creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 산정을 위한 연구

A Study on the Reliability Evaluation of Power Supply for Community Energy System

2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

김 진 희

구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 산정을 위한 연구

지도교수 윤 용 태

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
김 진 희

김진희의 공학전문석사 연구보고서를 인준함
2019년 2월

위 원 장 _____ 박 종 남 (인)

위 원 _____ 윤 용 태 (인)

위 원 _____ 박 종 근 (인)

국문초록

최근 분산형 전원의 보급 확대, 열(냉난방)·전기 통합에너지 수요 증대와 에너지 효율성 제고, 환경개선 효과 증진 등이 에너지산업에 요구되는 가운데 국내에서는 2003년 12월 30일 구역전기사업이 도입되었다[3]. 구역전기사업의 주된 목적은 아파트 단지나 호텔, 병원 등 집중적으로 전력수요가 발생하는 수요지 인근에 고효율·소형의 열병합발전기로 전기를 생산해 그 공급 구역의 전기사용자에게 직접 공급하는 것이다[9].

구역전기사업의 가장 핵심적인 허가기준은 해당 공급 구역 내 최대 전력수요의 60% 이상의 공급설비의무기준이다[1]. 이에 과부족 전력 발생으로 외부 전력계통과의 연계접속설비구축은 필수이다. 구역전기사업은 비용절감과 이익을 위해 자체 전력생산보다는 외부 전력계통으로부터 전기를 공급받아 해당 구역 내에 전기를 공급하는 정도가 크다[10]. 또한 구역 내 설비고장, 정비를 위한 공급설비 정지 등 비상시에는 외부 전력계통에 전적으로 의존해야하기 때문에 구내 발전설비뿐만 아니라 연계접속설비를 포함해 계통의 공급신뢰도를 평가하는 것은 매우 중요하다.

그러던 중, 2017년 구역전기사업장 내 전력설비 고장으로 인한 9시간 동안 정전 및 열공급 중단은 구역전기사업의 구조적·제도적 문제점으로 인한 잠재적인 공급신뢰도 맹점이 부각되었다. 이에 정부는 구역전기사업의 공급신뢰도를 개선하고자 2017년 7월 전력계통 신뢰도 및 전기 품질 유지기준 개정안을 행정 예고했다. 그 중 주요 공급설비 신뢰도에 관해서는 구역전기사업 실 계통에서 N-1, N-2 등의 임의의 선정된 상정사고를 해석하는 안전도(Security)확보에 초점을 맞춘 결정론적 방법론에

기반 한다. 반면 확률론적 방법은 예상치 못한 모든 설비의 고장 발생가능성으로 인한 공급능력과 전력수요변동 등의 불확실성을 고려할 수 있기 때문에 고장에 따른 계통의 안전도뿐만 아니라 장기간의 통계적 관점에서 신뢰도 분석에 따른 합리적인 설비투자계획을 가능케 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 연계계통의 등가보조발전기모델을 기반으로 발전설비와 연계접속설비를 포함한 설비고장확률과 수요부하변동 등을 고려한 확률론적 공급신뢰도 평가방법을 구역전기사업 모의계통에 적용하여 사례연구를 수행하였다. 구역전기사업 전력계통은 배전계통을 포함한 발전계통이기 때문에 신뢰도 지수 LOLE(Loss of Load Expectation)를 활용하였다. 현 국내 전력수급기본계획 중 전력설비의 건설계획단계에서 사용하는 LOLE(0.3 days/year)와 동일한 수준으로 공급신뢰도를 비교분석하였다[2]. 구역전기사업 주 고객대상은 아파트 단지나 상가, 빌딩 등이기 때문에 신뢰도 분석을 위한 구역전기사업 내 연간 일최대 전력수요는 이와 부하종류가 유사한 수도권 배전계통 데이터를 반영하였다. 구역전기사업의 초기 설비 투자비용 부담완화를 위한 공급설비의무기준과 연계접속설비의 관계를 공급신뢰도 측면에서 분석하였고 대책방안을 제시하고자 한다.

구역전기사업자는 자체 전기사용자를 보호할 의무가 있고 분산형 전원으로써의 본래 역할을 위해 적절한 공급신뢰도를 기반으로 설비계획과 설비운용상의 추가방안을 합리적으로 결정할 수 있을 것이라 기대한다.

주요어 : 구역전기사업, 공급신뢰도, 확률론적 방법론, LOLE

학 번 : 2017-29315

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구 배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구의 구성 및 개요 ····· 4

제 2 장 구역전기사업 제도 분석 ····· 5

제 1 절 구역전기사업 구조 분석 ····· 5

1. 구역전기사업 정의 및 구조적 특징 ····· 5
2. 구역전기사업자의 구분 및 현황 ····· 7
3. 구역전기사업의 공급대상 ····· 8

제 2 절 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 제도 분석 ····· 8

1. 전력계통의 신뢰도(Reliability) 정의 ····· 8
2. 구역전기사업 공급설비용량과 신뢰도 ····· 9
3. 구역전기사업 운용상 특징과 신뢰도 ····· 11
4. 구역전기사업 경제성과 신뢰도 ····· 12
5. 구역전기사업 공급 신뢰도 기준 분석 및 문제점 ····· 13

제 3 장 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 평가 ··· 16

제 1 절 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 ····· 16

1. 전력계통의 공급신뢰도 평가 방법 ····· 16
2. 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 평가 ····· 18
3. 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 지수 ····· 19

제 2 절 전력계통의 공급신뢰도 지수 LOLE ····· 20

1. 공급지장기대시간(LOLE) 정의 ····· 20
2. 전력계통의 LOLE계산을 위한 부하곡선 모델링 ····· 21
3. 전력계통의 LOLE계산을 위한 설비고장확률(FOR) ····· 23

4. LOLE계산과정 단계 ····· 25

제 4 장 사례 연구 ····· 26

제 1 절 샘플 계통의 공급신뢰도 평가 ····· 30

1. 부하 크기와 발전기 구성에 따른 LOLE ····· 30

2. 연계선로에 따른 LOLE ····· 32

제 2 절 구역전기사업 실 계통 규모의 모의계통 공급신뢰도 평가 ····· 35

1. 사례연구를 위한 구역전기사업 전력계통의 등가모델 ···· 36

2. 사계연구를 위한 설비고장확률(FOR)과 공급용량 ····· 39

3. 사계연구를 위한 부하곡선 모델링 ····· 40

4. 사계연구를 위한 발전설비와 연계선로 구성 ····· 44

제 3 절 사례연구 결과 ····· 47

1. 현 구역전기사업의 허가기준에 따른 LOLE 결과 ····· 47

2. 자체 공급용량, 연계선로 회선 수가 LOLE에 미치는 영향 ··· 48

3. 사업계획 시 발전기 대수가 LOLE에 미치는 영향 ····· 48

4. 사업계획 시 여러 대의 발전기 용량이 LOLE에 미치는 영향 · 49

5. 연구 의의와 한계점 ····· 52

제 5 장 결 론 ····· 54

참고문헌 ····· 56

Abstract ····· 57

부 록 ····· 59

1. 사례연구를 위한 각 Case별 부하데이터 ····· 59

표 목 차

표 2-1 구역전기사업자의 구분 ····· 7
표 2-2 구역전기사업자의 전기생산량 ····· 11
표 2-3 구역전기사업의 주요 공급설비 신뢰도 현 기준 체계 ····· 14
표 2-4 구역전기사업자의 설비 현황 ····· 15
표 3-1 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 개정안 (제2017-389호) ·· 18
표 3-2 해외 및 국내 공급신뢰도 기준 ····· 20
표 3-3 발전기의 고장확률(FOR) ····· 24
표 4-1 발전기 1대인 계통 입력데이터 ····· 27
표 4-2 발전기 1대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가 ····· 27
표 4-3 발전기 2대인 계통 입력데이터(1) ····· 28
표 4-4 발전기 2대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가(1) ···· 28
표 4-5 발전기 2대인 계통 입력데이터(2) ····· 28
표 4-6 발전기 2대인 계통공급신뢰도 LOLE 평가(2) ····· 28
표 4-7 발전기 1대인 계통 입력데이터 ····· 30
표 4-8 발전기 1대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가 ····· 30
표 4-9 발전기 2대인 계통 입력데이터(1) ····· 30
표 4-10 발전기 2대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가(1) ·· 30
표 4-11 발전기 2대인 계통 입력데이터(2) ····· 31
표 4-12 발전기 2대인 계통공급신뢰도 LOLE 평가(2) ···· 31
표 4-13 연계선로 1회선 발전계통 입력데이터 ····· 32
표 4-14 연계선로 1회선 발전계통 공급신뢰도 LOLE 평가 ····· 33
표 4-15 연계선로 2회선 발전계통 입력데이터 ····· 33
표 4-16 연계선로 2회선 발전계통 공급신뢰도 LOLE 평가 ····· 34
표 4-17 발전기와 연계선로 용량 및 고장확률 ····· 39

표 4-18 사례연구를 위한 계통크기에 따른 배전계통의 부하데이터 ····· 40
표 4-19 Case 별 구역 내 자체 발전기 대수와 용량 ····· 45
표 4-20 구역전기사업 모의계통 신뢰도 계산 결과 ····· 50

그 림 목 차

그림 2-1 구역전기사업자 시장 구조 ····· 6
그림 2-2 구역전기사업자 전력계통과 외부 전력계통과의 연계 ···· 6
그림 3-1 발전계통의 신뢰도지수의 산정을 위한 개념 ····· 21
그림 4-1 신뢰도계산 예, 발전기 구성 및 일간 역부하지속곡선(1) ··· 27
그림 4-2 신뢰도계산 예, 발전기 구성 및 일간 역부하지속곡선(2) ··· 29
그림 4-3 연계선로 1회선 모델 계통, 연계선로 2회선 모델 계통,
일간 역부하지속곡선 ····· 32
그림 4-4 연계계통의 등가보조발전기 모델 ····· 36
그림 4-5 구역전기사업장 실 계통 ····· 37
그림 4-6 구역전기사업 자체계통(G1)과 외부계통(G2),
연계선로 등가모델 ····· 38
그림 4-7 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선 ····· 41
그림 4-8 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선 ····· 41
그림 4-9 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선 ····· 42
그림 4-10 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선 ····· 42
그림 4-11 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선 ····· 43
그림 4-12 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선 ····· 43
그림 4-13 사례연구 계통의 발전기 구성과 연계선로에 따른 등가모델· 44
그림 4-14 구역전기사업 모의계통 신뢰도 결과 LOLE곡선 ··· 51

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

우리나라의 전력공급은 설비 특성상 대형발전소가 주로 해안에 위치한 반면, 전력수요는 수도권에 편중되어 있다. 이에 따라 송전선로 건설비용 및 송전손실과 혼잡비용이 증대되며 송전제약운전이 빈발하는 문제점이 발생했다. 이에 여러 가지 대안 가운데 최근 분산형 전원(Distributed Generation, DG)의 필요성이 강조되고 있다. 분산형 전원은 원자력·화석연료를 활용한 거대 발전소에서 전력을 공급받던 중앙 집중적인 대형 에너지 공급시스템 방식에서 벗어나 산업단지, 주택단지 등 특정한 수요지 내에서 다양한 분산전원을 경제적으로 조합하여 소규모 단위로 에너지 공급과 수요를 관리하는 소규모 전력망이다. 이렇듯, 분산형 전원에 대한 관심 증대・열(냉난방)전기 통합에너지 수요의 증대・에너지 생산에 있어 경제성 및 효율성 제고・환경개선 효과 제고 등이 에너지산업에 요구되고 있다.

국내에서는 분산형 전원개발 촉진을 위해 수요지 인근에 열병합발전설비의 고효율・소용량을 기반으로 한 구역전기사업제도를 2003년 12월 전기사업법의 개정으로 2004년 7월 1일부터 시행했다[3].

구역전기사업자는 특정 공급 구역 내 최대 전력수요의 60% 이상의 발전설비를 갖추고 전기를 생산하여 전력시장을 통하지 아니하고 해당구역 전기사용자에게 직접 판매하는 것을 주된 목적으로 하는 실질적으로 발

전·배전·전기 판매·열 판매를 겸업하는 새로운 형태의 전기사업이다[1].

그러나 구역전기사업제도는 에너지 효율적 이용과 수도권 수요지 인접 입지 장점 등에도 불구하고 도입된 이후 설비가격 상승, 대도시 부지매입비용 상승, 연료비 상승 등 외부환경 변화로 인한 수익성 악화와 운용상의 제약으로 발전사업자로 전환하거나 심지어 허가 받은 사업을 포기하는 경우까지 나타났다. 이에 정부는 구역전기사업 추진의 문제점들을 해결하고자 구역전기사업관련 활성화 대책을 수립하였다[4, 5].

그러던 중, 우리나라는 지난 2011년 9월 15일 발생한 순환정전 사태에서 대형화되고 복잡한 계통에서 수요예측 실패로 인한 대규모 정전사태라는 국가적, 사회적 재난을 경험했고 밀양 송전탑 설치 반대와 같이 현재도 지속적으로 전력설비 추가 건설에 대한 국민적 갈등도 발생하고 있는 상황이다. 이와 같은 사례에서 보듯이 구역전기사업은 수요지 인근에 발전기를 설치하고 수요에 맞게 전력을 공급하기 때문에 정전사태 등의 대비에도 용이하고 발전소 및 송전선로 건설의 입지 난과 송전손실 등의 에너지 수급, 전력계통과 환경 등에 미치는 긍정적 효과 등을 고려해 볼 때 분산형 전원으로서의 구역전기사업제도는 여전히 적절한 해결책 중 하나로 고려될 수 있다[3, 12].

더구나 분산형 전원으로서의 구역전기사업은 정부가 현재 적극적으로 추진하고 있는 마이크로그리드 구축에 있어서도 현실적인 방안이 될 수 있다[5]. 마이크로그리드는 정의하는 주체나 응용분야에 따라 약간 다르게 표현되지만 일반적으로 일정지역 안에서 다양한 분산전원, 신재생 에너지원 그리고 에너지 저장장치를 기반으로 에너지 공급과 수요를 관리

하는 소규모 전력망을 구축하고, 연계형(외부 전력계통망의 연계) 또는 독립형(계통에 상정사고 발생 시 독립적으로 운영)으로 구분되는 차세대 전력망이다. 이러한 정책 환경을 고려할 때 향후 구역전기사업을 기반으로 신재생에너지 및 에너지 저장장치와 같은 분산전원을 추가로 구축하고 전력시스템 개선을 통하여 마이크로그리드 기능을 제공할 수 있도록 발전시킨다면 에너지 신산업의 핵심모델이 될 수 있다[5, 13].

한편, 2017년 구역전기사업 내 전기·열 공급이 9시간동안 중단된 사례는 여전히 구역전기사업의 구조적, 제도적으로 해결해야 할 문제가 남아있음을 보여준다. 구역전기사업 내 전기를 공급받는 수용가를 보호하고 구역전기사업 본래의 취지인 분산형 전원으로써의 역할을 달성될 수 있도록 최대의 공급 신뢰도를 유지하기 위한 제도개선이 필요한 시점이다.

이에 정부는 구역전기사업자의 설비개선을 위해 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 개선안을 입법 중이다[6]. 개선안에서 주요 공급설비 신뢰도는 N-1, N-2 등과 같이 임의로 선정된 조건만을 고려하는 안전도(Security)를 포함하는 평가이며 설비고장확률을 고려하지 않는 결정론적 방법론을 기반으로 한다.

이에 본 논문에서는 향후 마이크로그리드로서의 역할을 담당할 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도를 장기간의 통계적인 관점에서 보안하고자 확률론적 공급신뢰도 평가방법을 제안하고자 한다. 이는 구역전기사업 해당 공급 구역의 안정적인 전력공급에 영향을 미칠 수 있는 주요공급설비들의 고장확률과 해당 공급 구역 수요변화 등 불확실성을 고려할 수 있다. 구역전기사업계통의 등가모델을 통해 배전계통을 포함하는 발

전계통의 공급신뢰도를 평가할 수 있는 공급지장기대시간(Loss of Load Expectation, LOLE)을 신뢰도 지수로 활용하여 공급신뢰도를 분석하고, 구역전기사업의 장기적인 공급설비의 적정성을 검토하고자 한다.

