 과부하를 해소하는 현실과 차이가 있

다. 그 외에도 Z-Matrix등의 수학적 기법을 이용한 선로 선택[6] 등 다양한 연구들이 진행되어 왔지만 실제 이러한 알고리즘을 탑재한 상용 프로그램의 부재로 업무에 활용되고 있지 못하고 있다.

2.2.2 실용적 접근 기반의 해소방안 자동화

유럽과 같이 국가 간 계통이 연계되어 있고, 시장이 발달된 국가들은 주로 발전력 조정을 통해 손쉽게 해소가 가능하지만, 우리나라처럼 계통이 고립되어 있고, 완전 시장이 아닌 경우 설비 스위칭(선로 개방/투입, 모선통합/분리 등)등의 네트워크 토폴로지 변경이나 발전력 조정, 부하절체, 차단 등을 통해 과부하를 해소한다. 이러한 해소방안들은 주로 계통 검토자의 직관과 경험에 의존적이었으며, 수시로 변하는 계통상황에 능동적인 대처가 어렵기 때문에, 다양한 해소방안 중 최선의 방안을 찾아내지 못하거나 새로운 해소방안을 적용해야 하는 경우 계통 검토에 많은 시간이 소요되는 한계가 있다.

하지만 실제 계통 업무에 사용된 다수의 해소방안 적용 사례 분석(휴전검토보고서)결과 해소방안의 종류와 그 적용 범위를 분류 및 유형화 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 실용적 접근 방식을 기반으로 실제 현장에서 적용된 해소방안을 상세히 분석하여 우리나라 계통 상황에 맞는 실용적 접근 기반의 해소방안 자동화 기법을 제안하고 이를 프로그램으로 구현 하였다.

3. 새로운 전력계통 DB구성 방법

3.1 기존 전력계통 DB의 한계

세계적으로 가장 많이 사용되는 외산 전력계통 해석 프로그램(PSS/E)의 병행 2회선 상정고장은 프로그램 상 “서로 다른 모선번호를 갖는 2개의 모선 사이에 연결된 송전선로 개방”으로 정의되기 때문에 3개 이상의 모선으로 구성되는 모선분리나 편단개방 구성 선로에 대한 병행 2회선 상정고장(Parallel)은 찾지 못한다. 따라서 본 논문에서는 새로운 전력계통DB구성 방식을 제안하여, 자동화 기능을 통해 병행 2회선 상정고장을 탐색할 수 있도록 하였다.

3.2. 전력계통DB의 모선 간 관계 정의

기본적으로 전력계통 해석 프로그램의 DB는 대부분 모선 기반으로 구성되어 있다. 예를 들어, 송전선로는 전압레벨(basekV)이 동일하고 모선 번호가 서로 다른 두 모선 사이에 연결된 설비를 의미하고, 변압기는 전압레벨과 모선번호가 서로 다른 두 모선 사이에 연결된 설비를 의미한다. 이렇게 모선을 구분하는 유일한 구분자는 모선번호이다.

하지만 해당 모선이 모선분리 된 모선이거나 편단개방 구성을 위해 생성된 dummy모선인 경우 프로그램 내부적으로는 이와 같이 다른 모선번호를 갖고 있지만 동일 변전소 모선이라는 정보를 전혀 갖고 있지 않다. 이는 해당 모선에 추가적으로 모선 간 관계를 정의하여 일반모선, 모선분리, dummy모선으로 구분 지을 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 부모모선(Parents bus)과 자녀 모선(Child bus)의 개념을

도입하여 모선 간 관계를 새롭게 정의하는 전력계통 DB구성 방식을 제안하였다. 기본적으로 모선분리 된 모선이나 편단개방을 위한 dummy모선은 원 모선으로부터 파생된 모선이기 때문에, 그림 3, 4와 같이 원 모선을 부모모선, 파생된 모선은 자녀모선으로 정의할 수 있다.

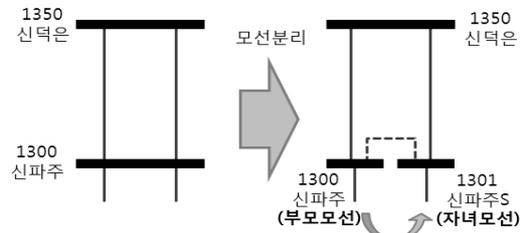


그림 3 모선분리 개소의 부모/자녀 모선
Fig. 3 Parents/Child buses for split bus

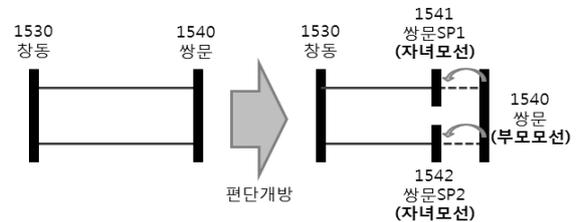


그림 4 편단개방 구성 선로의 부모/자녀 모선
Fig. 4 Parents/Child buses for one end open circuit

자녀모선은 전력계통DB의 모선정보에 추가필드 형태로 부모모선 정보를 갖고 있으며, 하나의 자녀모선은 하나의 부모모선 정보만을 갖을 수 있다. 또한 하나의 부모모선에서 다수의 자녀모선이 파생되었다면, 각각의 자녀모선은 하나의 부모모선 정보를 갖게 된다. 표 3은 기존 계통DB의 모선정보에 부모/자녀 모선 추가필드가 반영된 계통DB구조를 나타낸다.

