

재난 이후, 전력 복구 향상을 위한 다기간 공급망 재구성 및 수리 일정 계획 동시 최적화

김하늘¹, 윤명석², 차형주¹, 최승연³, 정태수^{4*}

^{1,4}고려대학교 산업경영공학부, ^{2,3}고려대학교 전기전자공학부

Co-optimizing Power Grid Operations and Repair Scheduling during Prolonged Outages

Haneul Kim¹, Myungseok Yoon², Hyungjoo Cha¹, Sungyun Choi³, Taesu Cheong^{4*}

^{1,4}Department of Industrial and Management Engineering, Korea University

^{2,3}Department of Electrical Engineering, Korea University

In this study, we address the optimization problem of reducing the power restoration period after a major natural disaster. To improve the resilience of power restoration at each demand location, we schedule repairs to the fault locations along the power grid, and reconfigure the power grid as components in the grid are repaired. Most repair scheduling and network reconfiguration co-optimization problems considered only a radial network as the power grid configuration, with a small number of switches that determine whether a line is operational or not. In addition, despite the need for long-term scheduling, they approached it as a traditional scheduling problem that did not consider for off-hours. The value of this research is to propose optimal network configures and repair schedule considering off-hours and a smart grid with multiple power supply routes and power sources. To achieve this, we introduce a mixed integer linear programming and a matheuristic that takes into account the complexity of the problem.

Keywords: Smart Grid, Power Distribution System, Repair Crew Scheduling, Network Reconfiguration, Resilience after Post disaster

논문접수일 : 2023.10.21. 논문수정일 : 2024.02.28. 게재확정일 : 2024.03.15.

1. 고려대학교 산업경영공학부 석박통합과정

2. 고려대학교 전기전자공학부 박사과정

3. 고려대학교 전기전자공학부 교수

4*. 고려대학교 산업경영공학부 교수, Corresponding Author: tcheong@korea.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경

전력망의 안정적 운용은 태풍, 폭풍우와 같은 피해가 큰 재난들을 견디고 얼마나 신속하게 전력 공급을 재개하는지에 따라 좌우된다 (Shi, 2022). 자연재해의 발생 빈도는 지속해서 상승하고 있으며, 이에 따라 사회 유지 기반 시설이 손상되는 사례가 증가하고 있다. 그 예로 2017년도 허리케인 하비, 마리아, 그리고 일마에 의해 미국에서 정전 사태가 발생하였으며, 이로 인한 미국 내 경제적 손실은 약 2,020억 원에 달하였다 (Drye, 2017). “Figure 1”은 허리케인 일마와 마리아가 지나간 이후의 전력망 회복 속도를 나타낸다. 허리케인 일마에 의해 손상된 플로리다의 전력망의 경우, 완전 회복까지 18일이 소요되었으며, 마리아에 의해 손상된 푸에르토리코의 전력망의 경우, 약 한 달 이후 20% 수준의 전력 공급이 가능하였다.

이렇듯 예기치 않은 사건으로 인한 정전 사태는, 특히 많은 사회적 자본이 투입된 도심 지역에 막대한 경제적 및 사회적 손실을 초래한다. 그뿐만 아니라 병원 그리고 국가 중요 시설에서의 전력 공급 단절은 인명 및 국가 단위의 운영에 피해를 준다. 사회 유지 기반 시설(Social Infrastructure) 중 하나인 전력망은 경제 활동, 인간 생활을 영위하는 데에 있어 필요한 핵심 시설이다. 본 연구는 사회 유지 기반 시설이 되는 다양한 물류망 중 하나로써 전력망에 대해 접근하며, 재난 상황이 발생했을 때의 그 운용에 대한 최적안을 제시한다.

1.2 스마트 그리드

전력망 손상 시 비교적 경제적 피해가 클 것으로 예상되는 도심 지역의 전력망은 안정적 운용을 위한 다양한 장치 및 구성을 가진다. 본 연구에서 다루는 전력망의 유형은 이러한 안전장치들을 가진 스마트 그리드이다.