제 2 절 연구의 구성 및 개요

본 연구에서는 국내 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 측면에서 연계계통의 등가모델을 기반으로 공급설비의 불확실성을 포함한 확률론적인 방법과 신뢰도 지수 LOLE를 활용하여 장기적인 설비계획 혹은 설비운용의 타당성을 검토하였다. 현재 설비구축의무 기준을 고려했을 때 국내 구역전기사업의 공급설비 구성에 대해 재검토 필요성과 그에 대한 대책 방안을 제안하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성하였다.

제 2장에서는 구역전기사업자 정의와 구조적 특징을 분석해 보며 현 제도 및 운용에 따른 공급신뢰도 관점에서의 문제점을 제시하였다.

제 3장에서는 구역전기사업의 공급신뢰도 평가방안을 제시하였다. 연구를 이해하는데 필요한 전통적인 전력계통의 공급신뢰도 평가방법을 소개하고 구역전기사업에 적용할 확률론적 방법 및 신뢰도 지수를 제시했다.

제 4장에서는 사례연구로 연계계통의 등가보조발전기법을 활용한 구역전기사업 모의 전력계통을 기반으로 신뢰도 지수 LOLE를 활용하여 정량적으로 분석하고 공급설비계획과 운영방법의 타당성을 입증하였다.

제 5장에서는 본 논문의 결론으로 연구사항을 종합 정리하고, 추후 연구 사항을 제언하였다.

제 2 장 구역전기사업 제도 분석

제 1 절 구역전기사업 구조 분석

1. 구역전기사업의 정의 및 구조적 특징

구역전기사업은 특정한 공급 구역의 수요에 맞추어 일정규모 이하의 설비를 갖추고 전기를 생산하여 전력시장을 통하지 아니하고 자체 선로를 이용하여 해당 공급 구역의 전기사용자에게 직접 전기를 공급하는 것을 주된 목적으로 하는 사업을 말한다(전기사업법 제2조 제11호).

그림 2-1에서 보듯이 고효율·소형 열병합발전소에서 생산한 전기와 열은 해당 특정 구역 내의 주거시설, 상업시설, 산업시설 등에 자체 배전망과 열 배관망을 통해 직접 공급된다.

구역전기사업 허가기준의 핵심사항은 다른 전기사업자와는 달리 자신이 공급하게 될 구역의 최대 전력수요의 60% 이상의 발전설비용량과 자체 배전망을 구축하도록 하는 공급설비의무기준이다(시행령 제4조).

따라서 허가기준에 따라 구업전기사업자가 최소용량의 공급설비를 구축할 경우 열병합발전설비를 100% 가동으로 생산된 전기 공급량으로도 해당 지역의 수요 변화에 따라 필연적으로 부족하거나 남는 경우가 발생하며 이에 전력시장(전력거래소) 혹은 판매사업자(한국전력)를 통하여 거래하도록 허용함으로써 공급 구역에 대한 안정적인 전력수급이 가능하도록 규정하고 있다(시행령 제19조 제1호).

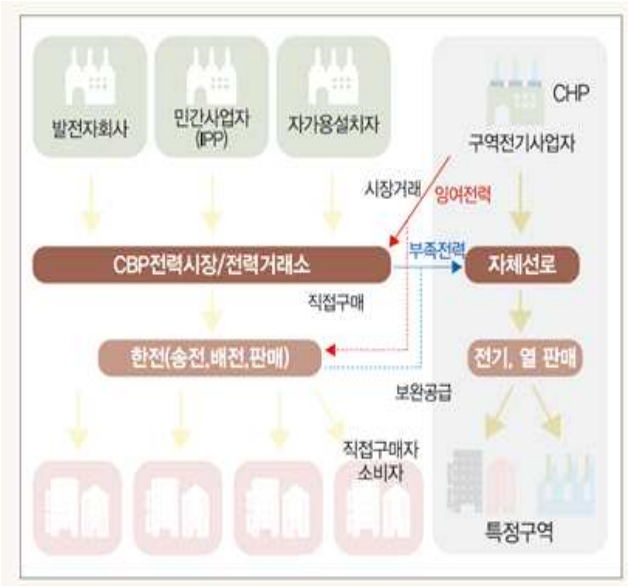


그림 2-1 구역전기사업 시장 구조

그림 2-2는 과부족전력을 거래하기 위한 구역전기사업 전력계통의 구조적 특징을 보여준다. 구역전기사업의 연계접속설비를 통해 설비용량과 전압에 따라 적합한 외부 전력계통에 연계되어 있다.

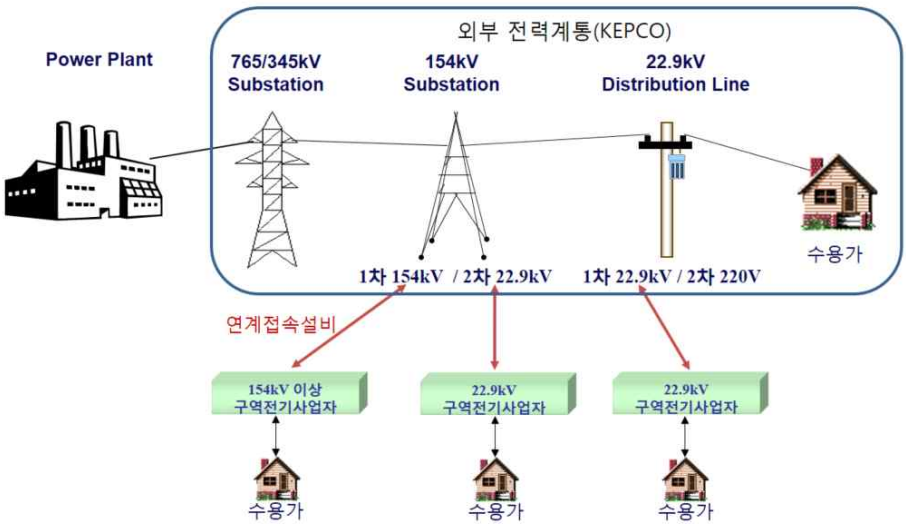


그림 2-2 구역전기사업 전력계통과 외부 전력계통과의 연계

2. 구역전기사업자의 구분 및 현황

표 2-1에서 볼 수 있듯이 구역전기사업에는 전기사업법에 따라 구역전기사업허가를 득한 협의의 구역전기사업자와 집단에너지사업법에 의한 집단에너지사업허가를 얻은 의제구역전기사업자가 있다. 협의의 구역전기사업자와 의제구역전기사업자는 허가의 근거 법률 및 열의 의무적 공급 여부 등에 있어서 차이가 있지만 전기를 생산해 허가 받은 공급 구역 내의 전기사용자에게 직접 공급한다는 점에서는 차이가 없다.

2004년 구역전기사업제도를 새로운 전기사업의 형태로 도입된 이래 2017년 기준으로 우리나라에는 10개 사업자가 13개 사업장에서 상업 운영 중이다[표 2-4]. 현재 협의의 구역전기사업자는 없으며 모두 의제 구역전기사업자(Community Energy System, CES)이다.

표 2-1 구역전기사업자의 구분

<table>
<tr><th>내 용</th><th>전기사업법</th><th>시행령(안)</th><th>접속구분</th></tr>
<tr><td rowspan="3">구역전기사업자
설비용량 상한</td><td>협의의 구역전기사업자
⇒ 대통령령이 정하는 규모 이하</td><td>3만5천kW 이하</td><td>22.9kV,
154kV</td></tr>
<tr><td rowspan="2">집단에너지사업자 :
30만kW이하
=의제구역전기사업자
=구역형집단에너지사업
(Community Energy System, CES)</td><td>지역난방 : 15만kW이하</td><td rowspan="2">154kV이상</td></tr>
<tr><td>산업단지 : 25만kW이하</td></tr>
<tr><td>구역전기사업자
설비용량 하한</td><td>당해 공급 구역 전력수요의
50% 이상</td><td>당해 공급 구역 전력수요의
60%이상</td><td></td></tr>
</table>

자료 : 전기사업법 및 시행령

3. 구역전기사업의 공급대상

구역전기사업 허가 기준에는 두 종류이상의 배전사업자의 사업구역 또는 구역전기사업자의 특정한 공급 구역 중 그 전부 또는 일부가 중복되지 아니할 것을 규정하고 있다(전기사업법 제7조 제3호). 따라서 구역전기사업은 기존 전기사업자의 사업 지역을 제외하고 신규 개발 지역을 대상으로 사업 허가를 받을 것이다.

주 공급 대상은 공동주택을 포함하여 냉・난방수요가 많은 병원, 호텔, 백화점 등 단일건물 혹은 아파트단지, 컨벤션 센터, 전철역사 등 소규모의 집중적인 에너지 소비지역을 대상으로 주로 LNG가스로 열병합발전기, 터빈을 이용하여 냉·난방 및 전기를 일괄하여 생산・공급한다[9].

제 2 절 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 제도 분석

1. 전력계통의 신뢰도(Reliability) 정의

전력계통에서 신뢰도 의미는 모든 가용설비와 지원설비의 운전 및 제어능력을 고려하여 운전제약조건을 만족하면서 수요자의 부하를 공급할 수 있는 정도를 의미한다. 세부적으로 적정도(Adequacy), 안전도(Security), 안정도(Stability)로 개념을 구분하여 적용하고 있다[7, 14, 15].

적정성은 전력계통을 구성하고 있는 요소들의 사고를 상정하지 않고 정상 운영 상태에서의 설비의 구비정도를 나타내며 발전설비 용량, 예비전

력 및 전력수송 설비(송배전설비)확보 정도를 의미한다. 안전도는 정상상태에서 발전기 또는 송전선로의 고장, 부하 급변 등 예기치 못한 고장 시 전력계통이 붕괴되지 않고 전압, 주파수 등을 유지하면서 계통이 안정된 운전을 지속할 수 있는 상태를 유지, 전력을 공급할 수 있는 정도이다. 안정도란 전력계통에 연결되어 있는 발전기가 외부 고장이나 계통변화 등이 발생한 이후 안정적으로 운전할 수 있는 능력을 말하며, 일반적으로 정태안정도(완만한 부하변동과 같은 미소한 변화발생 시의 안정도)와 과도안정도(급격한 변화 발생 시 안정도)로 구분할 수 있다.

1980년대까지는 주로 전력계통의 신뢰도라 함은 발전계통이든 송전계통이든 정적인 상태에서 공급이 얼마나 잘 이루어지나를 평가하는 소위 공급 적정도(Adequacy)를 대상으로 하였고 근래까지 실 계통에서는 중요 전력계통의 기기 및 요소들의 하나(N-1) 또는 둘(N-2)의 상정사고에도 견딜 수 있도록 안전도(Security)평가까지 포함하여 계통의 계획을 수립하여 왔다[7].

2. 구역전기사업 공급설비용량과 신뢰도

전력소비는 시시각각 변화하기 때문에 발전용량은 년 중 최대 전력수요를 100% 감당할 수 있을 만큼 산정되어야 한다. 그 뿐만 아니라 예기치 못한 설비의 고장, 부하의 증가 등 발생 가능한 수급불안에 대응하여 발전설비는 년 중 최대부하 대비 적정수준 이상의 예비력을 확보하는 것이 일반적인 발전용량을 산정하는 방법이다[8].

그럼에도 불구하고 전기사업법 시행령에 의해 구역전기사업은 해당 공급 구역 내 최대 전력수요의 60% 이상을 공급할 수 있는 발전설비를 갖추어야 한다는 공급설비의무기준은 구역전기사업자의 경제성을 감안한 사항이다. 이는 2006년 70% 이상에서 60% 이상으로 초기 설비투자 비용절감 등 구역전기사업의 투자 활성화를 위해 완화된 사항이다[4]. 최대 전력수요는 년 중 발생하는 시간이 짧기 때문에 발전설비의 낮은 가동률과 최대 전력수요에 맞춰 100% 이상 발전설비를 갖추도록 하는 경우, 투자비의 과다라는 문제점을 볼 때 이러한 구역전기사업의 공급설비의무기준은 어느 정도 수긍할 수 있다.

그러나 외부 전력계통이나 연계접속설비 고장으로 구역전기사업 전력계통이 독립적인 형태로 운전하게 될 경우에는 이때의 구역 내 전력수요에 따라 공급지장 여부가 다르겠지만 공급설비를 100% 가동 시에도 공급지장이 발생할 수 있는 가능성이 존재하며 이는 이미 공급신뢰도 측면에서 문제점을 포함하고 있는 것이다.

또한 구역전기사업 공급 구역 내 예기치 못한 공급설비 고장, 정비나 수리를 위한 공급설비 정지, 고장복구 시 발전기 기동 실패 등 비상시에는 외부 전력계통에 전력공급을 전적으로 의존할 수밖에 없는 상황이 발생하며, 연계접속설비의 운전제약에 따라 필요한 전력수요만큼 전력공급을 받지 못해 공급지장을 초래할 수도 있다.

즉, 구역전기사업 내 전기사용자에게 안정적인 전력공급 보장을 위해 공급신뢰도 측면에서 공급 구역 내 주요 공급설비의 용량 검토도 필요하다.

3. 구역전기사업 운용상 특징과 신뢰도

표 2-2는 구역전기사업자의 자체 전기생산량을 보여준다[10]. 계획 시 최대수요의 60% 이상 공급설비의무기준과는 달리 실제 운용 시 대부분의 구역전기사업자는 자체생산량이 60% 이하인 것을 볼 수 있다. 현재 대부분의 구역전기사업자들은 경영난과 열 공급여부에 따라 운용상 자체 공급설비를 통한 전력공급보다는 외부 전력계통을 통한 전력공급의 의존도가 큼을 보여준다. 이에 연계접속설비의 역할은 매우 중요해지며 구역 내 안정적인 전력수급에 미치는 영향력이 크다고 할 수 있다.

따라서 구역전기사업 내 자체 발전설비뿐만 아니라 연계접속설비의 불확실성을 포함해 계통의 공급신뢰도를 평가하는 것은 매우 중요하다.

표 2-2 구역전기사업자 전기생산량

	공급지역	사업자	전기생산량MWh)		
			자체생산	한전수전	자체생산율
1	고양 삼송지구	한국지역난방	-	-	-
2	서울 동남권유통단지				
3	서울 상암2지구				
4	가락 래미안APT				
5	부산 정관지구	부산정관에너지㈜	86,930	112,013	43.7%
6	광명역세권	(주)삼천리	23,879	73,786	24.4%
7	대전 학하지구	(주)충남도시가스	66,608	12,732	84.0%
8	천안 청수지구	중부도시가스㈜	45,537	31,431	59.2%
9	양주 고읍지구	TPP㈜	2,587	60,817	4.1%
10	신도림 디큐브시티	대성산업㈜	99	52,148	0.2%
11	대구 죽곡1, 2지구	대성에너지㈜	8,334	53,440	13.5%
12	아산 탕정지구	삼성물산㈜	6,666	27,690	19.4%
13	서울 사당극동APT	㈜GIMCO	7,594	5,372	58.6%
계	13구역	10개 사업자			

자료 : 2017년 집단에너지 편람('16년 실적자료)

4. 구역전기사업 경제성과 신뢰도

구역전기사업 허가 시, 공급 구역의 최대 전력수요 산정은 “구역전기사업자의 공급 구역 전력수요 산정에 관한 업무처리규정”에 따른다.

기존지역과 신규지역으로 최대 전력수요를 산정하는 방법은 다르지만 현 제도상 구역전기사업 허가 시 산정된 최대 전력수요를 기반으로 최종설비구축계획을 세운다.

그러나 여기서 문제점은 표 2-4의 허가세대수와 공급 중인 세대수(입주율)에서 보듯이 새로운 대규모 택지단지 개발 시 장기간 개발기간동안 수용가 입주 상황 변동이 크다는 것이다[10]. 또한 구역전기사업자 13개 사업장을 조사한 결과 장기간의 택지개발동안 계획상의 일부분이 축소되거나 취소되는 경우가 발생하여 현재 공급설비용량이 년 최대부하보다 훨씬 상회하는 사업장이 몇 개소가 있었다. 이렇듯 구역전기사업 허가조건으로 인해 구역전기사업개시부터 택지건설이 준공된 경우를 제외하고 장기간에 걸쳐 택지개발이 단계적으로 시행될 경우, 사업 초기에도 공급설비의무기준을 만족시켜야하기 때문에 공급신뢰도는 높을 수 있으나 투자 비용부담을 가중시킨다고 볼 수 있다. 사업초기 실수요부하가 적음에도 불구하고 최종설비구축으로 잉여설비가 존재하게 될 뿐만 아니라 건설계획 변동 및 취소는 결과적으로 수요예측실패의 원인이 되며 과잉설비투자에 대한 책임은 구역전기사업자가 모두 지게 된다.