표 3 계통DB의 부모/자녀모선 추가필드가 반영 예시
Table 3 Example for additional field of power system DB

모선번호	모선명	basekV	...	모선분리	편단개방
1300	신파주	345	...	-	-
1301	신파주S	345	...	1300	-
...
1540	쌍문	154	...	-	-
1541	쌍문SP1	154	...	-	1540
1542	쌍문SP2	154	...	-	1540

한편 하나의 부모모선으로부터 파생된 자녀모선은 상속의 개념으로 또 다른 자녀모선의 부모모선이 가능하다. 아래 그림 5처럼 1302 신파주S2 모선은 1300 신파주 모선의 자녀 모선이지만 1303 신파주S3 모선의 부모모선이기도 하다.

이와 같이 서로 다른 모선번호를 갖지만 물리적으로 모두 동일한 변전소의 모선들을 부모, 자녀모선으로 정의하게 되

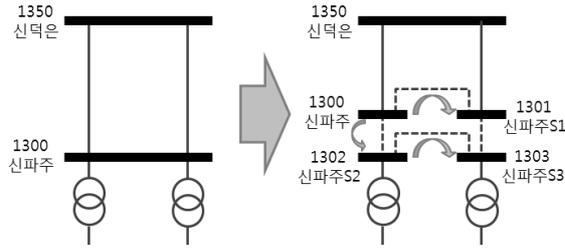


그림 5 상속개념의 부모/자녀 모선의 관계
Fig. 5 Inheritance concept of parents/child buses

면, 프로그램 내부적으로 하나의 대표 모선으로 등가화 처리가 가능하기 때문에 병행 2회선 상정고장을 찾을 수 있게 된다. 아래 그림 6은 이러한 등가화 과정을 개념적으로 표현한 그림이다.

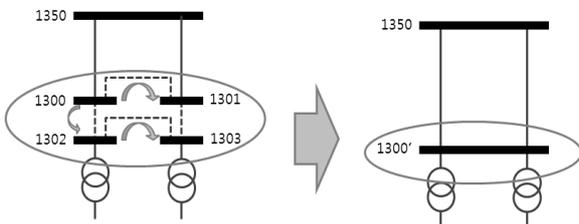


그림 6 부모/자녀 관계의 모선 등가화 과정 개념도
Fig. 6 Concept of parents/child buses equivalencing

4. 실용적 접근 기반의 상정고장/해소방안 자동화(휴전검토 자동화) 틀 개발

4.1 새로운 전력계통DB기반의 상정고장 자동모의

본 장에서는 앞에서 제안한 새로운 전력계통DB기반의 휴전검토 자동화 프로그램 중 상정고장 자동 모의 기능에 대해 다루었다. 새로운 전력계통DB를 사용함으로써 실제 현장에서 요구하는 특징적인 상정고장 케이스를 누락되는 케이스 없이 찾아내어 계통 검토 결과의 신뢰성을 확보할 수 있고, 대규모 계통에 대해 자동으로 상정고장을 모의하기 때문에 계통 검토 시간을 단축하여 효율적인 계통검토가 가능하다.

상정고장 자동 모의 기능은 새로운 전력계통DB를 기반으로 아래 그림 7~9와 같이 모선분리 개소에서 인출되는 2회선 선로, 편단개방 구성 2회선 선로 등 계통 운영상 발생하는 특징적인 병행 2회선 상정고장에 대한 자동 모의가 가능하다.