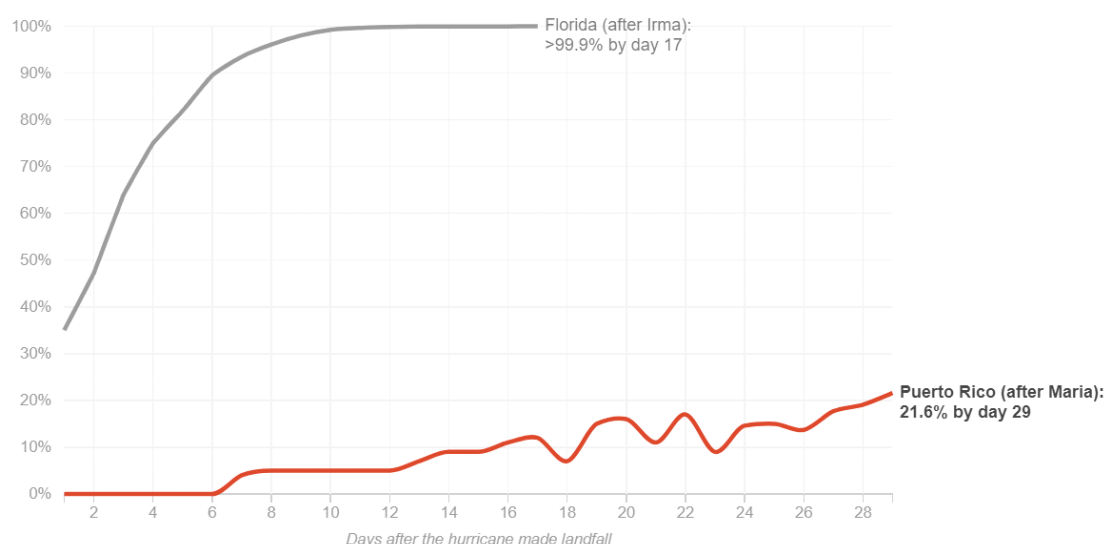


Figure 1. Power Restoration After Hurricanes Maria And Irma (Webber, 2017)

스마트 그리드(Smart Grid)란 정보통신기술을 접목하여, 실시간으로 공급지와 수요지 간의 정보 교환을 가능케 하는 지능형 전력 인프라 시스템으로 알려져 있다. 이 스마트 그리드는 전력 공급 안정성 향상을 위한 다양한 요소를 지닌다. 첫 번째는 신재생에너지와의 계통 연계로 여러 분산전원(Distributed Generator)이 전력망 내에 연결된다. 분산전원은 제어 방식에 따라 그리드팔로잉(Grid-Following)과 그리드포밍(Grid-Forming)으로 세분된다. 이 중 그리드포밍 방식의 분산전원은 다른 발전원 유무와 관계없이 독립적인 운영이 가능한 요소로써, 이를 활용하여 전력망 내에 여러 소규모 독립형 전력망(Micro Grid)을 형성할 수 있다. Pham(2009)는 전력망에 중대한 결손이 발생했을 때, 분산전원을 통한 소규모 독립형 전력망의 운영은 중요 부하에 전력 공급을 계속할 수 있는 대안임을 언급하였다. 실제로 화석 연료 기반의 분산전원의 경우, 정전 발생 시의 대체 전력원으로써 많이 활용되고 있다(Hickye, 2002).

두 번째, 스마트 그리드는 메시 그리드(Mesh Grid)의 네트워크 토폴로지(Topology)로 구성될 수 있다. 메시 그리드는 허브 집중 방식(Hub and Spoke), 방사형 구조(Radial Network)와 다르게 공급지로부터 수요지에 다다른 경로가 다양하다. 따라서 전력망 내 일부 전선이 손상되더라도 수요지에 전력을 공급할 수 있는 다른 경로를 모색할 수 있다.

마지막으로 스마트 그리드는 대부분의 전선에 전력 스위치가 존재하며, 전력 스위치의 원격 통제가 가능하다. 전력 스위치는 일반적으로 각 전선에 대한 전력 공급의 여부를 결정하기 위한 장치이다. 재난 상황에서는 전력망 상에서의 2차 피해를 최소화하기 위해서 손상된 구성 요소에 대한 전력 공급을 스위치를 통하여 차단할 수 있다. 종합하여 스마트 그리드는 전력 스위치를 통하여 실시간으로 전력망의 구성안(Network Configuration)을 변경할 수 있으며, 이를 통하여 손상된 지점의 전력 공급의 차단 및 가용할 수 있는 일부 설비를 활용한 소규모 독립형 전력망 구축이 가능하다. 이때, 배전 계통 내에 구성되는 전력망은 모두 방사형 구조를 따라야 한다(Ding, 2017).

1.3 전력망 운영 프레임워크

복구 기간의 전력망 운영은 크게 네 가지 단계(손상 평가, 초기 전력망 구성, 전력망 구성 요소 수리, 전력망 재구성)로 구성될 수 있다. 첫 번째는 손상 평가(Damage Assessment) 단계이다. 해당 단계에서는 자연재해 이후, 전력망의 손상 지점 및 정도를 평가하는 단계이다. 전력망의 구성 요소 상에 작업자를 파견하여 지점의 손상 여부 및 지점별 예측 수리 시간을 파악한다.