이에 구역전기사업의 경제성 있는 건설 및 운용을 위해 단계별 택지개발에 따른 수요부하예측을 통해 단계적 전력공급설비계획의 필요성이 요

구되며 이에 따른 적절한 공급신뢰도 목표가 필요하다.

구역전기사업자는 비용절감과 이윤의 극대화를 하는 동시에 소비자에게 원하는 수준의 전력을 안정적이고 경제적으로 공급해야 하는 상황이다. 초기 발전설비투자비용이 매우 높은 수준이기 때문에 합리적인 설비투자 계획은 매우 중요하며 이는 경제논리를 기반으로 계획될 것이다.

또한 전력계통은 향후 수요증가 등 불확실성에 대응하여 지속적인 공급 신뢰도 확보를 위해서는 추가설비 투자가 필요하지만 경제성과 신뢰도는 상충관계이기 때문에 안정적인 전력공급과 동시에 경제논리를 고려한 적정수준의 전력계통 공급신뢰도를 산정할 필요성이 요구된다.

5. 구역전기사업 공급신뢰도 기준 분석 및 문제점

구역전기사업자는 자신의 공급 구역 내 모든 전력 설비와 전력망을 관리하고 계통 내 모든 전력사용자의 공급지장에 대한 책임을 져야한다.

그러나 표 2-3에서 보는 바와 같이 구역전기사업 허가 시, 구역전기사업의 주요 공급설비(발전소, 전력계통간의 접속, 예비공급설비 등)사항은 상위규정 체계에서 별도로 규정되어 있지 않고 송배전용 전기설비 이용규정에 의해 사업자간의 자율적인 합의에 의존하므로 필수 조항은 아니다. 이에 표 2-4에서 보는 바와 같이 연계선로의 회선 수가 1개인 경우가 발생하며 이는 공급신뢰도 측면에서 문제점을 발생시킬 수 있다.

표 2-3 구역전기사업의 주요 공급설비 신뢰도 현 기준 체계

✓ **정 부 : 전기사업법** 제27조의2 **전기사업법시행령** 제17조의2 **전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준** 제3조	전력계통의 신뢰도 유지에 관한 현행 상위 규정 체계 : **단순하고, 포괄적 사항만 규정**
✓ **거래소 : 전력시장 운영규칙** ✓ **한 전 : 송배전용 전기설비 이용규정(송전접속)**	계통 신뢰도 유지 기준 준수 세부사항 : **사업자의 자율적인 협조 및 합의 의존**

이에 정부는 구역전기사업자의 공급신뢰도 개선방안으로 구역전기사업 시설기준을 추가한 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준을 행정예고 중이고 구역전기사업자가 갖추어야 할 예비전력, 기동전력, 비상시 운전 방안수립 등 설비 기준을 제시하여 설비개선 유도를 계획 중이다[6].

다만, 구체적인 설비개선방법은 규정하지 않고 사업자가 비용 및 설비 특성 등을 고려하여 적합한 방법으로 시설할 수 있도록 사업자의 자율적 시행에 따르지만 신뢰도 유지를 위한 설비개선 미 준수에 대한 별도제제 조치사항은 없다. 이에 구역전기사업자는 초기 설비 투자비용 부담완화를 위해 최소한의 발전설비를 구성할 우려가 있고 이윤과 관련이 없거나 비용이 수반되는 경우, 기준 미 준수 및 지연 등의 사례가 발생할 우려가 있다. 이에 구역전기사업 계통 내 설비 고장 발생 시 잠재적인 신뢰도 맹점이 발생할 수 있는 문제점은 여전히 남아 있다.

표 2-4 구역전기사업자의 설비 현황(2016년 말 기준)

	공급지역	사업자	사업 허가	상업 운전	발전용량		연계선로	세대수		입주율 (%)
					MW*대	Total[MW]		허가	공급	
1	고양 삼송지구	한국지역난방	‘07.08	‘11.12	GT 25*2+ST 49	99.0	154kV 2T/L	22,128	12,010	54.3
2	부산 정관지구	부산정관에너지㈜	‘99.12	‘08.01	GT 29.48+ST 20.67	50.15	154kV 1T/L	27,813	22,954	82.5
3	광명역세권	(주)삼천리	‘05.12	‘10.04	GT 17.3*2+ST 11.4	46.0	154kV 2T/L	20,247	15,271	75.4
4	서울 동남권유통단지	한국지역난방	‘06.08	‘09.04	GT 32	33.8	154kV 2T/L	16,954	11,142	65.7
5	대전 학하지구	(주)충남도시가스	‘06.09	‘13.03	GE 4.18*6+1	26.08	25.8kV 2D/L	7,974	4,890	61.3
6	천안 청수지구	중부도시가스㈜	‘05.05	‘09.01	GE 8.4*2+8.2	25	25.8kV 2D/L	5,417	4,621	85.3
7	양주 고읍지구	TPP㈜	‘05.03	‘09.06	GE 3*7	21.0	25.8kV 2D/L	8,724	7,572	86.8
8	신도림 디큐브시티	대성산업㈜	‘09.01	‘11.07	GE 3*3	9.0	25.8kV 2D/L	524	524	100.0
9	대구 죽곡1, 2지구	대성에너지㈜	‘05.01	‘07.12	GE 3*3	9.0	25.8kV 2D/L	11,436	7,378	64.5
10	아산 탕정지구	삼성물산㈜	‘06.09	‘09.01	GE 3.5*2	7.3	25.8kV 1D/L	3,953	3,953	100.0
11	서울 상암2지구	한국지역난방	‘06.09	‘10.04	GE 3*2	6.0	25.8kV 2D/L	2,865	2,865	100.0
12	서울 사당극동APT	㈜GIMCO	‘04.11	‘05.12	GE 0.334*3+0.327*3	2.0	25.8kV 1D/L	3,650	2,795	76.6
13	가락 래미안APT	한국지역난방	‘06.06	‘08.01	GE 0.54*2	1.08	25.8kV 1D/L	919	919	100.0
계	13구역	10개 사업자				335.41				

자료 : 2017 집단에너지 편람(‘16년 실적자료) 및 인터뷰 *GT : Gas Turbine, GE : Gas Engine, ST : Steam Turbine

제 3 장 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 평가

제 1 절 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도

1. 전력계통의 공급신뢰도 평가 방법

신뢰도 평가는 전력계통의 계획이나 운영 측면에서 전력계통의 발전설비가 전력수요를 공급할 수 있는 능력이 적절한가를 확인할 수 있는 수단으로써 그 필요성을 갖는다.

세계적으로 통용되고 있는 전력계통의 공급신뢰도 평가 방법은 확률적 방법의 반영 유·무에 따라 결정론적 방법과 확률론적인 방법으로 구분할 수 있다. 전력계통이 적절한 성능을 발휘할 수 있는 능력을 분석하여 정량적으로 표현하기 위해 많은 공급신뢰도 지수들이 있다[7, 14, 15].

1.1 결정론적(Deterministic) 신뢰도 평가방법 및 지수

결정론적 신뢰도 평가방법은 계통을 구성하는 모든 요소들은 운전상태가 100% 완전하다고 보고(고장관련 확률을 무시함) 공급여분의 정도(예비력 등) 혹은 상정사고 즉, N-1, N-2 등과 같이 임의로 선정된 조건만을 고려하는 방법이다. 즉, 전형적으로 몇 개의 발생가능하다고 판단되는 상정사고에 대하여만 해석한다.

이와 같은 결정론적 공급신뢰도 평가방법이 요구하는 설비수준은 높은

신뢰도 결과를 보이며 안정적인 운영이 가능하게 하지만 너무 과도한 설비용량을 요구할 가능성이 있다.

결정론적 신뢰도 지수로는 설비예비력, 설비예비율, 최대단위기법, 건기법 등이 있다[7].

1.2 확률론적(Probabilistic) 신뢰도 평가방법 및 지수

확률론적 신뢰도 평가 방법은 대규모 전력 계통에서 발생 가능한 거의 모든 상정사고를 대상으로 모든 요소들의 고장관련 확률을 고려하면서 신뢰도를 분석하는 것이다.

결정론적 신뢰도 평가방법은 설비의 고장을 100%로 고려하고 전형적인 상정사고 시나리오 검토를 통해 해석하는 평가방법으로 그에 따른 설비용량의 요구는 과잉투자, 비경제적인 운영과 사회적 손실을 초래할 수 있다. 이에 대부분의 국가는 예상치 못한 고장 등에 의한 공급 불확실성과 기온변화에 따른 수요 불확실성을 고려하기 위해 기존 결정론적 신뢰도 평가방법에서 확률론적 신뢰도 평가방법으로 전환되는 추세이다[7].

확률론적 신뢰도 지수로는 공급지장기대시간(Loss of Load Expectation, LOLE), 공급지장확률(Loss of Load Probability, LOLP), 공급지장전력기대치(Expected Demand Not Served, EDNS), 공급지장에너지기대치(Loss of Energy Expectation, LOEE), 에너지신뢰도지수(Energy Index of Reliability, EIR), 정전 빈도(Frequency) 및 지속시간(Duration) 등 많은 종류의 지수들이 존재한다[7, 14].

2. 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 평가

표 3-1은 구역전기사업자 전력계통의 공급신뢰도 개선방안을 포함한 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 개선안의 주요내용이다[6].

주요 공급설비 신뢰도는 단일고장(N-1), 이중고장(N-2) 같은 임의의 상정사고해석만을 고려한 안전도(Security)확보에 초점을 맞추며 설비고장 확률을 고려하지 않는 결정론적 방법론을 바탕으로 구역전기사업자에게 설비개선을 유도하고 있다.

또한 단시간 내 전력공급재개, 공급중단 시간 및 최소화라는 다소 불명확하고 애매모호한 조항으로 정의되어 좀 더 세부적인 이행방법을 고안해 낼 필요성이 요구된다.

표 3-1 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 개정안 (제2017-389호)

ㅇ 주요 공급설비 신뢰도(제54조)
- 단일고장 발생시 단시간 내에 전력의 공급재개가 가능하도록 **예비전력·기동전력 등을 구비**
- 이중고장 발생시 공급중단 시간 및 범위가 최소화되도록 부하차단, 단독운전, 비상선로 연결등 **비상공급방안 수립·운영**
ㅇ 배전설비 신뢰도(제55조)
- 구역전기사업자의 배전설비에 대해서는 한전과 동일한 수준으로 운영·관리토록 배전사업자의 의무를 준용
- 산업단지 사업장은 고객수가 적고 배전전압이 다양하여 배전선로간 상호 연계의 적용이 어려우므로 예외 인정

위 개정안에서 주요 공급설비는 구역전기사업자의 발전기, 송·수전선로, 변압기 등으로 정의되었고 전형적인 상정고장(N-1, N-2)만을 고려하기 때문에 고장발생가능성이 적은 상태를 고려하지 않는다면 과잉 투자될 우려가 있으며 반면에 고장발생 가능성이 크지만 전형적인 상정고장에 포함되지 않아 신뢰도 산정에서 제외되는 경우가 발생할 수 있다. 또

한 전력공급 중 설비사고는 불시에 발생하는 경우가 현실적이다.

이에 장기간의 통계적 관점에서 예상치 못한 모든 설비의 고장 발생가능성을 고려할 수 있는 확률론적 공급신뢰도 평가방법을 구역전기사업 전력계통에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

3. 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 지수

일반적으로 전력계통 신뢰도 평가는 전력계통의 계층구조(발전·송전·배전 계통)에 따라 각 계통에 맞는 합리적인 평가방법을 갖는다[7, 15]. 구역전기사업은 자체 발전계통, 연계접속설비 및 배전계통을 포함하여 전력판매까지 담당하므로 자체 수용가에게 외부 전력계통과 비교하여 동등한 전력품질과 신뢰도로 제공하여야 의무가 있다.

하지만 대표적인 배전계통의 신뢰도 지수인 SAIDI(System Average Interruption Duration Index, 호당정전시간), SAIFI(System Average Interruption Frequency Index, 호당정전횟수) 등은 배전선로와 배전기기 등의 고장으로 인한 공급지장 시간, 빈도 등을 평가하기 때문에 발전설비와 연계접속설비를 포함한 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도에 적용하기에는 한계가 있다[7, 14, 15]. 즉, 구역전기사업 전력계통 구조적 특성상 연계접속설비와 자체 발전설비의 고장확률을 포함하여 공급신뢰도를 분석해야 한다.

이에 전 세계적으로 전력설비 건설 계획 단계에서 대표적으로 사용하는 확률론적 공급신뢰도 지수인 공급지장기대시간(LOLE)을 활용하여 구역전기사업 전력계통의 설비구축에 대한 적정성을 검토하고자 한다.

제 2 절 전력계통의 공급신뢰도 지수 LOLE

1. 공급지장기대시간(LOLE) 정의

공급지장기대시간(Loss of Load Expectation, LOLE)은 전력이 고객에게 얼마나 잘 공급되는지를 평가하는 확률론적인 정전시간 즉, 정전시간의 기대치를 나타내는 신뢰도 지수이다. 주어진 시간(일반적으로 1년)동안 일최대부하(Daily Peak Load) 또는 시간대별최대부하(Hourly Peak Load)가 가용발전용량을 초과하여 정전이 일어나는 시간(days/year 또는 hours/year)의 단위로 표시되는 평균값이다.

또한 LOLE는 현재 전 세계적으로 전력계통의 전력설비 건설 계획단계에서 가장 많이 사용되는 확률론적 신뢰도 지수이다. 우리나라는 안정적인 전력 공급을 위해 전력설비의 건설 계획을 수립하는 전력수급기본계획에서 LOLE를 0.3 days/year로 정의하고 있으며 세계 각국의 LOLE은 표 3-2과 같다[2].

표 3-2 해외 및 국내 공급신뢰도 기준

구 분	북미	영국	아일랜드	벨기에	프랑스	스페인	네덜란드	폴란드	한국
예비율 (%)	11～20	-	-	-	-	10	-	18	13
LOLE (/년)	0.1일	3시간	8시간	3시간	3시간	-	4시간	-	0.3일

자료: KEMRI 전력경제 Review 제10호(2018), www.kepco.co.kr/KEMRI

2. 전력계통의 LOLE 계산을 위한 부하곡선 모델링

LOLE는 1년 동안 배전계통의 수요부하가 가용발전용량을 초과하여 정전이 일어나는 시간에 대한 기댓값으로 LOLE 계산을 수행하기 위해서 수요부하분포 데이터가 필요하다.

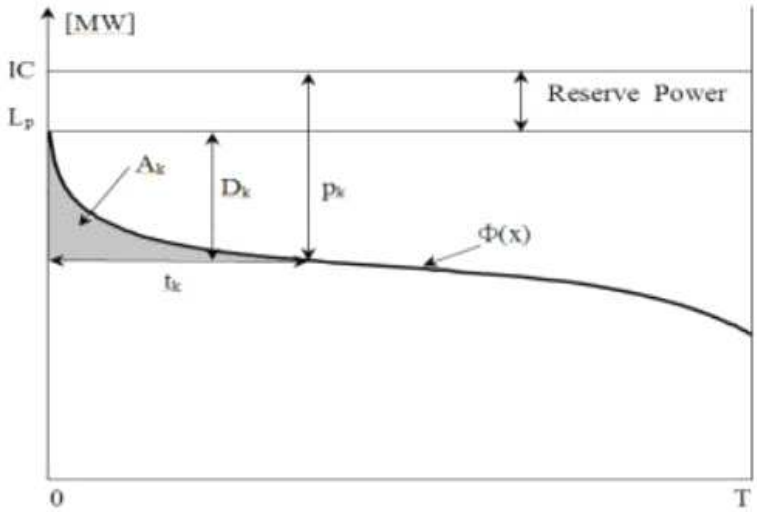


그림 3-1 발전계통의 신뢰도지수의 산정을 위한 개념[7]

$$LOLE = \sum_{k \in S} p_k t_k \quad \text{[hours/year or days/year]}$$

여기서, S : 전력부족과 관련된 모든 계통상태의 집합

p_k : 계통상태 k의 출현확률

t_k : 계통상태 k의 시간[hours or days]

A_k : 계통상태 k에서의 공급지장전력량[MW]

I_C : 발전계통의 총 설비용량[MW]

L_p : 최대부하[MW]

부하분포는 어느 정도 주기적인 특성을 띄기 때문에 과거부하의 측정값을 이용하며 활용목적에 따라 365개의 일최대부하(Daily Peak Load) 데이터와 8760개의 시간대별최대부하(Hourly Peak Load) 데이터를 활용할 수 있다. 그림 3-1에서 일최대부하(Daily Peak Load)을 이용할 경우 T는 365일이고 시간대별최대부하(Hourly Peak Load)을 이용할 경우 T는 8760시간이다.