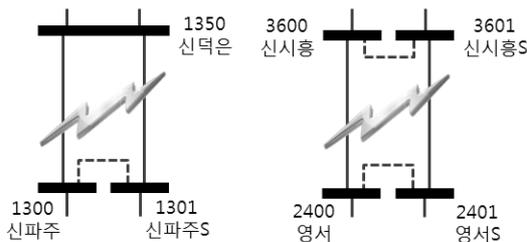


그림 7 모선 분리개소의 2회선 고장
Fig. 7 Parallel contingency of split buses

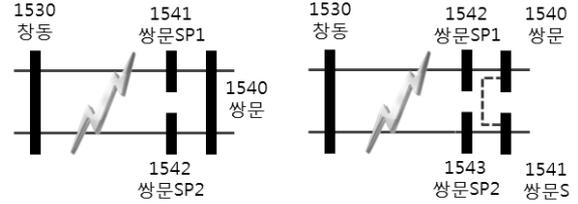


그림 8 편단개방 구성 선로의 2회선 고장
Fig. 8 Parallel contingency of one end open circuit

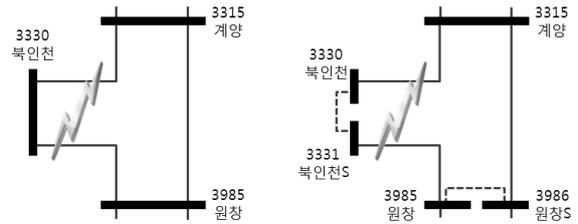


그림 9 II분기 선로의 2회선 고장
Fig. 9 Parallel contingency of II circuit

4.2 실용적 접근 기반의 해소방안 자동화 기법

4.2.1 해소방안의 유형 분류 및 분석

2012년에 검토된 휴전검토 중 약1,000건의 해소방안 적용 사례 분석 결과 선로 스위칭, 발전력 조정, 모선분리/통합, 그리고 다수 설비의 조합 등 다양한 방안이 제시되었다. 우선 이러한 해소방안 중 자동화 가능 여부 판단을 위해 검토된 모든 해소방안을 유형별로 분류하고 적용 횟수를 분석하였다. 그 결과 표 4와 같이 전체 1,081건의 해소방안을 14개 유형으로 분류할 수 있고, 그 중 자동화가 가능한 유형은 총 11개 유형이다.

예를 들면 1, 2회선 개방/투입은 관심 지역의 모든 1, 2회선 선로를 순차적으로 개방/투입함으로써 자동화가 가능하고, 대상 발전소를 지정하는 경우 발전소 최소~최대출력까지 일정 간격으로 출력을 비례 조정하여 발전력 조정 자동화가 가능하다. 이러한 발전력 조정 기능은 휴전 시 송전 제약량 상정에 유용하게 활용이 가능하다[7].

표 4 해소방안의 유형별 분류
Table 4 Categorization of remedial action

조작설비	횟수	자동화	조작설비	횟수	자동화
1회선 개방	168	○	부하 절체	141	×
1회선 투입	184	○	모선 통합	195	○
2회선 개방	305	○	모선 분리	153	△
2회선 투입	117	○	변압기투입	23	○
발전력조정	327	○	변압기개방	10	○
발전기정지	18	○	Shunt 투입	11	○
부하 차단	24	×	Shunt 개방	1	○

반면, 부하차단은 어떤 부하들을, 얼마만큼의 용량으로 차단해야 하는지 결정할 수 없고, 부하 절체는 22.9kV 배전 계통의 스위치 절체를 통해 공급 변전소를 변경하는 방식이기 때문에 송전급 계통 모의에는 적합하지 않다. 이와 같이 자동화가 가능한 유형의 조작설비들을 단일, 혹은 2개 이상의 복수 설비들을 조합함으로써 과부하, 과/저전압해소가 가능하다.

4.2.2 조작설비의 전기적 거리

계통의 과부하, 과/저전압이 발생한 지점에서부터 이를 해소하기 위해 조작하는 설비의 전기적 거리를 N-Level로 정의한다. 즉 과부하 발생지점에서부터 과부하를 해소하기 위해 1개 변전소 너머에 있는 설비를 조작하는 경우를 1-Level, 2개 너머에 있는 설비를 조작하는 경우 2-Level로 정의한다. 2개 이상의 설비를 동시에 조작하는 경우 Level값이 큰 설비를 기준으로 한다. 그림 10은 기준 설비로부터의 전기적 거리에 관한 정의 예시를 나타낸다.

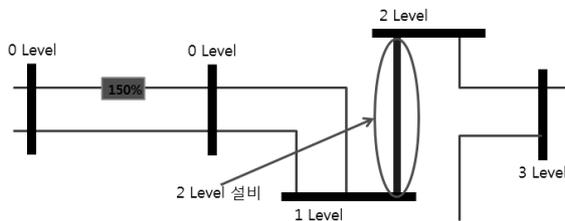


그림 10 기준 설비로부터의 전기적 거리의 정의 예시
Fig. 10 Example for electrical distance from reference device

과부하 해소를 위해 조작한 설비의 전기적 거리 분석결과를 표 5와 그림 11에 요약하였다. 3-Level이하 설비 조작이 전체의 90%를 차지할 만큼 대부분 과부하 발생 인근 설비의 조작으로 과부하 해소가 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 계통 검토의 효율성을 고려하여 전기적 거리에 따른 자동화 범위를 3-Level로 적용하고, 계통 목적에 따라 사용자가 전기적 거리를 선택할 수 있도록 구현하였다. 실제로 전기적 거리가 먼 설비를 조작 할수록 과부하 설비에 미치는 영향이 줄어들기 때문에, 이때는 다수의 설비를 함께 조작해야 하는 등의 복잡한 해소방안을 통해 과부하 해소가 가능하므로 자동화 구현에 어려움이 있다.