두 번째는 초기 전력망 구성(Initial Network Configuration)으로 현재 운영 가능한 전원 장치 및 전선을 기반으로 수요지별 전력 공급 여부 및 네트워크 형태를 결정한다. 앞으로 네트워크 (재) 구성이란 주어진 네트워크 정보 및 구성 요소별 운영 가능 여부를 기반으로 어느 전력 공급원으로부터 어떤 수요지에 전력을 공급할지 결정하며, 또한 부분 네트워크(Sub network)를 결정하는 문제로 정의한다.

세 번째는 전력망 구성 요소 수리(Repaired a Fault Line) 단계이다. 위 단계에서는 작업자들을 팀 단위로 일부 손상 지점들에 파견(Dispatch)한다. 각 손상 지점의 수리 시간은 일반적으로 상이하며, 이에 따라 같은 시점에서 수리를 시작한 임의의 두 지점의 수리 완료 시간은 서로 다를 수 있다. 수리를 완료한 이후, 작업자들은 아직 수리하지 못한 손상 지점으로 이동하게 된다.

전력망 재구성(Network Reconfiguration) 단계는 임의의 손상 지점이 수리됨에 따라 매번 수행된다. 손상 지점의 수리 완료가 의미하는 것은 전력망 내의 가용 가능 설비의 증가이다. 수리된 설비를 활용하였을 때, 현재보다 더 많은 수요지에 전력 공급 가능한 전력망을 구성할 기회를 얻을 수 있다. 구성 요소 수리 및 재구성 단계는 전력망 내 모든 구성 요소의 수리가 완료될 때까지 반복된다. “Figure 2”는 앞서 언급한 전력망 운영 프레임워크의 일부 단계를 나타낸 그림이다. 검은색을 띤 네트워크 구성 요소는 운용 가능함을, 붉은색을 띤 요소는 손상되었음을, 푸른색을 띤 요소는 전력 공급을 받고 있음을 나타낸다. 650번 노드

는 변전소, 611번 노드는 분산전원을 의미하며, 그 외 노드들은 수요지를 의미한다.

그림 상의 네트워크는 각각 변전소와 분산전원을 최상위(Root) 노드로 한 트리 구조의 부분 네트워크로 구성돼 있다. 본 연구에서는 고려하는 분산전원은 그리드포밍 방식으로 운용하기에 발전원별로 부분 네트워크가 생성된다. 또한 전력망 운용 측면의 안전성을 고려하여 모든 소규모 독립형 전력망은 방사형 구조, 즉 트리 구조를 가진다.

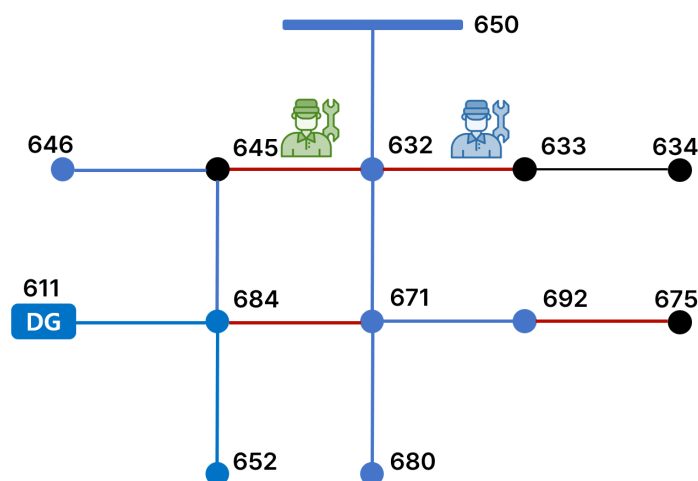


Figure 2. Example of Operation Frameworks

1.4 수리 일정 계획 및 네트워크 재구성의 관계

수리 일정 계획 문제는 전력망 내의 여러 수리 지점에 대하여, 각 수리 팀의 수리 순서를 결정짓는 문제이며, 네트워크 (재) 구성 문제는 부분 네트워크를 생성하고 수요지별 전력 공급 여부를 결정하는 문제이다. 네트워크 재구성 측면에서, 수리 일정 계획에 따라 매 의사결정 시점별 운용할 수 있는 설비가 증가한다. 이는 수리 일정 계획에 따라 가능한 네트워크 구성안 및 수요지별 공급 여부가 달라질 수 있음을 의미한다.

반면, 수리 일정 계획 측면에서는 어느 손상 지점의 수리가 완료된 이후, 네트워크 재구성 안에 따라 다음 수리 완료 시점까지의 총 전력 공급량 및 지점별 전력 공급 여부가 결정된다. 이는 네트워크 재구성 안이 상이함에 따라, 다음으로 수리해야 할 최적의 손상 지점이 달라질 수 있음을 뜻한다.