부하의 경우 계절별 시간별로 변동성이 크기 때문에 내림차순으로 재정렬하여 활용한다. 부하분포가 시간 순으로 배열된 곡선을 부하변동곡선(Load Variation Curve, LVC)라고 하고, 내림차순으로 재 정렬한 곡선은 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)라고 한다[7].

1) 시간별부하변동곡선(Hourly Load Variation Curve, HLVC)

1년 동안 1시간마다의 평균부하 8760개를 모은 것이다. 한편, 실제 각각의 부하를 최대부하로 나눈 곡선을 패턴(형태)라고 한다.

2) 시간별부하지속곡선(Hourly Load Duration Curve, HLDC)

시간별부하변동곡선을 크기가 큰 순서대로 재 정렬한 곡선을 시간별부하지속곡선(만일 최대부하로 정규화한 것이라면 패턴이라고 함)이라고 한다.

3) 일최대부하변동곡선(Daily Peak Load Variation Curve, DPLVC)

연간 일최대부하 365개의 값을 해당연도의 부하변동곡선으로 구성하고

이러한 변동곡선을 일최대부하변동곡선(만일 년최대부하로 정규화한 것이라면 패턴이라고 함)이라고 한다.

4) 일최대부하지속곡선(Daily Peak Load Duration Curve, DPLDC)

일일최대부하변동곡선을 크기가 큰 순서대로 재 정렬한 곡선을 일최대부하지속곡선(만일 년최대부하로 정규화한 것이라면 패턴이라고 함)이라고 한다.

장기전원개발 등 계통확충계획에서는 매 시간의 값보다 하루하루의 최대부하가 중요하다[7]. 이에 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도 지수 LOLE 계산을 위해 365개의 일최대부하 데이터를 이용하여 크기순으로 정렬한 일최대부하지속곡선(DPLDC)을 사용하였다.

3. 전력계통의 LOLE 계산을 위한 설비고장확률(FOR)

고장확률(Forced Outage Rate, FOR)은 임의의 전력계통의 구성요소(발전기, 선로, 변압기 등)의 미래 임의의 시각에서 사고 상태로 발견된 확률로 정의된다.

$$FOR = \frac{\text{forced outage hours}}{\text{inservice hours} + \text{forced outage hours}}$$

발전기의 고장확률(FOR)은 과거 이력을 바탕으로 계산되는 통계치를 이용한다[7].

표 3-3 발전기의 고장확률(FOR)

TYPE	MIN[MW]	MAX[MW]	FOR
NUCLEAR	0	400	0.10771
	400	800	0.10625
	800	1000	0.09686
	1000	999999	0.11807
OIL	0	100	0.03156
	100	200	0.04996
	200	300	0.07508
	300	400	0.06257
	400	600	0.0317
	600	800	0.02853
	800	1000	0.02906
	1000	999999	0
GAS	0	100	0.03799
	100	200	0.04023
	200	300	0.02644
	300	400	0.05043
	400	999999	0.04463
COAL	100	200	0.03538
	200	300	0.04425
	300	400	0.05962
	400	600	0.05309
	600	800	0.04532
	800	1000	0.04244
	1000	999999	0.06155

*자료: 최재석, 전력계통 신뢰도 공학, 2012[7].

4. LOLE 계산과정 단계

단계 1. 발전기들의 사고용량확률분포 표*를 작성한다.

* 1개의 발전기 상태(State)는 “운전(1)”, “고장(0)”의 2가지이다. 따라서 발전기가 N개라면 운전 상태와 고장 상태의 모든 가능한 경우의 상태(State)는 2^N개가 된다.

단계 2. 발전기들의 상태에 따라 각 가용용량(Available Capacity, AC)를 구한다.

단계 3. 부하변동곡선으로부터 부하지속곡선을 작성한다.

단계 4. 부하에 대하여 각 상태별 공급지장 시간을 구한다.

단계 5. 각 상태별 확률과 공급시장 시간을 곱하여 정전시간의 기대치를 구한다.

단계 6. 각 상태별 정전시간 기대치를 모두 합하여 신뢰도 지수 LOLE를 구한다.

제 4 장 사례 연구

제 1절 샘플 계통의 공급신뢰도 평가

1. 부하크기와 발전기 구성에 따른 LOLE

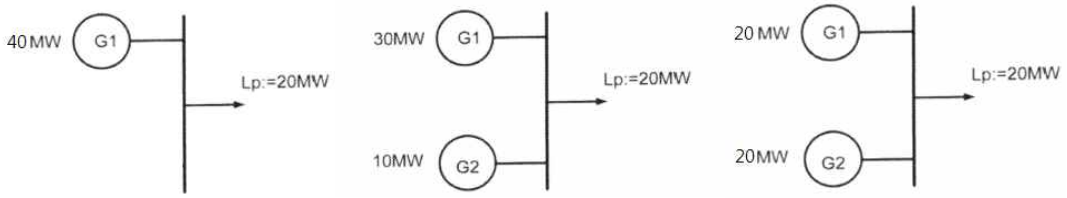
일반적으로 전력계통은 최대수요부하 100%를 만족하고 전력설비 고장시 안정적인 전력공급을 위한 공급예비율과 설비예비율을 가지고 있다. 하지만 구역전기사업 내 전력계통은 허가기준에 따라 최대수요부하 60% 이상을 만족하는 설비용량으로 구축되므로 공급지장기대시간(LOLE) 측면에서 일최대부하의 크기, 발전설비용량, 발전기 구성 방법의 관계에 따른 기댓값을 비교해 보았다.

1.1 설비 용량이 최대수요부하의 100% 초과 일 때

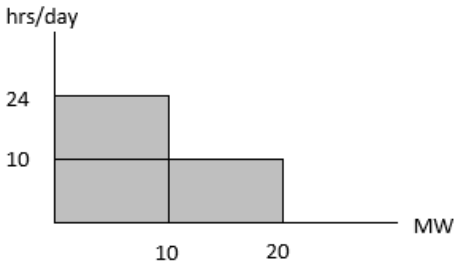
그림 4-1은 외부 전력계통으로부터 독립된 발전계통이며 동일한 일최대부하 20MW가 접속된 전력계통이다. 구내 발전기의 총 발전용량은 40MW로 동일하지만 구내 발전기의 다른 구성(변수 : 발전기 대수와 용량)에 따른 전력계통의 공급신뢰도지수 LOLE를 분석해 보자.

발전기 모두 고장확률(Forced Outage Rate, FOR)은 0.1이다. 어느 하루의 일최대부하가 20MW이며 24시간동안 부하는 20MW는 10시간,

10MW는 14시간 동안 지속된다. 여기서 AC(Available Capacity)는 가용용량을, OC(Outage Capacity)는 정전용량을 의미한다.



a)발전기 1대 구성 b)발전기 2대 구성 c)발전기 2대 구성



d) 일간 역부하지속곡선

그림 4-1 신뢰도계산 예, 발전기 구성 및 일간 역부하지속곡선(1)

1) 발전기 1대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가

표 4-1 발전기 1대인 계통 입력데이터

발전기 No	TYPE	발전기용량	FOR
#1	G1	40	0.1

표 4-2 발전기 1대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가

State	G1 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	40	40	0	0.9	0	0
2	0	0	40	0.1	24	2.4
Total				1.0		2.4

2) 발전기 2대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가(1)

표 4-3 발전기 2대인 계통 입력데이터(1)

발전기 No	TYPE	발전기용량	FOR
#1	G1	30	0.1
#2	G2	10	0.1

표 4-4 발전기 2대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가(1)

State	G1 [MW]	G2 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	30	10	40	0	0.9×0.9=0.81	0	0
2	30	0	30	0	0.9×0.1=0.09	0	0
3	0	10	10	10	0.1×0.9=0.09	10	0.90
4	0	0	0	20	0.1×0.1=0.01	24	0.24
Total					1.0		**1.14**

3) 발전기 2대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가(2)

표 4-5 발전기 2대인 계통 입력데이터(2)

발전기 No	TYPE	Capacity[MW]	FOR
#1	G1	20	0.1
#2	G2	20	0.1

표 4-6 발전기 2대인 계통공급신뢰도 LOLE 평가(2)

State	G1 [MW]	G2 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	20	20	40	0	0.9×0.9=0.81	0	0
2	20	0	20	0	0.9×0.1=0.09	0	0
3	0	20	20	0	0.1×0.9=0.09	0	0
4	0	0	0	20	0.1×0.1=0.01	24	0.24
Total					1.0		**0.24**

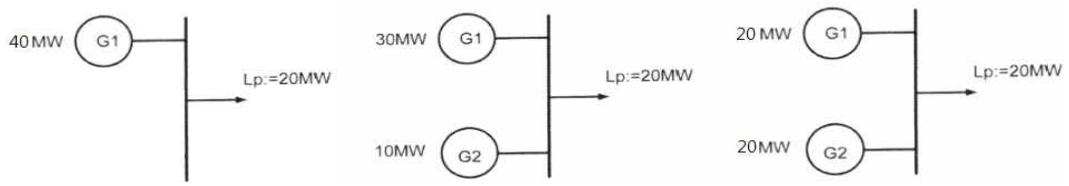
4) 발전기 구성에 따른 LOLE 평가 결과

LOLE [hrs/day]		
1) 발전기 1대 (G1=40MW)	2) 발전기 2대 (G1=30MW, G2=10MW)	3) 발전기 2대 (G1=20MW, G2=20MW)
2.4	1.14	0.24

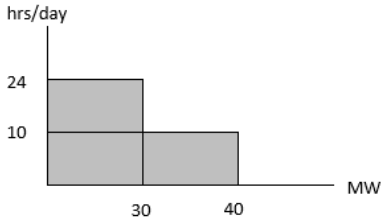
동일한 부하조건과 고장확률일 경우, 발전기 구성에 따라 LOLE를 비교해 보면 2대일 때가 1대보다 LOLE가 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 발전기 2대가 용량이 서로 다를 때에도 LOLE의 값에 변화가 있음을 볼 수 있다. 특히 발전기 2대로 용량을 똑같이 나눌 때 가장 신뢰도가 좋다는 것을 알 수 있다. 이는 년 중 최대부하 대비 적정수준 이상의 예비력을 확보하는 일반적인 발전계통에도 적용되는 사항이다.

1.2 설비 용량이 최대수요부하의 100% 일 때

앞선 1.1의 사례와 동일한 설비구조이지만 어느 하루의 일최대부하가 40MW이며 24시간동안 부하는 40MW는 10시간, 30MW는 14시간 동안 지속된다.



a)발전기 1대 구성 b)발전기 2대 구성 c)발전기 2대 구성



d) 일간 역부하지속곡선

그림 4-2 신뢰도계산 예, 발전기 구성 및 일간 역부하지속곡선(2)

1) 발전기 1대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가

표 4-7 발전기 1대인 계통 입력데이터

발전기 No	TYPE	발전기용량	FOR
#1	G1	40	0.1

표 4-8 발전기 1대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가

State	G1 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	40	40	0	0.9	0	0
2	0	0	40	0.1	24	2.4
Total				1.0		2.4

2) 발전기 2대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가(1)

표 4-9 발전기 2대인 계통 입력데이터(1)

발전기 No	TYPE	발전기용량	FOR
#1	G1	30	0.1
#2	G2	10	0.1

표 4-10 발전기 2대인 계통 공급신뢰도 LOLE 평가(1)

State	G1 [MW]	G2 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	30	10	40	0	0.9×0.9=0.81	0	0
2	30	0	30	10	0.9×0.1=0.09	10	0.9
3	0	10	10	30	0.1×0.9=0.09	24	2.16
4	0	0	0	40	0.1×0.1=0.01	24	0.24
Total					1.0		3.3

3) 발전기 2대인 계통의 공급신뢰도 LOLE 평가(2)

표 4-11 발전기 2대인 계통 입력데이터(2)

발전기 No	TYPE	Capacity[MW]	FOR
#1	G1	20	0.1
#2	G2	20	0.1

표 4-12 발전기 2대인 계통공급신뢰도 LOLE 평가(2)

State	G1 [MW]	G2 [MW]	AC [MW]	OC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	20	20	40	0	0.9×0.9=0.81	0	0
2	20	0	20	20	0.9×0.1=0.09	24	2.16
3	0	20	20	10	0.1×0.9=0.09	24	2.16
4	0	0	0	40	0.1×0.1=0.01	24	0.24
Total					1.0		4.56

4) 발전기 구성에 따른 LOLE 평가 결과

LOLE [hrs/day]		
1) 발전기 1대 (G1=40MW)	2) 발전기 2대 (G1=30MW, G2=10MW)	3) 발전기 2대 (G1=20MW,G2=20MW)
2.4	3.3	4.56

설비 용량이 최대수요부하의 100% 일 때 발전기를 여러 대로 나누는 것은 1.1의 사례와 같은 일반적인 발전계통에서 발전기 대수가 증가 시 LOLE가 감소하는 결과와는 반대이다. 이는 공급 구역 내 부하 특성과 발전기의 용량과의 관계에 따른 것으로 볼 수 있다. 전체 공급 용량이 최대부하보다 작을 경우 여러 대의 발전기로 나누어 공급할 시 각 발전기 고장 시 공급 지장을 일으킬 확률이 커지며 공급지장시간 측면에서 전체적으로 나쁜 영향을 미치게 되는 것으로 분석되었다. 또한 똑같은 용량으로 나눌 시 LOLE가 가장 나쁜 결과를 나타내었다.

2. 연계선로에 따른 LOLE

아래와 같이 총 발전용량은 40MW로 동일하지만 연계선로 회선 수가 다른 발전계통들이 있다. 외부계통은 등가보조발전기법을 활용하여 발전기 1대(G2)로 나타내었다. 발전기 모두 고장확률(FOR)은 0.1이며 연계선로의 고장확률(FOR)은 0.003이다. 어느 하루의 일최대부하가 20MW이며 24시간동안 부하는 20MW는 10시간, 10MW는 14시간 동안 지속된다. 외부계통과 연계된 선로의 구성에 따른 부하가 접속된 전력계통의 공급신뢰도지수 LOLE를 평가해 보자.