표 5 적용된 해소방안의 전기적 거리 분석 결과
Table 5 Results for electrical distance of remedial action

전기적 거리	개수	비율 (%)	비고
0-Level	406	38	잔여회선, 발전력조정 등
1-Level	236	22	-
2-Level	220	20	-
3-Level	126	12	-
4-Level이상	93	8	-
총합	1,081	100	-

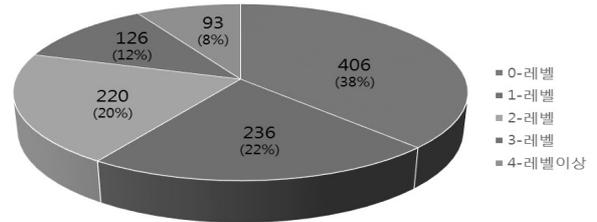


그림 11 적용된 해소방안의 전기적 거리 분석 결과
Fig. 11 Results for electrical distance of remedial action

4.2.3 과부하, 과/저전압 해소를 위해 조작하는 설비의 수

과부하, 과/저전압을 해소하기 위해 송전선로 1회선 개방/투입, 2회선 개방/투입 등의 단일 설비 조작을 비롯해서 모선 분리+2회선 개방+발전력조정 등 복수 설비가 동시에 조작되는 경우도 있다. 전체 해소방안 적용 사례 중 조작 설비 수 분석결과를 표 6에 요약하였다. 60%는 단일 설비 조작(On/Off, 발전력 조정 등)만으로 과부하 등의 문제가 해소되고, 34%는 모선분리와 2회선 선로 개방 등 이중 설비의 조작을, 6%는 모선분리, 선로개방과 발전력 조정 등 3개 이상의 설비를 동시에 조작하여 과부하를 해소하였다.

표 6 적용된 해소방안의 조작 설비 수 분석 결과
Table 6 Results for the number of operated device of remedial action

조작 설비 수	개수	비율 (%)	비고
1	654	60	· 일반적인 단일 설비 조작
2	364	34	· 모선분리/통합+2회선투입/개방 · 2회선 투입/개방+발전력조정 · 2회선 2루트 개방 · 1,2회선 개방/투입+부하절체/차단 · 기타 2개 설비 동시 조작
3	63	6	· 모선분리+선로개방+발전력조정 · 기타 3개이상 설비 동시 조작
총합	1,081	100	

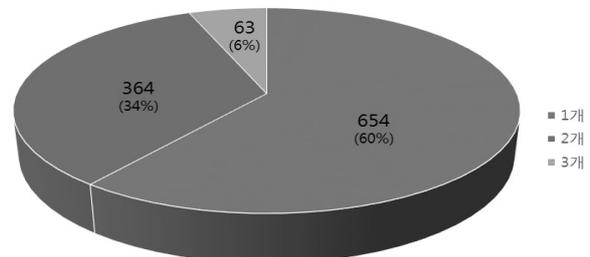


그림 12 적용된 해소방안의 조작 설비 수 분석 결과
Fig. 12 Results for the number of operated device of remedial action

이러한 해소방안을 프로그램으로 자동화하기 위해 적정 수준의 제한이 필요하며, 현실적으로 2개 이상의 설비를 동시에 조작하는 경우, 해소방안 케이스 조합의 수가 급격하게 증가

하기 때문에 탐색에 많은 부담이 되고, 불필요하게 많은 모의 결과는 사용자에게 유용한 모의 결과를 제공해줄 수 없다. 따라서 단일 설비 및 이중설비 조작의 일부(모선분리/통합+2회선 투입/개방)를 자동화 범위로 한정하여 구현하였다.

4.2.4 해소방안 자동화 구현

약 1,000여건의 해소방안 적용 사례 분석 결과 적용된 해소방안들을 조작 설비의 유형, 전기적 거리 및 조작설비 수로 분류할 수 있었고, 자동화를 위한 적절한 기준을 제시하였다. 표 7은 이러한 분석 결과를 기반으로 각각의 요소별 해소방안 자동화 구현 범위를 나타낸다.

단일, 이중설비 조작 모두 과부하 설비 인근 3-Level 계통을 대상으로 조작 설비의 반복 탐색을 기본으로 한다. 즉, 송전선로의 1, 2회선, 변압기 개방/투입의 경우, 대상 계통에 투입/개방되어 있는 모든 1, 2회선 그리고 변압기를 각각 순차적으로 개방/투입해가며 조류계산을 수행하여 과부하, 과/저전압 해소 여부를 판단한다. 스위치 선트는 과/저전압 해소를 위해 투입/개방되며, 조류계산 옵션의 Shunt control을 Enable하고, 과/저전압 대상 모선 3레벨 인근에 있는 스위치 선트의 Shunt control mode를 Discrete control mode로 변경한 뒤 모의한다.