따라서 각각 문제에서의 의사결정은 다른 문제의 의사결정에 영향을 끼치게 되며, 이는 선행 연구 및 본 연구가 수리 일정 계획 및 네트워크 재구성 문제에 대한 동시 최적화를 다루는 이유이다. 다음 절에서는 재난 이후의 전력망 최적 운용 방안에 대한 선행 연구상에서의 접근법에 대하여 살펴본다.

1.5 선행 연구

배전 계통상에서의 수리 일정 계획 및 네트워크 재구성 동시 최적화 문제는 다양한 문제 설정 가능성을 지닌다. 먼저 목적식은 크게 운영 비용 최소화 및 고객 서비스 최대화, 두 가지로 분류된다. 운영 비용 최소화 관점에서 주로 고려되는 것은 수요지별 전력 평균분배(Load Shedding) 비용, 공급 불가에 따른 비용이 있다. 전력망 운영 비용 관점에서 분산전원 및 스위칭 작업 비용 또한 고려될 수 있다.

고객 서비스 최대화 관점에서 주로 사용되는 지표는 공급 부하량 및 복구 시간이다. Tan(2019)은 전력망의 회복 속도를 정량적으로 평가하기 위하여 복구 기간의 누적 손실(Aggregate Harm) 최소화라는 목적식을 제안하였다. 그는 사회 유지 기반 시설의 회복력을 운용 가능성 발자취(Operability Trajectory)를 통해 표현하였다. 식 (1)은 누적 손실을 나타내며 이때 T 는 회복 기간을 의미하며, $Q(t)$ 는 “Figure 3”을 통해 제시된 함수로써 전체 전력 수요를 1로 정규화하였을 때 시간에 따른 시설의 회복 현황을 나타낸다. “Figure 3”의 곡선 위쪽 영역은 시간에 따른 누적 수요 미충족량을 나타내며, 특정한 복구 전략에 대한 회복력을 암시한다(Bruneau, 2003).

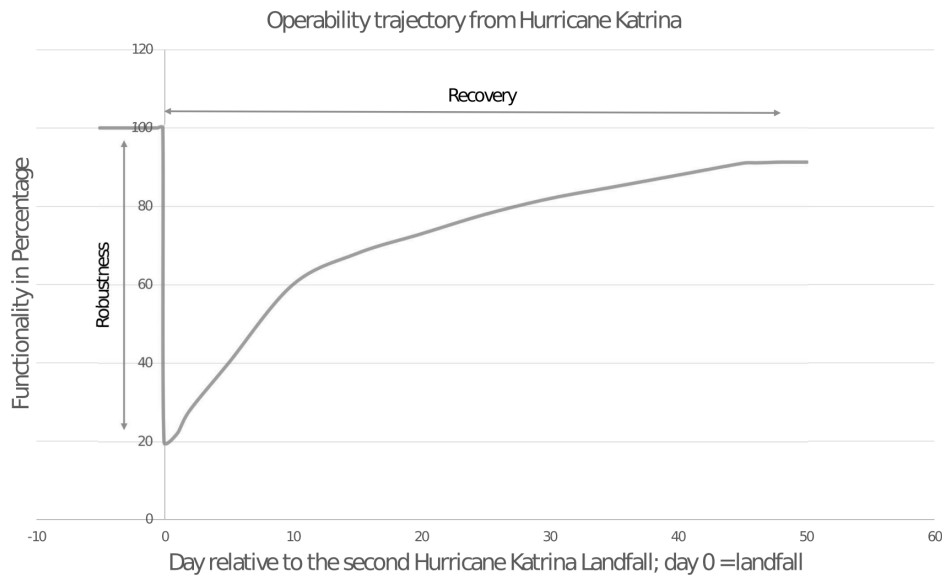


Figure 3. Operability Trajectory (Reed, 2009)

$$Aggregate\ Harm = \int_0^T (1 - Q(t))dt \quad (1)$$

수리 일정 계획 측면의 문제 구성에서는 수리 팀의 기능적 분할 및 수리 자원의 보충이 고려되었다. Lu(2022)는 수리 팀의 유형을 5가지로 세분화한 뒤, 수리 팀의 동시 수리 혹은 연속적인 수리가 필요한 손상 지점들을 고려하였다. Arif(2019)는 수리에 필요한 자원이 존재하며, 모든 수리 팀은 자원 소진 시, 차고지로 돌아와 자원을 보충해야 하는 문제를 제시하였다. 더불어 수리 팀별 방문이 가능한 손상 지점을 클러스터링한 뒤, 다중 외판원 문제(Multiple Traveling Salesman Problem)기반으로 수리 일정을 계획하여 문제의 복잡도를 낮추었다.