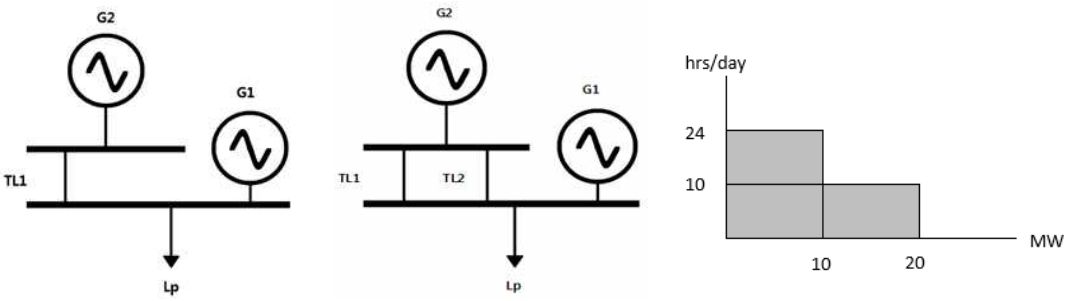


그림 4-3 연계선로 1회선 모델 계통, 연계선로 2회선 모델 계통, 일간 역부하지속곡선

1) 연계선로 1회선 발전계통의 공급신뢰도 LOLE 평가

표 4-13 연계선로 1회선 발전계통 입력데이터

구분	TYPE	Capacity[MW]	FOR
발전기1	G1	20	0.1
발전기2	G2	20	0.1
연계선로1	TL1	20	0.003

표 4-14 연계선로 1회선 발전계통 공급신뢰도 LOLE 평가

State	G1 [MW]	G2 [MW]	TL1 [MW]	AC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	20	20	20	40	0.9×0.9×0.997=0.80757	0	0
2	20	20	0	20	0.9×0.9×0.003=0.00243	0	0
3	20	0	20	20	0.9×0.1×0.997=0.08973	0	0
4	20	0	0	20	0.9×0.1×0.003=0.00027	0	0
5	0	20	20	20	0.1×0.9×0.997=0.08973	0	0
6	0	20	0	0	0.1×0.9×0.003=0.00027	24	0.00648
7	0	0	20	0	0.1×0.1×0.997=0.00997	24	0.23928
8	0	0	0	0	0.1×0.1×0.003=0.00003	24	0.00072
Total					1.0		0.24648

2) 연계선로 2회선 발전계통의 공급신뢰도 LOLE 평가

표 4-15 연계선로 2회선 발전계통 입력데이터

구분	TYPE	Capacity[MW]	FOR
발전기1	G1	20	0.1
발전기2	G2	20	0.1
연계선로1	TL1	20	0.003
연계선로2	TL2	20	0.003

표 4-16 연계선로 2회선 발전계통 공급신뢰도 LOLE 평가

State	G1 [MW]	G2 [MW]	TL1 [MW]	TL2 [MW]	AC [MW]	Probability	공급지장 시간(hrs)	LOLE [hrs/day]
1	20	20	20	20	40	0.9×0.9×0.997×0.997=0.80514729	0	0
2	20	20	20	0	40	0.9×0.9×0.997×0.003=0.00242271	0	0
3	20	20	0	20	40	0.9×0.9×0.003×0.997=0.00242271	0	0
4	20	20	0	0	20	0.9×0.9×0.003×0.003=0.00000729	0	0
5	20	0	20	20	20	0.9×0.1×0.997×0.997=0.08946081	0	0
6	20	0	20	0	20	0.9×0.1×0.997×0.003=0.00026919	0	0
7	20	0	0	20	20	0.9×0.1×0.003×0.997=0.00026919	0	0
8	20	0	0	0	20	0.9×0.1×0.003×0.003=0.00000081	0	0
9	0	20	20	20	20	0.1×0.9×0.997×0.997=0.08946081	0	0
10	0	20	20	0	20	0.1×0.9×0.997×0.003=0.00026919	0	0
11	0	20	0	20	20	0.1×0.9×0.003×0.997=0.00026919	0	0
12	0	20	0	0	0	0.1×0.9×0.003×0.003=0.00000081	24	0.00001944
13	0	0	20	20	0	0.1×0.1×0.997×0.997=0.00994009	24	0.23856216
14	0	0	20	0	0	0.1×0.1×0.997×0.003=0.00002991	24	0.00071784
15	0	0	0	20	0	0.1×0.1×0.003×0.997=0.00002991	24	0.00071784
16	0	0	0	0	0	0.1×0.1×0.003×0.003=0.00000009	24	0.00000216
Total						1.0		0.24001944

3) 연계선로 구성에 따른 LOLE 평가 결과

LOLE [hrs/day]	
1) 연계선로 1회선	2) 연계선로 2회선
0.24648	0.24001944

연계선로 2회선일 때 LOLE가 작아짐으로 공급신뢰도가 향상됨을 볼 수 있다. 이는 전력계통 공급설비 건설 시, 수요 측의 부하변동을 포함하여 신뢰도 지수 LOLE를 활용함으로써 발전기 용량·대수와 연계선로 구성 방법에 따라 정량적 지수로 비교할 수 있고 경제성을 고려해 구성방법을 결정할 수 있음에 의미가 있다.

제 2 절 구역전기사업 실 계통 규모의 모의계통 공급신뢰도 평가

구역전기사업 전력계통 공급신뢰도의 객관적인 평가를 위해서는 실계통의 정확한 설비고장확률과 과거 365일 동안 수용가의 일최대부하 데이터 등이 반영되어야 한다. 하지만 여러 가지 사정상 데이터 확보 및 정보공개가 어려워 본 논문에서는 앞서 제시한 구역전기사업의 확률론적 공급신뢰도 평가를 위해 최대한 기존 구역전기사업자의 전력계통과 유사한 모의 전력계통을 바탕으로 사례연구를 수행하였다.

사례연구에서 구역전기사업 내 수요부하 변동과 설비의 고장 등 불확실성을 포함하는 확률론적 공급신뢰도 지수 LOLE를 통하여 구역전기사업의 해당 공급 구역 내 최대 전력수요의 60% 이상 갖추어야한다는 공급설비의무기준과 계통간의 자체 발전설비의 구성 및 계약에 따른 연계접속설비 구성으로 인해 공급신뢰도 측면에서 적정성을 검토하고자 하며 구역전기사업의 장기적인 공급설비 적정성 검토에 활용할 수 있음을 제시하고자 한다.

확률론적 공급신뢰도 지수인 공급지장기대시간(LOLE)를 활용하여 구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도에 대한 타당성을 분석하기 위하여 현 국내 전력수급기본계획의 전력설비 건설 계획단계에서 사용하는 LOLE(0.3 days/year)와 동일한 수준으로 정의하였다.

1. 사례연구를 위한 구역전기사업 전력계통의 등가모델

1.1 연계계통의 등가보조발전기법

등가보조발전기법(Equivalent Assisting Unit Method)은 한 계통이 다른 계통의 부족용량을 지원할 수 있음을 표현한다. 두 계통이 연계될 경우에 등가보조발전기모델을 활용하여 각 전력계통의 발전기 용량과 연계접속설비의 제약 및 사고확률 등 불확실성까지 고려하여 신뢰도가 어떻게 변하는지 평가할 수 있다. 따라서 그림 4-4는 (a)와 같이 계통A와 계통B가 연계된 계통이고 (b)와 같이 지원계통B(System B)를 하나의 등가보조발전기로 등가화 시켜 (c)와 같이 계통A(System A)에 신설발전기로 운영된다고 가정하고 신뢰도를 평가하는 방법이다. 즉, 계통A는 수요부하에 비해 적은 공급설비용량을 갖고 있어 계통B와 연계를 통해 부족용량을 지원받음으로 경제성과 신뢰성이 향상될 수 있다[7].

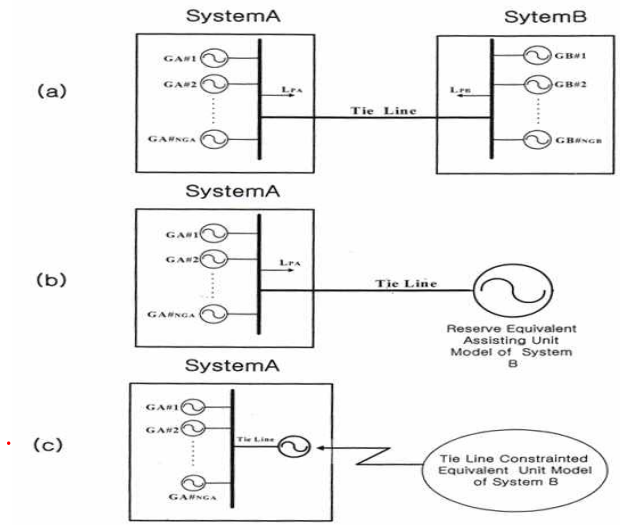


그림 4-4 연계계통의 등가보조발전기 모델

1.2 구역전기사업 전력계통의 등가모델

그림 4-5는 구역전기사업 내 자체 발전기 3대와 연계접속설비 1회선으로 구성된 실 계통을 보여준다. 앞서 언급했듯이 구역 내 자체 다수의 발전기과 배전선로를 갖추고 있으며 사업 구조상 전력 과부족 발생으로 연계접속설비 구축은 필수이다. 연계접속설비는 다시 송전선로(T/L) 혹은 배전선로(D/L)와 이에 직렬로 접속된 변압기(Step-Down Transformer)로 구성되며 둘 중 어느 설비만 고장이 나더라도 외부 전력계통과의 과부족전력을 거래할 수 없다. 이에 본 연구에서는 연계접속설비를 하나의 요소로 간략화 하였고 연계선로로 정의하였다.

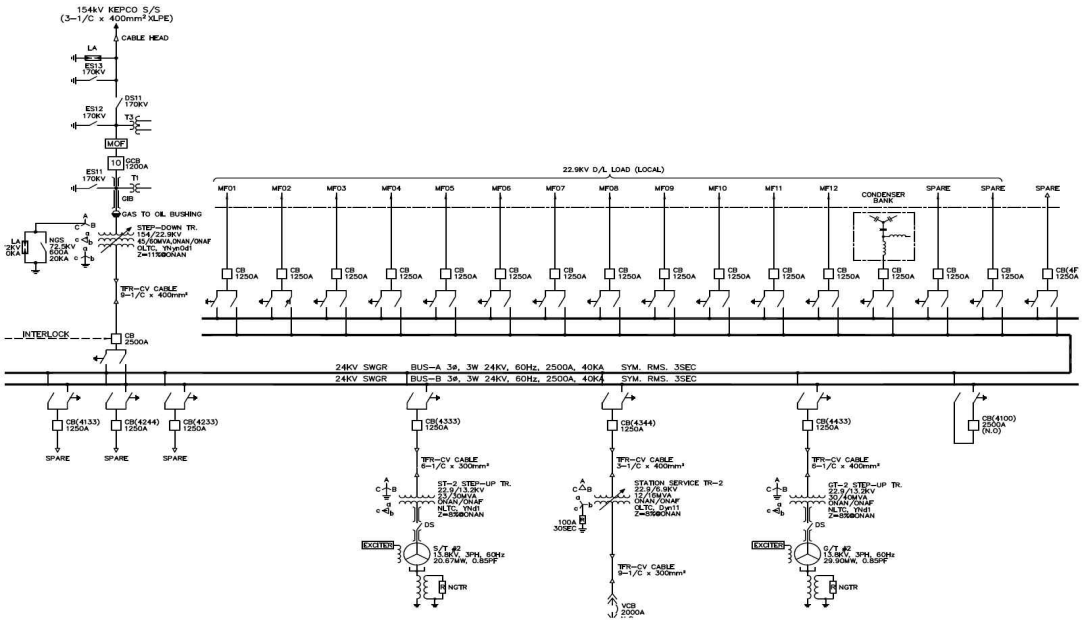


그림 4-5 구역전기사업장 실 계통

그림 4-6은 그럼 4-5의 구역전기사업장 실 계통을 등가모델화한 것이다. 구역전기사업 전력계통의 공급설비 구성을 그림 4-4와 같이 연계계통의 등가보조발전기법을 활용하여 그림 4-6과 같이 외부 전력계통을 1개의 등가발전기(G2)로 나타내었으며, 구역전기사업 내 자체 발전기 2대(G1-1, G1-2), 연계선로 1회선(T/L1)로 구성된 구역전기사업계통 등가모델로 간략화 하였다.

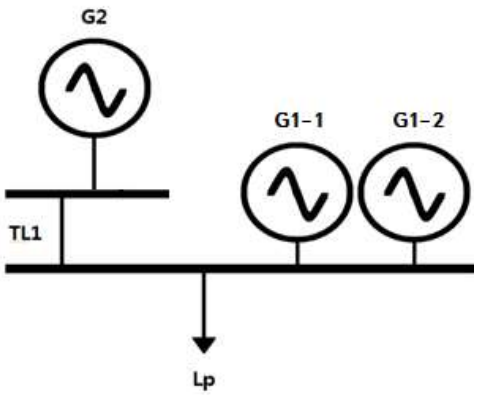


그림 4-6 구역전기사업 자체계통(G1)과 외부계통(G2), 연계선로 등가모델

2. 사례연구를 위한 설비고장확률(FOR)과 공급용량

구역전기사업 전력계통의 공급신뢰도에 크게 영향을 미치는 주요공급설비는 외부 전력계통 등가보조발전기, 구역 내 자체 발전기와 연계선로로 정의된다. 따라서 실제 구역전기사업의 전력계통 공급신뢰도를 계산하기 위해서는 주요공급설비의 과거 고장확률 데이터가 필요하다.

그러나 실제 자료 공개의 어려움으로 사례연구를 위한 발전기와 연계선로의 용량, 고장확률은 표 4-17과 같이 가정하였다.

구역전기사업 전력계통의 발전기는 소형 열병합발전기로 주로 LNG를 사용한다. 이에 표 3-3의 가스발전기의 고장확률데이터를 적용하였다.

구역전기사업 전력계통의 연계선로와 외부 전력계통 등가보조발전기는 최대한 모의계통 공급신뢰도평가 결과에 영향을 적게 미치게 하기 위해 고장확률은 0.001이라고 정의하였다.

구역전기사업 내 자체발전기와 연계선로의 용량은 해당 공급지역의 최대 전력수요부하를 감당할 수 있는 용량으로 적용하였다.

표 4-17 발전기와 연계선로 용량 및 고장확률

구분	Capacity[MW]	FOR
구역 내 자체 발전기(G1)	공급 구역의 최대 전력수요의 X%	0.03799
외부 전력계통 등가보조발전기(G2)	무한대	0.001
연계선로(T/L1, T/L2)	최대 전력수요	0.001

3. 사례연구를 위한 부하곡선 모델링

실제 구역전기사업 해당 공급 구역 내 전력수요는 수용가의 부하종류와 세대수에 따라 차이가 있을 것이다. 그러나 구역전기사업자란 아파트 단지나 상가, 건물 등이 밀집된 수요지 근처에 위치하기 때문에 수도권 배전계통의 전력데이터와 비슷할 것이라고 가정하였다. 이에 구역전기사업 내 수요부하 변동을 포함한 LOLE계산을 위해 구역전기사업 공급 구역과 유사한 아파트 단지를 포함한 주택용 부하의 점유율이 높은 수도권 배전계통의 1년간 일최대부하 데이터를 이용하여 사례연구를 하였다.

표 2-4의 구역전기사업 실 계통 규모를 고려하여 표 4-18의 Case 1, Case 2, Case 3과 같이 부하크기가 다른 배전계통의 전력부하 데이터를 활용하였다.

표 4-18 사례연구를 위한 계통크기에 따른 배전계통의 부하데이터

	최대부하[MW]	평균부하[MW]	최저부하[MW]
Case 1	5.60	3.72	2.60
Case 2	12.20	8.76	6.50
Case 3	50.10	30.02	21.28

그림 4-7 ~ 4-12는 365일 동안 각 Case별 일최대부하변동곡선과 이를 내림차순으로 재 정렬한 일최대부하지속곡선을 나타낸 것이다.