표 7 해소방안 자동화 구현 범위

Table 7 Automated remedial action list

전기적 거리	설비 수	설비 유형	조작내용
0~3레벨	단일설비	송전선로	1, 2회선개방/투입
		변압기	1Bank 개방/투입
		발전기*	출력조정, 투입/탈락
		모선	통합/분리**
	스위치선트	Discrete control mode (대상 모선 이하는 Lock)	
	이중설비	송전선로	2회선 2루트 개방
송전선로 +모선		2회선 개방 +모선 분리/통합	

* 조작 대상 발전기를 사용자가 사전에 선택해야 하며, 대상 발전기들을 순차적으로 투입/탈락하여 케이스를 생성
**모선별 사전 재배열이 되어 있어야하며, 모선 Tie-section을 개방/투입

5. 사례 연구

5.1. 대상계통 및 모의 조건

본 논문에서 제안한 새로운 전력계통 DB구성 방식, 상정고장/해소방안 자동화 기법을 국산 전력계통해석 프로그램인 PAZ 3.0에 구현 및 탑재하였으며, 상정고장/해소방안 모의의 기본 엔진인 조류계산 알고리즘의 신뢰성은 선행 연구를 통해 충분히 검증되었으므로 본 논문에서는 언급하지 않는다.

또한 본 사례연구는 2014년 2월 5일 동계 peak운영 데이터 중 대전충남지역을 대상으로 하였으며, Siemens PTI社의 PSS/E의 상정고장 자동기능(ACCC)과 그 성능을 비교하였다 [8]. 적용 상정고장은 본 논문에서 대상으로 하는 송전선로 병행 2회선 고장(Parallel Contingency)으로 한정하였다. 그림 13은 대전 지역의 154kV 주요 계통도를 나타낸다. 345kV계통까지 고려하면 전체 모선수가 166개의 대규모 계통으로, 병행 2회선 상정고장을 하나하나 검토하기 위해 매우 많은 시간이 소요되기 때문에, 이와 같이 대규모 계통 검토 시에는 상정고장 자동화 기능을 이용한 검토가 필요하다.

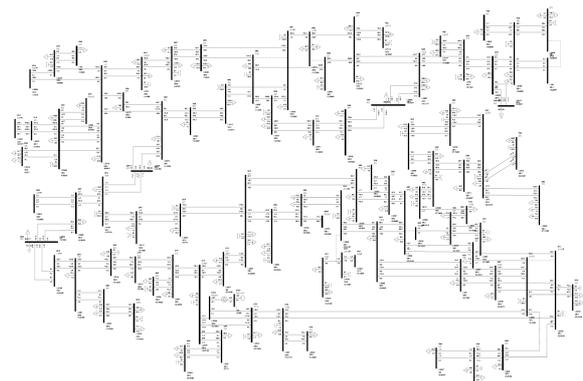


그림 13 대전 충남지역 154kV 주요 계통

Fig. 13 Daejeon 154kV network

표 8 사례연구 모의 조건

Table 8 Case study condition

모의 조건	내용
계통 데이터	2014년 2월 5일 운영데이터
대상 계통	대전 충남지역
부하수준	동계 최대 부하(8,978MW)
계통 규모	모선 수: 166, 발전기: 56, 송전선로: 238, 변압기: 76
상정고장	송전선로 이중고장(Parallel Circuit)
과부하 기준	부하율 100%초과

5.2. 상정고장 자동 모의

대상계통의 실제 계통운영상 검토되어야 하는 모든 병행 2회선 상정고장은 765kV 신안성-신서산 2회선을 포함하여 총 106개 케이스이다. PAZ 3.0을 이용하여 대상 계통의 상정고장 자동화 모의 결과 전체 106개 상정고장을 모두 찾아냈으며, 이 중 일반적인 2회선 상정고장은 75개, 모선분리개소를 포함하는 상정고장은 16개, II분기의 2회선 고장은 15개이다. 반면, PSS/E의 상정고장 자동 모의는 일반적인 2회선 상정고장 75개 이외에 모선분리개소나 II분기 고장은 찾아내지 못했다. 이와 같이 자동화 기능을 이용하여 실제 운영상 검토되어야 상정고장을 모두 찾아냄으로써 대규모 계통에 대한 상정고장 자동화 적용의 신뢰성을 검증하였다.

표 9 상정고장 케이스 탐색 결과

Table 9 Result for searching contingency cases

운영 상 검토대상	PAZ 3.0			PSS/E		
	일반 2회선	모선 분리	II분기	일반 2회선	모선 분리	II분기
106	75	16	15	75	-	-

5.3. 해소방안 자동 모의

앞서 탐색한 106개 상정고장 케이스 모의 결과, 그 중 17개 상정고장 케이스에서 부하율 100%를 초과하는 과부하가 발생하였으며, 표 10은 그 결과를 나타낸다.