네트워크 구성 측면에서는 그 문제 구성으로 다양한 전력망 구성 설비 및 제약이 제시되었다. Arif(2019)와 Ding(2020)은 배터리 에너지 저장 시스템(Battery Energy Storage System; BESS)을 도입하여, 전력을 공급 받지 못하는 일부 수요지에 대한 긴급 전력 공급 전략을 제시하였다. Shi(2022)는 전선마다 열적 한계가 존재하여 전력 스위치를 여닫을 수 있는 횟수가 정해져 있음을 고려하였으며, 전력 평균분배 비용 및 화석 연료 기반의 분산전원의 운용비를 최소화하는 목적식을 제안하였다. Ding(2020)은 전력 스위치와 유사한 Soft Open Point(SOP) 설비를 고려하였으며, 네트워크 재구성 단계에서 여러 소규모 독립형 전력망을 형성하였다. 그는 수리 최적화 모형의 연산 속도를 향상시키기 위하여 Auxiliary Induce Function(AIF)를 적용하였다. 대부분의 선행 연구에서 배전 계통의 운영 제약으로써, 조류 해석 모델을 통한 수요지 및 전선에 대한 전압, 전류의 계산 및 그에 대한 상, 하한선이 제시되었다.

1.6 연구 차별성

복구 기간의 전력망 운영 최적화를 위하여 다양한 문제 설정이 제시되었지만, 본 연구는 기존 연구들과 비교하여 아래와 같은 차별성을 지닌다. 확인된 모든 선행 연구는 일정 계획을 수립하는데 업무 외 시간을 고려하지 않고 있다. 즉, 손상 지점의 방문 순서 혹은 수리 일정을 계획함에 있어, 전통적인 작업 일정 계획 문제 혹은 차량 경로 문제(Vehicle Routing Problem; VRP)로 접근하였다. 위 두 가지 문제에서는 작업자가 쉬지 않고 작업 혹은 방문하는 것을 전제로 하기에, 모든 작업 혹은 방문이 연속적으로 수행된다. 1.1 절에서 전력망의 복구에는 장기간이 소요될 수 있음을 보인 바 있다. 장기간을 요구하는 전력망 복구 작업에 모든 수리 팀을 복구가 끝날 때까지 연속적으로 운영하는 것은 현실적으로 불가능하기에 본 연구에서는 업무 외 시간을 고려한 최적 일정 계획안을 제시한다. 또한 업무 외 시간의 고려 여부에 따라 최적 일정 계획안이 달라질 수 있음을 실험을 통해 보인다.

확인된 모든 선행 연구에서는 일정한 시간 간격을 가진 이산 시간 공간을 바탕으로 의사결정을 수행한다. 일정한 시간 간격을 가진 이산 시간 공간 하에서의 문제 구성은 그 수리적 모형화가 비교적 단순하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 전력망의 일부 구성 요소의 수리 완료 시점과 그 직후의 네트워크 재구성 시점 간의 시간 간격이 발생한다. 네트워크 재구성을 진행함에 따라 추가로 공급할 수 있는 수요지가 존재할 경우, 그 시간 간격 대비 수요량만큼의 공급 손실이 발생한다. 해당 단점을 보완하기 위하여 시간 간격을 작게 가져갈 경우, 의사결정 변수가 증가하게 된다. 일정한 시간 간격을 가진 이산 시간 공간의 또 다른 문제점은 총 복구 기간을 예상할 수 없는 상황에서 임의의 예상 복구 기간을 지정해야 한다는 점이다. 본 연구에서는 사건 기반의 이산 시간 공간을 구성하였다. 사건 기반의 이산 시간 공간은 임의의 손상 지점에 대한 수리 완료 사건을 기반으로 시간 공간을 구성하기 때문에 앞서 언급한 일정한 시간 간격을 지닌 이산 시간 공간의 단점을 모두 보완할 수 있다.

Ding(2020)을 제외한 많은 연구에서는 네트워크 구성안으로 단일 방사형 형태의 네트워크만을 제시하였다. 본 연구에서는 단일 방사형 형태의 네트워크를 구성하지 않으며, 네트워크 내 속한 변전소 및 독립 운영이 가능한 분산전원을 최상위 노드로 하는 포레스트(Directed Rooted Forest) 구조의 네트워크 형태를 구성한다.