1) Case 1 : 최대부하 5.60[MW], 평균부하 3.72[MW], 최저부하 2.60[MW]

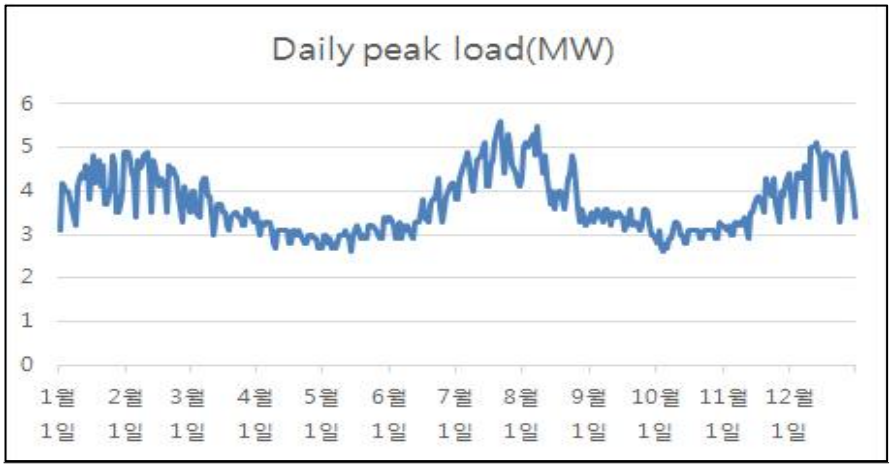


그림 4-7 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선(DPLVC)

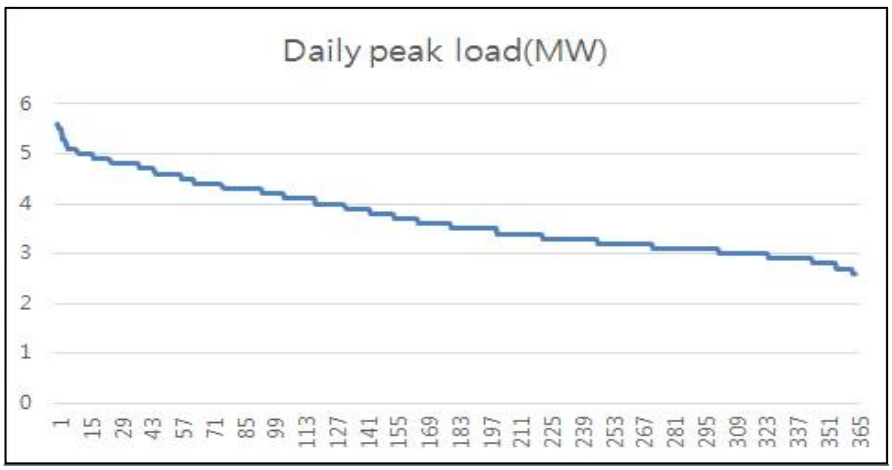


그림 4-8 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선(DPLDC)

2) Case 2 : 최대부하 12.20[MW], 평균부하 8.76[MW], 최저부하 6.50[MW]

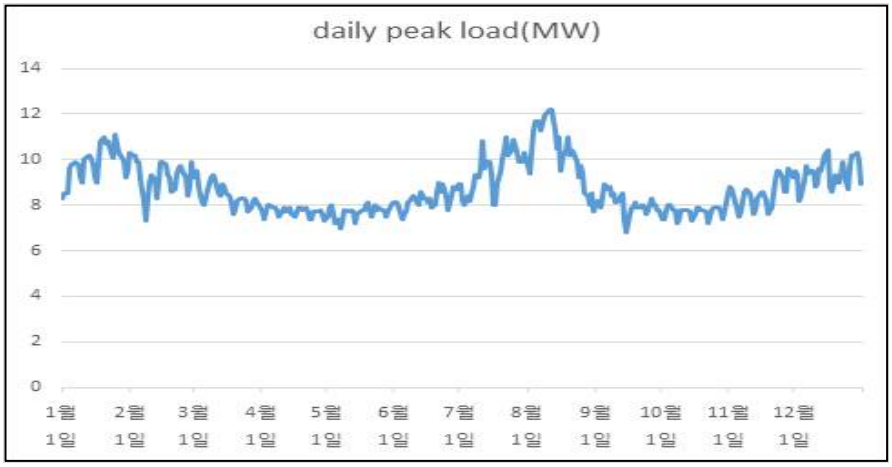


그림 4-9 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선(DPLVC)

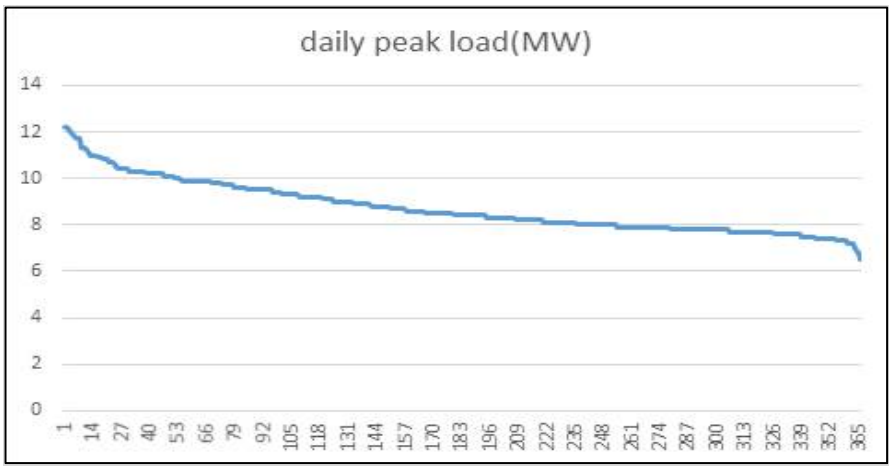


그림 4-10 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선(DPLDC)

3) Case 3 : 최대부하 50.10[MW], 평균부하 30.02[MW], 최저부하 21.28[MW]

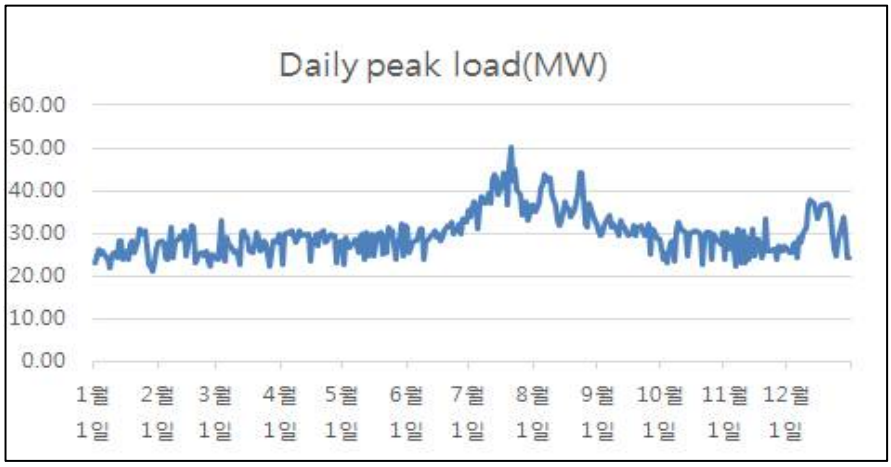


그림 4-11 사례연구 계통의 일최대부하변동곡선(DPLVC)

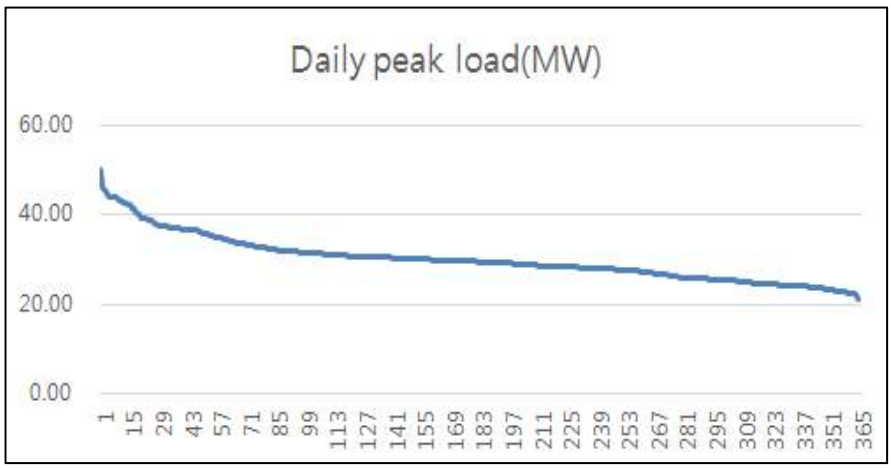


그림 4-12 사례연구 계통의 일최대부하지속곡선(DPLDC)

4. 사례연구를 위한 발전설비와 연계선로 구성

그림 4-13은 사례연구를 위한 구역전기사업 내 자체 발전기의 구성과 외부 전력계통과 연계된 선로의 구성에 따른 전력계통의 등가 모델이다. 사례연구에서 LOLE에 영향을 미치는 변수는 발전기 대수 및 용량, 연계선로 회선 수이다.

구역전기사업 내 자체 발전기의 총 공급용량은 동일하지만 발전기의 다른 구성(자체 발전기가 1대 일 때, 2대 일 때, 3대 일 때) 및 허가기준인 최대공급설비의무기준(구역 내 최대 전력수요의 100%, 90%, 80%, 70%, 60%일 때)과 연계선로 회선 수(1회선, 2회선)에 따른 전력계통의 공급신뢰도지수 LOLE를 분석해 보았다.

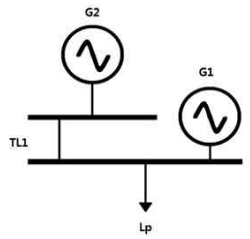
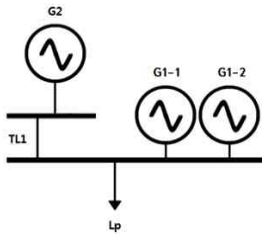
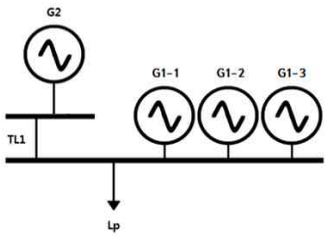
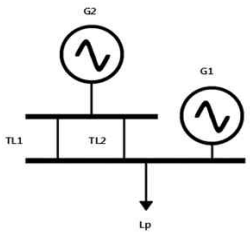
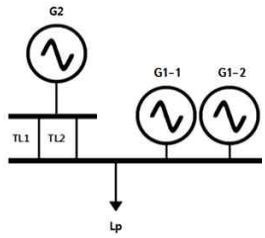
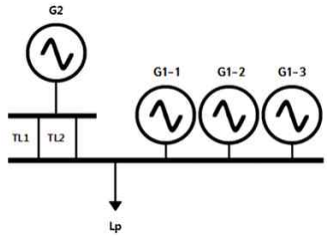
	구내 발전기 1대 (G1)	구내 발전기 2대 (G1-1, G1-2)	구내 발전기 3대 (G1-1, G1-2, G1-3)
	Case 1, 2, 3-1	Case 1, 2, 3-2	Case 1, 2, 3-3
1회선			
2회선			

그림 4-13 사례연구 계통의 발전기 구성과 연계선로에 따른 등가모델

표 4-19 Case 별 구역 내 자체 발전기 대수와 용량

1) Case 1 : 최대부하 5.60[MW], 평균부하 3.72[MW], 최저부하 2.60[MW]

State		Case 1-1	Case 1-2		Case 1-3		
		G1 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-3 [MW]
100%	a*	5.6	2.8	2.8	1.867	1.867	1.867
	b*		3.715	1.885	3.715	0.942	0.942
	c*		2.6	3.0	2.6	1.5	1.5
90%	a	5.04	2.52	2.52	1.680	1.680	1.680
	b		3.715	1.325	3.715	0.662	0.662
	c		2.6	2.44	2.6	1.22	1.22
80%	a	4.48	2.24	2.24	1.493	1.493	1.493
	b		3.715	0.765	3.715	0.382	0.382
	c		2.6	1.88	2.6	0.94	0.94
70%	a	3.92	1.96	1.96	1.307	1.307	1.307
	b		3.715	0.205	3.715	0.102	0.102
	c		2.6	1.32	2.6	0.66	0.66
60%	a	3.36	1.68	1.68	1.120	1.120	1.120
	b		3.36	-	3.36	-	-
	c		2.6	0.76	2.6	0.38	0.38

2) Case 2 : 최대부하 12.20[MW], 평균부하 8.76[MW], 최저부하 6.50[MW]

State		Case 2-1	Case 2-2		Case 2-3		
		G1 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-3 [MW]
100%	a	12.2	6.1	6.1	4.067	4.067	4.067
	b		8.756	3.44	8.756	1.722	1.722
	c		6.5	5.7	6.5	2.85	2.85
90%	a	10.98	5.49	5.49	3.66	3.66	3.66
	b		8.756	2.22	8.756	1.112	1.112
	c		6.5	4.48	6.5	2.24	2.24
80%	a	9.76	4.88	4.88	3.253	3.253	3.253
	b		8.756	1.0	8.756	0.502	0.502
	c		6.5	3.26	6.5	1.63	1.63
70%	a	8.54	4.27	4.27	2.847	2.847	2.847
	b		8.54	-	8.54	-	-
	c		6.5	2.04	6.5	1.02	1.02
60%	a	7.32	3.66	3.66	2.44	2.44	2.44
	b		7.32	-	7.32	-	-
	c		6.5	0.82	6.5	0.41	0.41

3) Case 3 : 최대부하 50.10[MW], 평균부하 30.02[MW], 최저부하 21.28[MW]

State		Case 3-1	Case 3-2		Case 3-3		
		G1 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-1 [MW]	G1-2 [MW]	G1-3 [MW]
100%	a	50.01	25.05	25.05	16.7	16.7	16.7
	b		30.025	20.075	30.025	10.038	10.038
	c		21.28	28.81	21.28	14.41	14.41
90%	a	45.09	22.545	22.545	15.03	15.03	15.03
	b		30.025	15.065	30.025	7.533	7.533
	c		21.28	23.81	21.28	11.905	11.905
80%	a	40.08	20.04	20.04	13.36	13.36	13.36
	b		30.025	10.055	30.025	5.028	5.028
	c		21.28	18.80	21.28	9.40	9.40
70%	a	35.07	17.535	17.535	11.69	11.69	11.69
	b		30.025	5.045	30.025	2.523	2.523
	c		21.28	13.79	21.28	6.895	6.895
60%	a	30.06	15.03	15.03	10.02	10.02	10.02
	b		30.025	0.035	30.025	0.018	0.018
	c		21.28	8.78	21.28	4.390	4.390

* a : 발전기 용량 = 총 공급용량/발전기 대수

b : 발전기 1대 용량=평균부하, 나머지 발전기 용량=(총 공급용량-평균부하)/나머지 발전기 대수

c : 발전기 1대 용량=최소부하, 나머지 발전기 용량=(총 공급용량-최소부하)/나머지 발전기 대수

제 3 절 사례연구 결과

구역전기사업 내 안정적인 전력수급을 유지하기 위하여 공급지장이 일어날 수 있는 확률(LOLE)을 구역전기사업의 공급신뢰도 기준으로 사용하였고 국내 전력수급기본계획의 LOLE(0.3 days/year)와 동일한 수준으로 정의하였다. 따라서 구역전기사업의 안정적인 전력공급이란 그 기댓값(LOLE)이 0.3 days/year을 초과하지 않음을 의미한다. 구역전기사업 모의계통 내 자체 발전기과 연계선로의 관계에 따른 공급신뢰도 변화를 정량적으로 확인하기 위해 변수는 발전기 공급용량 혹은 발전기 대수, 연계선로 회선 수로 구분하여 비교해 보았다.

1. 현 구역전기사업의 허가기준에 따른 LOLE 결과

표 4-20에서 구역전기사업 모의계통 Case 1, 2, 3의 공급용량 감소에 따른 LOLE 결과를 살펴보면 현 구역전기사업의 허가기준인 최대전력수요의 60% 공급용량과 연계선로 1회선일 때 발전기 구성방법과 상관없이 Case 결과 모두 LOLE의 값이 우리나라 전력수급기본계획의 전력설비 건설 계획단계에서 사용하는 LOLE 0.3 days/year보다 상회하는 값이다. 이에 60% 공급용량 허가기준은 공급신뢰도 측면에서 적정한지 검토가 필요하며 구역전기사업자는 자체 수용가에게 외부 전력계통의 공급신뢰도와 동등하게 제공할 의무가 있으므로 위와 같은 경우에는 LOLE를 줄임으로써 공급신뢰도를 향상시키기 위해 설비투자가 필요함을 보여준다.

2. 자체 발전기 공급용량, 연계선로 회선 수가 LOLE에 미치는 영향

구역전기사업자는 LOLE를 줄이기 위해 자체 공급용량 혹은 발전기 대수나 연계선로 회선 수를 증가할 수 있는데 공급신뢰도에 영향을 미치는 정도(민감도)는 표 4-20의 Case 1, 2, 3의 LOLE 결과 값을 볼 때 각각 다름을 볼 수 있다. 이는 자체 공급 구역내 연간 부하변동에 따라 LOLE의 감소 정도가 다름을 보여준다. 다만, 표 4-20의 LOLE값과 그림 4-14의 LOLE 그래프에서 보는 바와 같이 공급용량을 10% 씩 감소할 경우 LOLE는 같은 비율로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 표 4-20과 그림 4-14를 보면 연계선로 2회선 LOLE는 1회선 LOLE보다 반으로 줄어듦을 알 수 있다. 따라서 만약 구역전기사업의 초기 설비투자 비용절감을 위해 공급용량을 완화한다면 공급신뢰도 관점에서 연계선로의 회선 수는 매우 중요하다고 할 수 있다.