표 10 상정고장 과부하 발생 케이스

Table 10 Overloading case for automated contingency analysis

No.	상정고장	과부하설비	최대 과부하율
1	신안성7-신서산7 #1, 2	신서산-아산 #1 외 13개	139%
2	신탕정-신온양 #1, 2	아산MTR #1 외 1개	107%
3	화성-아산 #1, 2	아산MTR #1 외 2개	139%
4	신온양-청양 #1, 2	아산MTR #1 외 2개	113%
5	부강-월산 #1, 2	조치원-서세종 #1	133%
6	조치원-전의 #1, 2	월산-서세종 #1	111%
7	태안TP-신서산 신서산-신당진S	현대제철-GS #1 외 3개	134%
8	태안TP-신서산 #1, 2	GS-부곡GT3 #1 외 1개	100%
9	태안TPS-신서산 신서산-신당진	태안TP MTR #1	110%
10	태안TPS-신당진 신서산-신당진	태안TP MTR #1	106%
11	신서산-아산 #1, 2	신당진MTR #2 외 4개	112%
12	덕진-송강 #1, 2	동대전-신탄진 #1 외 1개	107%
13	남대전-신흥 #1, 2	남대전-신흥 #3	124%
14	신흥-동대전 #1, 2	신흥-동대전 #3	107%
15	신당진-당진 #1, 2	아산MTR #1	106%
16	아산-온양 #1, 2	아산-인주 #1	100%
17	아산-송악 #1, 2	아산MTR #1	105%

해소방안 자동 모의는 각각의 과부하 케이스 별로 본 논문에서 제안한 실용적 기반의 해소방안 자동화 기법을 적용하여 반복 조류계산을 수행하며, 대상 과부하 뿐 만아니라 대상 계통의 모든 설비가 목표 부하율(일반적으로 100%)이하가 되는 해소방안(혹은 대책방안)을 그 결과로 출력한다. 표 10의 17개 과부하 케이스 중 대표적으로 신흥-동대전 2회선 상정고장(No.14)에 대한 해소방안 자동 모의 결과를 분석하였다. 그림 14와 같이 신흥-동대전 2회선 상정고장 시 잔여회선(#3)에 107%의 과부하가 발생하며, 과부하 발생

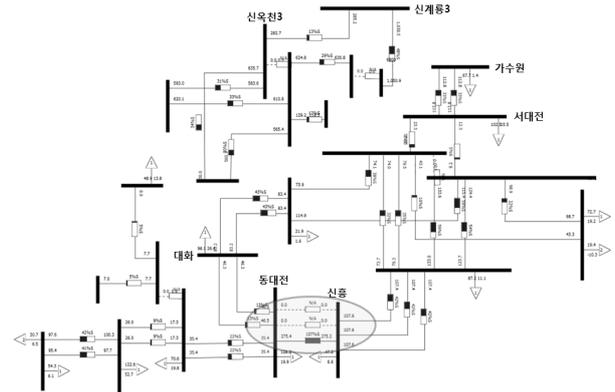


그림 14 신흥-동대전 2회선 고장 시 잔여선로 과부하
Fig. 14 Remained #3 ckt overloading for Shinheung -Dongdaejon #1,2 ckt open

설비 인근 3레벨(해소방안 자동화 적용 범위)설비를 대상으로 과부하 해소방안을 자동으로 모의한다. 그 결과 표 11과 같이 총 148개의 해소방안 후보군이 자동 모의 되었으며, 그 중 21개 케이스가 과부하를 해소할 수 있었다.

표 11 해소방안 자동 모의 결과

Table 11 Result of automated remedial action simulation

	1회선 개방/투입	2회선 개방/투입	모선 분리/통합	2회선 개방/투입+ 모선 분리/통합	계
전체 케이스	44	20	4	80	148
해소 케이스	6	3	-	12	21

직관적으로 판단했을 때, 3회선 선로 중 2회선 상정고장 시 잔여회선(#3)에 과부하가 발생하는 경우, 대상 과부하 선로를 개방하여 해당 과부하 해소가 가능하지만, 공급 신뢰도 등의 계통 운영상 문제로 잔여 선로 개방이 불가능할 수 있다. 따라서 전력 계통 해석 프로그램은 계통운영자에게 다

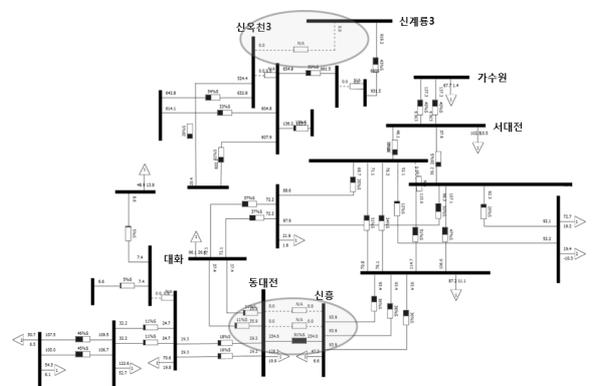


그림 15 신흥-동대전 1회선 개방 해소방안
Fig. 15 Remedial action ShinOkchun-Shingyeryong #1 ckt open