2. 문제 정의

앞서 1.3, 1.6 절을 통하여 문제 대상에 대하여 일부 밝힌 바 있으나, 추가적인 문제 설정을 함께 제시하여 본 연구에서 풀고자 하는 문제를 보다 명확히 하고자 한다. “Figure 4” 상에서의 검은색 테두리를 가진 영역은 본 연구에서 최소화할 대상으로 수요지별 전력 복구 기간과 전력 수요량의 곱에 대한 합으로 구성된다. 이는 시간에 따른 누적 공급 부하량(Cumulative Pick-up Loads)을 최대화하는 것과 동일하다. 그림상의 붉은 색 영역은 업무 외 시간을 의미한다.

문제의 대상이 되는 공급망은 도심 지역의 스마트 그리드이다. 해당 공급망은 메시 그리드 형태를 가지며, 다수의 발전원, 다수의 공급 경로를 가지며, 다수의 전선에 대하여 원격 제어할 수 있는 스위치를 포함한다. 전력망 운영 안정성을 고려하여 매 전력망 재구성 시점마다의 구성 가능한 부분 네트워크 형태는 방사형 네트워크로 제한한다.

본 연구에서의 수리 팀별 작업 능력을 모두 동일한 것으로 가정한다. 수리 팀의 유형은 전선 수리 팀(Line Repair Team; LT)과 중장비 팀(Heavy Machinery Team; HT)으로 구분된다. 전선 수리 팀은 전력망 내 모든 수리 지점에 대하여 파견되며, 중장비 팀은 수리 과정에서 나무, 차량과 같은 대형 장애물의 제거 작업이 요구되거나 전신주의 부러짐, 쓰러짐 등이 발생한 심각한 손상 지점에 대하여 파견된다. 심각한 수리 지점은 전선 수리 팀 및 중장비 팀의 동시 작업이 요구됨을 가정한다.

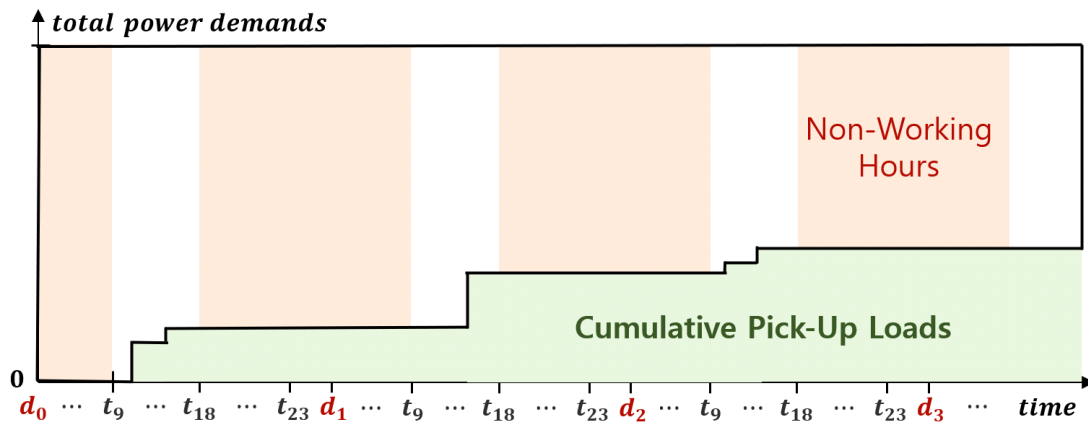


Figure 4. Power Recovery over Time

Tan(2019)은 일부 배전 계통의 경우, 지점 간 이동시간은 작업 시간과 비교하였을 때 상대적으로 작으며, 그에 따라 이동시간을 고려하지 않았다. 도심 지역의 배전 계통의 경우, 일반적으로 지점 간의 이동에 0.5 시간이 소요되는 데에 비해 수리에는 3~8시간이 소요된다(Shi, 2022). 이동시간은 수리 시간과 비교하여 상대적으로 적기 때문에 본 연구에서는 수리 지점 간의 이동시간은 고려하지 않는다.

부가적으로 전력망 내 구성 요소 중 수리 대상은 전력 공급의 핵심이 되는 전선만을 고려하며, 모든 수요 지점에 대하여 최초로 전력 공급을 받은 시점 이후부터 복구 기간의 종료 시점까지 전력 공급을 보장한다.