3. 사업 계획 시 발전기 대수가 LOLE에 미치는 영향

구역전기사업 계획 시 발전기 대수를 고려할 때, 표 4-20을 보면 총 공급용량을 발전기 1대(Case 1-1, 2-1, 3-1)로 구성하기보다 발전기 2, 3대로(Case a, b, c) 나눌수록 발전기 용량을 나누는 방법에 상관없이 대체적으로 LOLE가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 제 4장 1절의 샘플 계통에서 보았듯이 년 중 최대부하 대비 적정수준 이상의 예비력을 확보하는 일반적인 발전계통에서 발전기 대수가 증가 시 LOLE가 감소하는 결과와는 반대이다. 또한 전체 공급 용량이 최대부하 이하인 경우의 샘플 계통과 같은 결과가 도출되었다. 이는 공급 구역 내 연간 부하특성과 발

전기의 용량과의 관계에 따른 것으로 볼 수 있었다. 구역전기사업의 설비 용량이 부하 크기의 100% 이하가 된다면 총 공급용량을 여러 대의 발전기로 나누어 공급할 시 구역전기사업 특성상 1대의 발전용량이 최소 수요부하보다 작아질 수밖에 없다. 이는 각 발전기 고장 시 공급 지장을 일으키며 공급지장시간 측면에서 전체 신뢰도에 나쁜 영향을 미치게 되는 것으로 분석되었다. 따라서 신뢰도 측면에서 공급용량과 부하피크를 고려하여 유리한 방법으로 발전기 구성방법을 고려해야 함을 보여준다.

4. 사업 계획 시 여러 대의 발전기 용량이 LOLE에 미치는 영향

사업계획 시 발전기 대수를 나누어 구성할 경우, 표 4-20을 보면 용량을 똑같이 나누는 경우(Case a)의 LOLE가 평균부하(Case b)나 최저부하(Case c)용량으로 1대를 정하고 나머지를 구성하는 경우의 LOLE보다 비교적 큼을 볼 수 있다. 이는 발전기를 여러 대로 구성할 경우, 발전기 용량을 똑같이 산정하는 것은 신뢰도 측면에서는 불리하다고 말할 수 있다. 표 2-4의 현재 구역전기사업자의 발전기 구성방법을 보면 대체적으로 같은 용량의 여러 발전기를 구축하는 것을 볼 수 있다. 이는 만약 구역전기사업 내 전체 공급 용량이 피크부하보다 작다면 신뢰도 측면에서 불리한 구축 방법이다. 그 중에서도 평균부하(Case b)를 고려하여 발전기 1대 용량을 정하는 것이 최저부하(Case c)로 발전기 1대 용량을 정하는 것보다 대체적으로 LOLE값이 비교적 작아지는 것을 볼 때 발전설비 건설계획 시 공급신뢰도 관점에서 평균부하를 고려하여 발전용량을 산정할 수 있을 것이다.

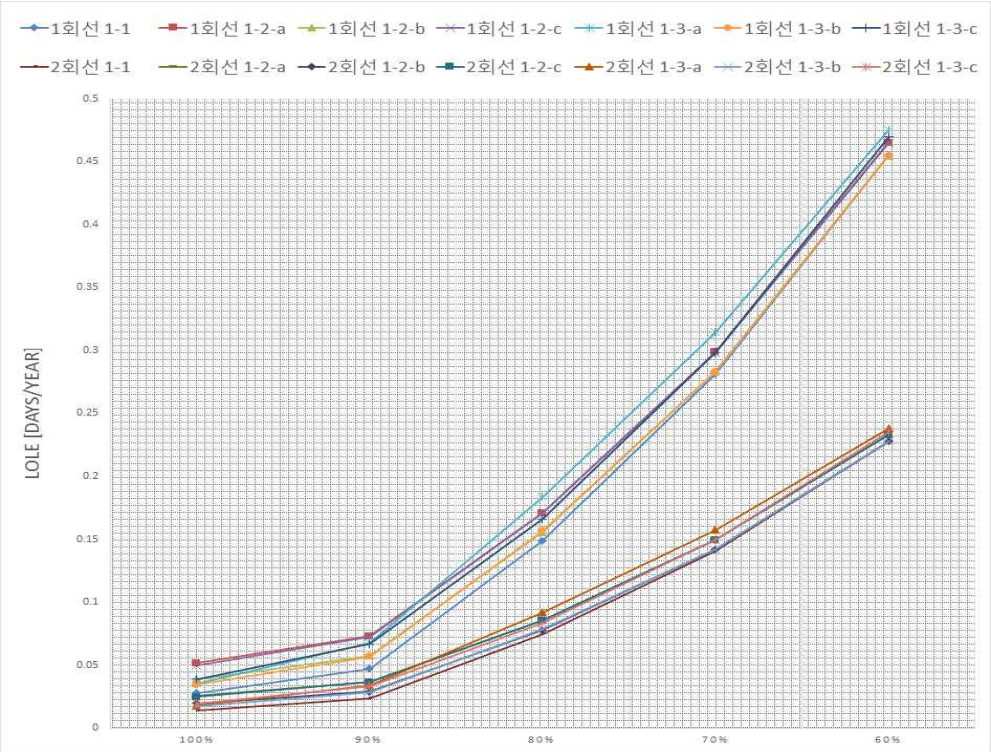
표 4-20 구역전기사업 모의계통 신뢰도 계산 결과

LOLE [days/year]

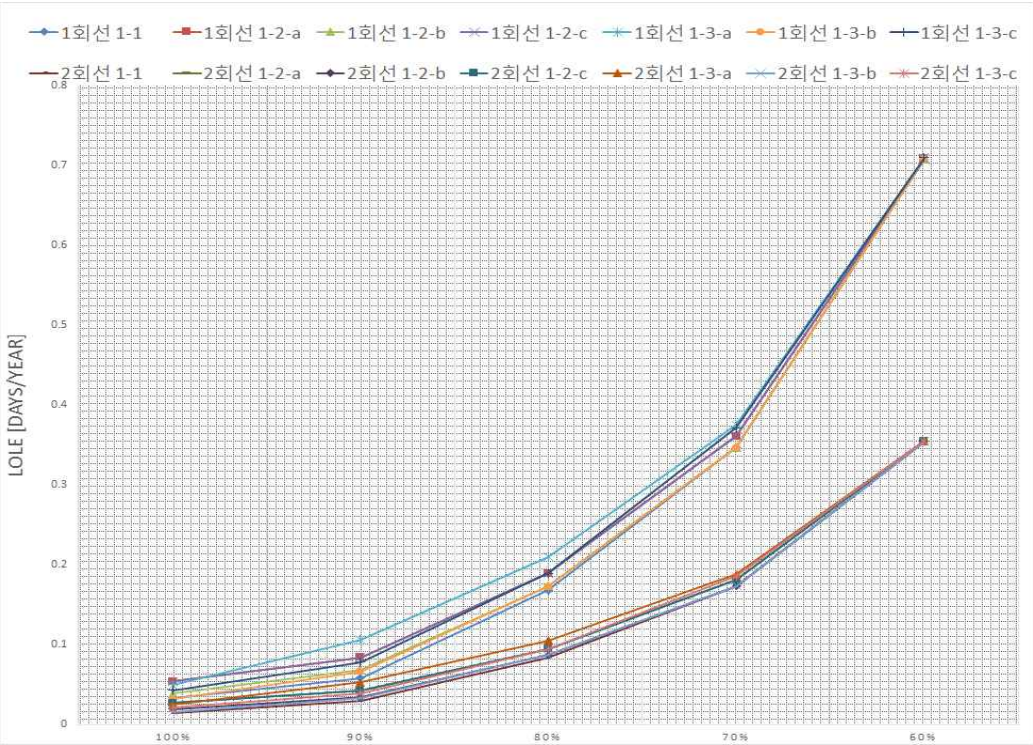
자체공급용량		100%		90%		80%		70%		60%	
발전기 구성 \ 연계선로		1회선	2회선	1회선	2회선	1회선	2회선	1회선	2회선	1회선	2회선
1-1		0.02772	0.01388	0.04695	0.02361	0.14887	0.07455	0.28156	0.14099	0.45464	0.22766
1-2	a	0.05146	0.02577	0.07288	0.03650	0.17093	0.08560	0.29858	0.14952	0.46508	0.23289
	b	0.03897	0.01951	0.05747	0.02878	0.15552	0.07788	0.28317	0.14180	0.45464	0.22766
	c	0.04964	0.02486	0.07274	0.03642	0.17079	0.08552	0.29844	0.14944	0.46494	0.23282
1-3	a	0.03555	0.01780	0.06768	0.03389	0.18373	0.09200	0.31454	0.15751	0.47514	0.23792
	b	0.03447	0.01726	0.05663	0.02836	0.15686	0.07855	0.28317	0.14180	0.45464	0.22766
	c	0.03892	0.01949	0.06662	0.03336	0.16615	0.08320	0.29837	0.14941	0.46951	0.23511
2-1		0.03349	0.01388	0.05849	0.02929	0.16810	0.08418	0.34695	0.17373	0.70848	0.35477
2-2	a	0.05438	0.02723	0.08398	0.04206	0.18943	0.09486	0.36148	0.18101	0.70928	0.35517
	b	0.03868	0.01937	0.06828	0.03419	0.17373	0.08699	0.34695	0.17373	0.70848	0.35477
	c	0.05438	0.02723	0.08398	0.04206	0.18943	0.09486	0.36148	0.18101	0.70928	0.35517
2-3	a	0.04946	0.02477	0.10619	0.05318	0.20996	0.10514	0.37547	0.18802	0.71006	0.35556
	b	0.03165	0.01585	0.06617	0.03313	0.17324	0.08675	0.34695	0.17373	0.70848	0.35477
	c	0.04279	0.02143	0.07829	0.03920	0.18958	0.09493	0.37168	0.18612	0.70992	0.35549
3-1		0.02772	0.01388	0.03349	0.01677	0.06426	0.03218	0.13349	0.06684	0.32387	0.16218
3-2	a	0.04635	0.02321	0.05906	0.02957	0.08953	0.04483	0.15613	0.07818	0.33928	0.16990
	b	0.03904	0.01955	0.04459	0.02233	0.07419	0.03715	0.14079	0.07050	0.32394	0.16221
	c	0.04291	0.02149	0.05804	0.02906	0.08946	0.04480	0.15606	0.07815	0.33921	0.16986
3-3	a	0.01784	0.02477	0.04089	0.02047	0.09340	0.04677	0.17434	0.08730	0.35411	0.17732
	b	0.03082	0.01543	0.03771	0.01888	0.06969	0.03490	0.13728	0.06874	0.32401	0.16225
	c	0.02507	0.01256	0.04215	0.02111	0.08096	0.04054	0.15936	0.07980	0.34385	0.17218

그림 4-14 구역전기사업 모의계통 신뢰도 결과 LOLE곡선

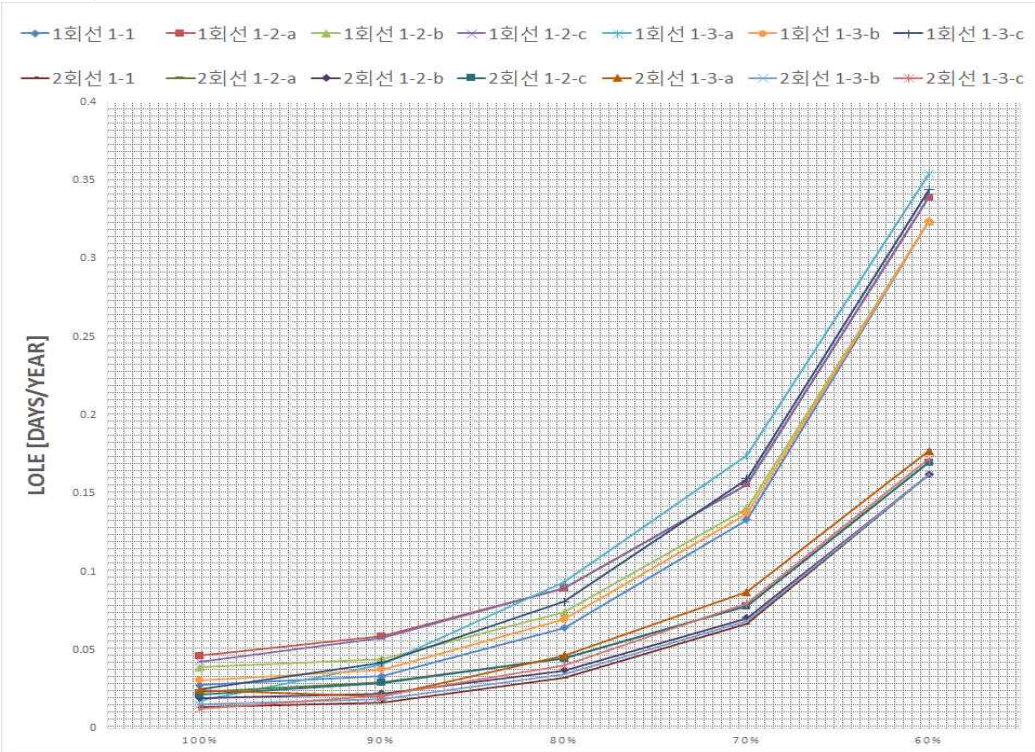
(Case 1)



(Case 2)



(Case 3)



5. 연구 의의와 한계점

현재 구역전기사업은 외부환경의 변화로 수익성이 문제이고 그만큼 설비투자에 부담이 있기 때문에 공급설비의 고장확률과 부하변동을 고려할 수 있는 확률론적인 공급신뢰도 평가를 적용하였다. 그러나 구역전기사업은 허가기준인 60 % 이상의 공급설비용량과 계약에 따른 연계선로 회선 수만 구축하면 되기에 수용가와 규제자 입장에서 일반적인 전력계통과 비교하여 공급신뢰도 측면에서 차별이 없어야 한다. 따라서 구역전기사업자 측면에서 전원개발계획 시 활용하는 LOLE(0.3 days/year)를 만족하는 범위 내에 설비를 갖추는 방법을 제시하였다. 구역전기사업자는 사업 계획 시 혹은 운용 시 자체 전력계통의 확률론적 공급신뢰도 지수 LOLE를 활용하여 위의 사례연구결

과를 기반으로 경제성까지 고려하여 발전기 용량 및 대수 또는 연계선로 회선 수 등 공급설비 구성을 합리적으로 선택하여 계획 할 수 있다.

반면 장기간의 택지건설 시, 수용가 건설계획 변동 등 불확실성을 반영하여 구역전기사업의 경제성 있는 건설 및 운용을 위해 단계별 택지개발에 따른 부하증가 예측을 통한 전력공급이 가능하도록 공급설비의무기준에 대한 허가기준 개선의 필요성이 요구된다. 구역전기사업자는 단계적으로 택지건설 사업 확정 시 부하변동을 포함하는 확률론적 공급신뢰도 평가 목표를 바탕으로 단계적 공급설비 건설계획을 세울 수 있고 경제성을 고려하여 자발적으로 발전기 구성 또는 연계선로 등을 적절한 시기에 추가 보완할 수 있을 것이다.

또한 구역전기사업자는 주요공급설비 설계 시 공급용량과 일최대부하변동 데이터의 관계를 고려하여 공급신뢰도를 향상시키는 측면에서 위에 모의계통 사례결과를 적용할 수 있을 것이다.

다만 사례연구의 확률론적 공급신뢰도 지수 LOLE에 따른 해석결과는 실제 구역전기사업자의 계통운영 상황에서 자체 전력계통의 크기 및 주요공급설비 고장률 데이터를 고려할 경우 실제 신뢰도 지수 LOLE와 차이를 보일 수 있다. 또한 같은 규모의 계통에서도 부하변동특성에 따라 LOLE 결과가 상이할 수 있다. LOLE결과의 정확도 차이는 비용으로 이어지므로 LOLE의 정확한 계산 결과를 위한 해당 공급 구역의 일최대부하 데이터와 공급설비의 고장확률 정보를 확보하기 위한 노력이 필요하다.

제 5 장 결 론

2003년 수요지 인근에 열병합발전설비의 고효율화·소형화를 기반으로 한 구역전기사업제도를 도입했으며 이는 국내 대표적인 분산형 전원의 형태이다. 하지만 도입당시와 달리 현재 외부환경의 변화로 대부분의 구역전기사업자는 수익성 악화로 경영난을 겪고 있다. 그러나 열·전기 통합에너지를 통한 에너지 이용 효율성 제고, 환경개선 효과 제고 등 긍정적 효과 측면에서 분산형 전원의 보급화 확대는 필수적이고 향후 신재생에너지와 에너지 저장장치 등과 같은 분산전원과 그에 따른 전력시스템을 구축한다면 구역전기사업은 마이크로그리드의 핵심모델로도 발전시킬 수 있다.