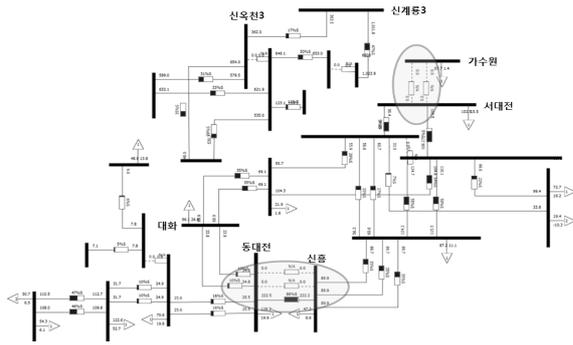


그림 16 가수원-서대전 2회선 개방 해소방안
 Fig. 16 Remedial action Gasuwon-Seodaeyeon #1,2 ckt open

양한 해소방안을 제공하여 현장 상황을 고려한 최선의 선택을 할 수 있도록 분석 결과를 제공하여야 한다. 표 12는 본 논문에서 제안한 해소방안 자동화 기법을 이용하여 신흥-동대전 3회선 선로의 과부하 해소를 위한 21개의 해소방안 리스트를 나타낸다. 이를 통해 운영자에게 계통 운영 선택의 폭을 넓힐 수 있으며 더욱 안정적이고 효율적인 운영방안

표 12 신흥-동대전#3 과부하(107%) 해소를 위한 해소방안
 Table 12 Remedial action list to alleviate overloading of Shinheung-Dongdaeyeon #3 ckt

조작종류	설비이름	해소방안 적용 후 부하율(%)
1회선 개방	신흥-동대전 #3	0
	신곡전3-신계룡3 #1	91
	신곡전3S-청양3S #1	88
	신곡전3S-신남원3 #1	97
	신곡전1-남대전 #1	93
	신곡전1S-남대전 #2	99
2회선 개방	동대전-대화 #1,2	93
	대화-둔산 #1,2	98
	가수원-서대전 #1,2	86
모선통합 +2회선 개방	신곡전3 / 동대전-대화 #1,2	94
	신곡전3 / 대화-둔산 #1,2	99
	신곡전3 / 가수원-서대전 #1,2	89
	신곡전1 / 동대전-대화 #1,2	94
	신곡전1 / 대화-둔산 #1,2	99
	신곡전1 / 가수원-서대전 #1,2	87
	신탄진 / 동대전-대화 #1,2	95
	신탄진 / 대화-둔산 #1,2	99
	신탄진 / 가수원-서대전 #1,2	89
	대화1 / 조치원-전의	99
대화1 / 동대전-대화 #1,2	95	
대화1 / 가수원-서대전 #1,2	91	

수립에 기여할 수 있다.

표 13은 신흥-동대전 2회선 상정고장(No.14) 이외에 과부하가 발생하는 모든 상정고장 케이스에 대한 해소방안 탐색 결과를 나타내며, 전체 17개 상정고장 케이스 중 13개에 대한 해소방안을 도출하여 약 76%수준의 해소방안 탐색 성공률을 갖는다. 이러한 결과는 계통 상황이나 고장의 심각성 등에 따라 다를 수 있지만, 앞서 실용적 접근 기반의 해소방안 자동화 기법의 분석 결과 전체 상정고장의 약70~80% 수준으로 해소방안 도출이 가능하다.

표 13 각 상정고장 별 해소방안 탐색 결과
 Table 13 Results of searching remedial action for each contingency

No.	상정고장	과부하설비	해소방안수
1	신안성7-신서산7 #1, 2	신서산-아산 #1 외 13개	-
2	신당정-신운양 #1, 2	아산MTR #1 외 1개	9
3	화성-아산 #1, 2	아산MTR #1 외 2개	-
4	신운양-청양 #1, 2	아산MTR #1 외 2개	1
5	부강-월산 #1, 2	조치원-서세종 #1	-
6	조치원-전의 #1, 2	월산-서세종 #1	18
7	태안TP-신서산 신서산-신당진S	현대제철-GS #1 외 3개	7
8	태안TP-신서산 #1, 2	GS-부곡GT3 #1 외 1개	1
9	태안TPS-신서산 신서산-신당진	태안TP MTR #1	18
10	태안TPS-신당진 신서산-신당진	태안TP MTR #1	19
11	신서산-아산 #1, 2	신당진MTR #2 외 4개	-
12	덕진-송강 #1, 2	동대전-신탄진 #1 외 1개	14
13	남대전-신흥 #1, 2	남대전-신흥 #3	1
14	신흥-동대전 #1, 2	신흥-동대전 #3	21
15	신당진-당진 #1, 2	아산MTR #1	62
16	아산-온양 #1, 2	아산-인주 #1	35
17	아산-송악 #1, 2	아산MTR #1	64