상기 언급된 문제 설정 및 가정의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 전력망은 두 개 이상의 전력원 및 다양한 전력 공급 경로를 가짐
- 전력망은 전력 스위치를 원격으로 제어하여 전선의 운용 여부를 결정할 수 있음
- 전력망 구성 시 하나의 전력원을 최상위 노드로 하여 방사형 구조의 부분 네트워크가 형성됨
- 전력망 재구성은 하나 이상의 전선 수리가 완료된 시점에서 수행
- 수리 팀은 전선 수리 팀과 중장비 팀으로 구분됨
- 중장비를 요구하는 심각한 손상 지점의 경우, 전선 수리 팀 및 중장비 팀이 모두 도착하였을 때부터 수리 작업이 시작됨
- 수리 팀의 지점 간 이동시간은 고려되지 않음
- 모든 수리 팀의 작업 능력은 동일함
- 공급 재개한 수요지에 전력 공급을 중단할 수 없음

3. 혼합 정수 선형 계획법

본 절에서는 상기 언급한 문제 정의를 바탕으로 설계한 혼합 정수 선형 계획법 모형을 제안한다. 모형의 제약식은 그 기능에 따라 수리 일정 계획, 네트워크 구성, 배전 계통 운영, 그리고 목적식과 연관된 제약식 4가지로 분류한다. 3.1 ~ 3.4 절은 각 제약식 및 제약식에 등장하는 집합, 매개변수, 그리고 결정변수를, 3.5 절은 목적식을 다룬다.

3.1 수리 일정 계획 관련 제약

본 절에서 활용되는 집합, 매개변수, 그리고 결정변수는 다음과 같이 정의된다.

Table 1. Notation Associated with the Repair Crew Scheduling

Sets and Parameters	
T	Set of repair sequence
C	Set of crews
C^L	Set of crews belonging to the line repair team
C^H	Set of crews belonging to the heavy machinery team
E^{RE}	Set of fault locations (lines)
E_{CR}^{RE}	Set of critical fault locations
R_l	Estimated required repair time for fault location l
Variables	
$z_{c,l}$	If crew c repairs the fault location l , $z_{c,l} = 1$, otherwise $z_{c,l} = 0$
$z_{c,l,k}$	If crew c moves from location l to location k , $z_{c,l,k} = 1$, otherwise $z_{c,l,k} = 0$
b_l	Beginning time of repair job for the fault location l
e_l	End time of repair job for the fault location l

“Table 1”에서 제시된 집합, 매개변수, 그리고 결정변수를 활용하여 수리 일정 계획에 대한 다음과 같은 제약식을 정의한다.

$$\sum_{c \in C^L} z_{c,l} = 1, \forall l \in E^{RE} \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C^H} z_{c,l} = 1, \forall l \in E_{CR}^{RE} \quad (3)$$

$$z_{c,l} = 1, \forall c \in C, l \in \{-1, 0\} \quad (4)$$

$$\sum_{k \in E^{RE} \cup \{-1\}} z_{c,l,k} = z_{c,l}, \forall c \in C, l \in E^{RE} \cup \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{l \in E^{RE} \cup \{0\}} z_{c,l,k} = z_{c,k}, \forall c \in C, l \in E^{RE} \cup \{-1\} \quad (6)$$

$$\sum_{k \in E^{RE} \cup \{-1\}} z_{c,0,k} = 1, \forall c \in C \quad (7)$$

$$\sum_{k \in E^{RE} \cup \{0\}} z_{c,l,-1} = 1, \forall c \in C \quad (8)$$

$$e_l \leq b_k + M \cdot (1 - z_{c,l,k}), \forall c \in C, l \in E^{RE} \cup \{0\}, k \in E^{RE} \cup \{-1\} \setminus \{l\} \quad (9)$$

$$e_l \geq R_l + b_l, \forall l \in E^{RE} \quad (10)$$

$$z_{c,l} \in \{0, 1\}, \forall c \in C, l \in E^{RE} \cup \{-1, 0\} \quad (11)$$

$$z_{c,l,k} \in \{0, 1\}, \forall c \in C, l \in E^{RE} \cup \{0\}, k \in E^{RE} \cup \{-1\} \quad (12)$$

$$e_l, b_l \geq 0, \forall l \in E^{RE} \quad (13)$$

수리 일정 계획 관련 제약은 크게 각 수리 팀에 대한 방문 지점 및 방문 순서를 결정하는 데에 관련된다. 식 (2)에 의하여 모든 손상 지점에는 단 하나의 전선 수리 팀이 파견되어야 한다. 마찬가지로 식 (3)은 심각한 손상 지점에 대해 단 하나의 중장비 팀이 파견되어야 함을 의미한다.

본 수리 모형에서는 인공 노드 0, -1을 각각 모든 수리 팀에 대한 업무 시작 지점과 업무 종료 지점으로 정의한다. 식 (4)는 모든 수리 팀은 인공 노드 0, -1을 한 번씩 방문함을 의미한다. 각 수리 팀 c 는 식 (5)-(6)에 의해 그들이 담당하는 손상 지점들을 하나의 지점씩 순차적으로 방문하게 된다. 식 (7)-(8)은 각 수리 팀 c 에 대하여 업무 시작 지점 이후의 방문 지점과 업무 종료 지점 이전의 방문 지점은 각각 오로지 하나임을 나타낸다.