이에 본 연구에서는 구역전기사업자가 분산형 전원으로서 본연의 역할을 하고 해당 공급 구역 내 전기사용자의 안정적인 전력공급을 보장하기 위해 공급신뢰도 관점에서 사례연구를 통해 분석하여 보았다.

먼저 전통적인 전력계통의 공급신뢰도 방법 및 연계계통의 등가보조발전기법을 활용하여 구역전기사업에 확률적인 공급신뢰도 평가방법과 공급신뢰도지수 LOLE을 적용하는 방안을 소개했다. 특히, 사례연구를 통해 현 전기사업법상 구역전기사업 최대 전력수요의 60% 이상의 공급설비를 구축하여야하는 공급설비의무기준과 연계선로의 관계를 공급신뢰도 측면에서 분석하였고 그 중요성을 LOLE 값의 변화를 통해 정량적으로 나타내었다. 그 연구 결과는 구역전기사업의 계통 내 수용가에게 신뢰도

기준에 부합하는 전력공급의무를 다하기 위하여 실 계통의 객관적인 고장 데이터 및 전력수요부하 데이터를 반영하여 현 공급설비의무기준의 적합성에 대한 분석이 필요함을 나타낸다. 또한 주요 설비의 구성 변화에 따른 공급신뢰도 분석을 통하여 신뢰도 기준에 부합하는 계통을 구축할 수 있는 다양한 주요공급설비 구축 방안을 제시하였다. 공급용량이 부하피크보다 큰 일반 계통은 발전기를 여러 대로 나눌 시 신뢰도 결과가 향상된다. 그러나 구역전기사업의 공급설비의무기준에 따라 공급용량이 부하피크보다 작을 경우 발전기를 여러 대로 나누는 구축방법은 신뢰도측면에서 불리함을 보았다. 따라서 사업자는 공급용량과 부하변동의 관계를 고려한 공급지장기대시간 지수(LOLE)를 활용하여 공급설비 구축 방안을 신뢰도 측면에서 유리하도록 선택할 수 있다.

구역전기사업의 공급신뢰도 결과는 구역 내 전력부하변동을 기반으로 다양한 발전설비, 발전설비 공급용량 혹은 발전기 대수, 연계선로 회선수의 구성에 따라 다른 결과가 도출 가능하다. 따라서 각 구역전기사업자가 적정한 공급신뢰도를 만족시키기 위해 경제성을 고려하여 설비계획과 설비운용상의 추가보완을 합리적으로 검토할 수 있을 것이라 기대한다. 구역전기사업자 실계통의 공급신뢰도를 평가하기 위한 좀 더 정확한 자료 확보를 위한 전력시스템 보완 또한 필요하다. 또한 구역전기사업은 최대수요부하의 60%인 공급설비의무기준을 기반으로 향후 마이크로그리드의 대표적인 모델이 되기 위해서는 신재생에너지 및 에너지 저장장치와 같은 분산전원을 추가로 구축하여 공급신뢰도를 향상시킬 수 있는 연구도 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 전기사업법, 2017.6.22.

[2] 제 8차 전력수급기본계획.

[3] 산자부, “분산형 전원개발 촉진을 위한 구역전기사업제도 시행”, 2004.6.22.

[4] 산자부, “구역전기사업」활성화 종합대책 수립”, 2006.9.22.

[5] 산자부, “구역전기사업, 분산형 전원의 대표선수로 키운다”. 2015.10.30.

[6] 산자부, “전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 일부개정(안) 행정예고”, 2017.12.21.

[7] 최재석, 전력계통 신뢰도 공학, 2012.

[8] 김용완, “구역 전기 사업자의 전력거래”, 대한전기학회, 2008.3.

[9] 산자부, CES 사업 활성화 방안, 2003.2.24.

[10] 집단에너지 편람, 한국에너지공단, 2017.

[11] 유동환, 구역형집단에너지와 구역전기사업(CES), 조명전기설비, 2008.6

[12] 윤원철, 손양훈, 전력예비력 확보를 위한 분산형 전원 활성화 방안, 에너지경제연구, 2015.

[13] 박완기, 최창식, 한진수, 커뮤니티에너지공급(CES)시설 기반 마이크로그리드 기술, 한국통신, 2017.

[14] R. Billinton and R.N. Allen, Reliability Assessment of Large Electric Power Systems, Kluwer Academic Publisher, 1988.

[15] 최신 배전시스템 공학, 북스힐, 대한전기학회 편.

Abstract

A Study on the Reliability Evaluation of Power Supply for Community Energy System

Jin Hee Kim
Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

In response to the changes in environments of electricity power industry, the interests of Distributed Generation(DG) have increased. In South Korea, Community Energy System(CES), established in 2003, is considered to be one of the solutions to DG network systems. CESs operators are responsible for the reliable and safe energy supply to their own customers under both normal and emergency conditions. This paper proposes a probability method to evaluate the reliability for CESs by using a system reliability index, loss of load expectation(LOLE). As CESs include interconnection of external power system due to the supply facility mandatory standard, the proposed method considers the forced outage rate of the interconnected lines as well as generators. Also the current policy and status of CESs were investigated in aspect of a reliable energy supply. The analysis shows that the proposed method is effective in evaluating the adequacy of CESs, and the system operators can utilize the method for constituting their systems in compliance with the reliability

standard.

keywords : Reliability, Community Energy System(CES), Loss of Load Expectation(LOLE)
Student Number : 2017-29315

부록 1. 사례연구를 위한 각 Case별 부하데이터

1) Case 1 부하

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1	3.1	4.9	3.5	3.2	3	3.4	3.8	5	3.5	2.8	3.2	4.4
2	4.2	4.7	4	3	3	3.2	3.8	5.1	3.3	3.1	3.1	3.9
3	4.1	4.4	4	3.3	2.8	2.9	4.3	5	3.4	2.7	3.2	3.4
4	4	4.3	3.5	3.2	2.9	2.9	4.6	5.1	3.6	2.6	3	4.4
5	4	3.4	3.4	3.3	2.7	3.3	4.7	5.3	3.5	2.8	3	4.4
6	3.8	4.7	4.2	3.3	2.8	2.9	4.9	4.8	3.3	2.7	3.3	4.3
7	3.6	4.5	4.3	3.1	2.7	3.2	4.6	5.5	3.6	2.9	3.2	4.3
8	3.2	4.6	4.3	2.8	3	3.1	4.2	4.9	3.6	2.9	3.3	4.6
9	4.1	4.8	3.9	2.7	3	3.2	4	4.8	3.4	3.3	3.2	4
10	4.3	4.9	3.9	3.1	3	3	4.4	4.4	3.2	3.3	3.4	3.4
11	4.4	4.4	3.5	3.1	3.1	2.9	4.7	4.8	3.5	3.2	3.1	5
12	4.3	3.5	3	3.1	3	3.3	4.8	4.3	3.4	3	2.9	5
13	4.6	4.7	3.7	3.1	2.9	3.3	5	3.7	3.4	3	3.5	5.1
14	4.5	4.5	3.7	3.1	2.6	3.3	5.1	4	3.5	2.8	3.5	4.9
15	3.8	4.3	3.7	2.8	3	3.5	4.1	3.6	3.4	2.8	3.7	4.8
16	4.8	4.1	3.5	2.8	3.2	3.8	4.1	3.9	3.1	3.1	3.8	4.1
17	4.2	4.3	3.5	3.1	3.1	3.4	4.6	4	3.2	3.1	3.9	3.8
18	4.5	4.1	3.2	3.1	2.9	3.3	4.7	4	3.4	3.1	3.7	4.9
19	4.7	3.5	3.1	3	3	3.7	5.1	3.8	3.6	3.1	3.5	4.8
20	4.1	4.6	3.4	3.1	2.9	3.8	5.5	3.6	3.2	3.1	4.3	4.8
21	4.6	4.4	3.5	3	2.9	3.8	5.6	4.3	3.3	2.9	4.1	4.5
22	3.7	4.5	3.5	2.8	3.2	4	5	4.4	3.3	2.9	4	4.2
23	3.7	4.4	3.4	2.8	3.2	4.3	4.4	4.8	3.1	3.1	3.9	3.8
24	4.1	4.3	3.4	3	3.2	3.6	4.8	4.6	3.2	3.1	4.3	3.3
25	4.8	3.9	3.2	3	3.1	3.3	5.3	4.1	3.6	3.1	3.7	3.6
26	4.6	3.3	3.2	3	3	3.9	5	3.6	3.6	3.1	3.3	4.8
27	3.5	4.1	3.6	2.9	2.9	4	4.6	3.3	3.5	3.1	4	4.9
28	3.5	3.9	3.6	2.9	2.9	4.1	4.4	3.6	3.2	2.9	3.9	4.6
29	3.7		3.4	2.7	3.4	4.2	4.2	3.2	3	2.9	4.2	4.2
30	4		3.3	2.7	3.3	4.2	4.1	3.3	3	3.3	4.3	3.9
31	4.9		3.5		3.4		4.3	3.4		3.2		3.4

2) Case 2 부하

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1	8.3	10.3	9.2	7.7	7.5	8.1	8.9	9.7	8.2	7.4	8.8	9.5
2	8.5	10.2	9.5	7.4	7.9	8.1	8.2	9.4	8.2	7.4	8.7	9.3
3	8.5	10.2	8.8	7.7	8	7.9	8	11.3	7.9	7.8	8.4	8.2
4	9.6	9.9	8.4	8	7.6	7.4	8.4	11.7	8.4	8	8.1	8.4
5	9.8	9.9	8.1	8	7.2	7.6	8.2	11.7	8.9	8	7.5	9.1
6	9.8	9.1	8	7.9	7.4	7.7	8.5	11.7	8.7	7.8	7.7	9.7
7	9.9	8.1	8.7	7.9	7	8.1	8.8	11.3	8.8	7.8	8.2	9.4
8	9.8	7.3	9	7.8	7.3	8.2	9.3	11.9	8.4	7.2	8.6	9.5
9	9.2	8.3	9.2	7.5	7.8	8.4	9.2	12	8.5	7.4	8.7	9.5
10	9	9	9.3	7.6	7.8	8.3	9.6	12.1	8.1	7.8	8.5	8.8
11	10	9.3	9.1	7.9	7.7	8.1	10.8	12.2	8.2	7.8	8.2	8.9
12	10.1	9.1	8.5	7.7	7.8	8	9.6	12.2	8.4	7.8	7.6	9.6
13	10.2	8.3	8.4	7.7	7.7	8.6	9.9	11.3	8.5	7.8	7.8	9.5
14	10	9	8.9	7.9	7.2	8.3	9.9	10.5	7.3	7.7	8.3	10.2
15	9.8	9.9	8.8	7.6	7.6	8.3	9.3	11	6.8	7.3	8.5	10.3
16	9.2	9.9	8.5	7.5	7.7	8.1	8	9.5	7.6	7.6	8.6	10.4
17	9	9.8	8.4	7.7	7.8	8.3	8	10.1	7.9	7.9	8.4	8.8
18	10.8	9.3	8.1	7.9	7.8	7.9	8.9	10.4	7.9	7.9	8.2	8.6
19	10.9	9.2	7.6	7.9	8	8	9.5	11	8.1	7.8	7.6	9.3
20	11	8.6	7.8	7.8	8.1	8.6	10.1	10.2	7.9	7.8	7.9	9
21	10.7	8.7	8.2	7.9	7.5	9	10.4	10.4	7.9	7.7	8.5	9
22	10.8	9.4	8.3	7.7	6.5	8.6	11	10.3	8	7.2	9.1	9.3
23	10.3	9.6	8.3	7.4	8	8.9	10.2	9.9	7.9	7.5	9.5	9.9
24	10.1	9.7	8.3	7.4	7.8	8.4	10.4	9.2	7.6	7.8	9.5	9
25	11.1	9.5	8.2	7.7	7.9	7.8	10.9	9.7	7.8	7.9	9.2	8.7
26	10.7	9.2	7.7	7.7	7.8	8.1	10.6	9.4	8.3	7.9	8.6	9.7
27	10.3	8.4	7.9	7.7	7.8	8.4	10.3	8.5	8	7.9	8.6	10.2
28	10.1	8.8	8.2	7.8	7.5	8.8	9.9	8.4	8	7.7	9.6	10.2
29	9.9	9.9	8.3	7.6	7.7	8.7	9.9	8	7.8	7.4	9.5	10.3
30	9.2		8.1	7.3	8	8.9	10.3	8.5	7.8	7.7	9.2	9.9
31	9.5		8		8.1		10	7.7		8.5		8.9

3) Case 3 부하

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1	23.12	27.95	23.94	29.04	22.79	31.32	33.99	36.5	30.8	28.9	23.8	26.8
2	24.72	28.5	26.95	22.76	29.06	25.41	36.02	35	29.7	24.1	30.3	25.7
3	26.34	27.76	33.07	29.91	27.84	27.87	37.38	37.1	30	25.5	26.5	25.6
4	25.15	24.37	24.5	30.18	26.82	28.36	35.87	40.7	31.9	23	27.5	27.7
5	25.75	23.91	23.6	29.76	27.68	28.49	31.14	41.4	32.6	25.8	29.4	28
6	25.23	27.91	29.1	30.83	27.47	29.38	36.4	43.9	34.2	28	22.4	24.2
7	23.96	31.38	27	29.69	28.52	30.98	38.61	43	31.3	28.4	31	29.2
8	22.03	24.13	27.01	27.97	25.49	31.02	36.98	42.2	32.2	23.6	27.6	27.9
9	24.74	27.76	25.68	28.59	29.63	24.08	37.93	43.2	31.3	30.7	23.3	29.98
10	25.52	28.16	25.99	30.59	29.92	28.24	39.34	39.2	30.9	32.6	30.6	31.6
11	25.5	29.35	24.91	29.36	24.1	28.5	37.06	36.6	29.4	30.8	23.3	36.8
12	24.44	28.85	22.92	29.98	30.18	29.46	42.74	32.9	33	30.8	29	38
13	28.18	30.78	30.5	29.33	24.86	30.07	43.9	31.8	31.9	30.2	24	37.6
14	28.42	24.74	30.73	29.75	28.27	30.88	42.9	33.1	31.4	24.6	31.1	37.1
15	24.06	27.61	29.02	23.5	29.72	29.12	39.2	34.9	29.4	29.6	24.7	35.4
16	25.74	29.33	28.98	28.56	24.62	29.92	41.5	37.4	29.9	30.4	28.9	33.6
17	24.09	31.94	25.97	27.47	30.08	28.49	44.4	36	30.1	30.5	28.9	34.5
18	27.34	31.66	25.38	29.84	30.06	29.15	43.4	35.9	32	30.7	26.5	36.7
19	28.29	23.1	27.52	27.07	30.32	30.74	36.6	33.8	29.4	30.4	24.3	36.8
20	25.36	25.16	30.21	29.81	25.12	31.92	46	35.4	31.3	29.7	26	37.2
21	26.65	25.47	28.87	30.69	29.57	31.39	50.1	37.5	31.3	22.7	33.5	36.5
22	28.35	25.34	25.84	27.87	25.52	32.7	42.4	39.3	31.7	28.9	26	34.6
23	31.13	24.77	26.14	28.12	31.33	30.09	45.2	44.1	29.6	30.2	26	29.4
24	29.77	25.81	28.31	29.24	30.52	31.19	40.3	44.2	29.9	30.2	26.3	26.5
25	30.81	23.52	27.64	29.97	30.79	30.72	38.9	38.3	32.4	30.4	26.4	24.7
26	26.72	22.34	22.49	29.52	23.77	32.3	34.3	32.1	25.1	23.9	23.8	28.5
27	22.79	25.23	25.61	29.59	27.93	29.85	34.9	31.5	31.2	30.1	27.1	31.8
28	22.48	24.32	28.46	23.09	28.64	33.42	37.6	36.9	30.9	28.3	25.9	33.8
29	21.28		28.19	27.84	32.28	32.74	32.9	34.1	29.5	28.3	25.8	29.9
30	23.53		27.89	28.2	24.59	35.37	34.8	33.1	28.7	27.4	27.2	24.4
31	26.42		30.07		31.7		36.6	32.3		30.5		24.4