6. 결 론

본 논문은 대규모 계통 검토 시 사용되는 전력계통 해석 프로그램 중 모선 간 관계 제정의 등의 전력계통 DB구성 방법과 약 1,000여건의 해소방안 적용 사례 분석을 통해 실용적 기법 기반의 상정고장/해소방안 자동화 기법을 제안하고, 이를 프로그램으로 구현하여 그 성능을 입증하였다. 이를 통해 운영상 발생하는 특징적인 병형 2회선 상정고장 탐색이 가능해짐으로써 실질적인 대규모 계통의 상정고장 자동 모의가 가능하게 되었으며, 또한 해소방안 자동 모의를 통해 계통 검토 시간을 획기적으로 단축시키고, 계통운영의 유연성을 제공하며, 최선의 운영방안 수립을 위한 정보를 제공할 수 있게 되었다. 특히 상정고장/해소방안 검토 등 일련의 절차를 자동화함으로써 휴전검토 업무에 직접적인 활용

가능하며, 운영방안 수립 선택의 폭을 넓힘으로써 더욱 안정적이고 효율적인 계통운영을 가능케 할 수 있을 것이다. 본 논문에서 다루고 있는 상정고장/해소방안 자동화 기능은 한전에서 개발한 전력계통 해석 프로그램인 PAZ 3.0에 탑재되어 전사적으로 활용되고 있으며, 향후 해석적 기법을 접목 시킴으로써 해소방안 탐색 성능을 더욱 개선하고, 고장용량 초과 검토 자동화 기능 연동을 통해 계통해석 프로그램의 자동화 기능을 더욱 고도화 할 계획이다.

Reference

- [1] C. Lee, W. Lee, H. Joo, "The Change of Power System Reliability During the Scheduled Outage of Transmission Facilities", KIEE Conf pp229-230, Nov 2007
- [2] A. Sakis, G. Contaxis, R. Kovacs, N. Reppen, N. Balu, "Power System Remedial Action Methodology", IEEE Trans Vol 3 No. 2, May 1988
- [3] J. Song, B. Ko, Y. Kwon, S. Han, J. Shin, T. Kim, "Development of Power System Analysis Tool(KWPSS ver3.0)", KIEE Conf, pp. 333-335, 2013
- [4] Power21, "Development of General Outage Study System, KPX Final Report, 2011
- [5] B. Lee, S. Hwang, "A Study on an Algorithm of Line Switching and Bus Separation for Alleviating Overloads by the Use of Line Power Tracing and Sensitivity", KIEE Trans Vol 60 No 11, Nov 2011
- [6] E. Makram, K. Thornton, H. Brown, "Selection of Lines to be Switched to Eliminate Overloaded Lines using a Z-Matrix Method, IEEE Trans Vol 4 No 2, May 1989
- [7] E. Bayegan, K. Moslehi, "Experience with Rule Engines in an Outage Scheduling System", IEEE Conf pp1-8, July 2011
- [8] Siemens Power Technologies International, "PSS/E 33 Manual", March 2013
- [9] E. da Silva, T. Schilling, M. Rafael, "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", IEEE Trans Vol 15 No. 2, May 2000
- [10] J. Wrubel, P. Rapcienski, K. Lee, B. Gisin, G. Woodzell, "Practical Experience With Corrective Switching Algorithm For On-line Applications, IEEE Trans Vol 11 No 1, Feb 1996
- [11] E. Evangelista, A. Bianco, J. Gomes, J. Guimaraes, A. Silva, A. Silva, "Automatic Contingency Analysis Integration to an Expert System in Scheduled Outage", IEEE Conf, Sep 2001

저 자 소 개



송 지 영 (宋智永)

1983년 7월23일생. 2008년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2010년 고려대학교 전자전기공학과 석사 졸업. 2010년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
Email: jysong@kepco.co.kr



고 백 경 (高伯炅)

1984년11월8일생. 2011년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2013년 고려대학교 전기전자전공학과 석사 졸업. 2013년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
Email: bkko@kepco.co.kr



신 정 훈 (申政勳)

1969년 1월 6일생. 1993년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 석사졸업. 2006년 동대학원 박사졸업. 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
Email: kkambo@kepco.co.kr



한 상 옥 (韓相旭)

1982년 2월14일생. 2004년 고려대학교 전기전자전공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2012년 동 대학원 전자전기공학과 박사 졸업. 2012년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Email: sangwook@kepco.co.kr



남 수 철 (南守喆)

1978년 7월18일생. 2001년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Email: scnam@kepco.co.kr



이 재 걸 (李宰杰)

1976년 8월19일생. 2001년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2004년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Email: jaelry@kepco.co.kr



김 태 균 (金泰均)

1963년 11월28일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1993년 동 대학원 전자전기공학과 박사 졸업. 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원
Email: bhebbu@kepco.co.kr