식 (9)은 수리 팀의 방문 순서가 l, k 인 경우, k 지점에서의 수리 시작 시간은 항상 l 지점에서 수리가 완료된 시간보다 크거나 같음을 의미한다. 반면 식 (10)은 손상 지점 l 의 수리 완료 시간이 수리 시작 시간과 수리 작업 시간의 합보다 크거나 같음을 나타낸다. 식 (11)-(12)를 통해 부경로(Subtour)의 생성을 방지할 수 있다. 그와 동시에 식 (9)-(10)은 임의의 심각한 손상 지점의 수리 시작 시간이 전선 수리 팀과 중장비 팀의 수리 시작 시간 중 큰 값에 해당할 수 있도록 한다.

3.2 네트워크 구성 관련 제약

Table 2. Notation Associated with the Network Configuration

Sets and Parameters	
N	Set of nodes(buses;demand locations)
N^{SS}	Set of nodes with power supplies
E	Set of lines
E^{SW}	Set of lines with switches
E^{SS}	Set of lines connected to power supplies
$\delta(l)$	Set of nodes connected to edge l
$\pi(i)$	Set of nodes connected to node i
Variables	
y_l	Repair completion order for the fault location l
$\alpha_{l,t}$	If line l is operable at stage t , $\alpha_{l,t} = 1$, otherwise $\alpha_{l,t} = 0$
$x_{i,j,t}$	If node i is the parent of node j at stage t , $x_{i,j,t} = 1$, otherwise $x_{i,j,t} = 0$
$\sigma_{g,j,t}$	If node j is powered by power supply g at stage t , $\sigma_{g,j,t} = 1$, otherwise $\sigma_{g,j,t} = 0$

$$t - y_l \geq -M \cdot (1 - \alpha_{l,t}) \quad , \forall l \in E^{RE}, t \in T \quad (14)$$

$$t - y_l + 1 \leq M \cdot \alpha_{l,t} \quad , \forall l \in E^{RE} \setminus E^{SW}, t \in T \quad (15)$$

$$\alpha_{l,t} = 1 \quad , \forall l \in E \setminus (E^{SW} \cup E^{RE}), t \in T \quad (16)$$

$$x_{i,j,t} + x_{j,i,t} = \alpha_{l,t} \quad , \forall i, j \in \delta(l), l \in E, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{i \in \pi(j)} x_{i,j,t} \leq 1 \quad , \forall j \in N, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{i \in \pi(g)} x_{i,g,t} = 0 \quad , \forall g \in N^{SS}, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{g \in E^{SS}} \sigma_{g,j,t} \leq 1, \forall j \in N, t \in T \quad (20)$$

$$\sigma_{g,i,t} \leq \sigma_{g,j,t} + (1 - \alpha_{l,t}), \forall g \in E^{SS}, i, j \in \delta(l), l \in E, t \in T \quad (21)$$

$$\sigma_{g,i,t} \geq \sigma_{g,j,t} - (1 - \alpha_{l,t}), \forall g \in E^{SS}, i, j \in \delta(l), l \in E, t \in T \quad (22)$$

$$\sigma_{g,g,t} = 1, \forall g \in E^{SS}, t \in T \quad (23)$$

$$x_{i,j,t} \in \{0,1\}, \forall j \in \pi(i), i \in N, t \in T \quad (24)$$

$$\alpha_{l,t} \in \{0,1\}, \forall l \in E, t \in T \quad (25)$$

$$\sigma_{g,j,t} \in \{0,1\}, \forall g \in N^{SS}, j \in N, t \in T \quad (26)$$

네트워크 구성 문제와 관련된 집합 및 변수는 “Table 2”에 나타나 있으며, 이들은 매 수리 완료 시점마다 포레스트 구조의 네트워크 형태를 결정 짓는데 관계된다. 식 (14)-(16)은 전력망의 수리 진행에 따른 전선의 운용 여부를 결정한다. 식 (14)은 모든 손상된 전선 l 에 대하여 수리 완료 시점보다 이전의 시점에서의 전선의 운용은 불가함을 나타내준다. 식 (15)는 손상된 전선 l 중 전력 스위치를 포함하지 않는 전선들의 경우, 수리 완료 시점부터 항상 전선이 운용돼야 함을 의미한다. 마지막으로 식 (16)에 의해 스위치를 포함한 전선 및 손상된 전선에 해당하지 않는 전선들은 모든 시점에서 항상 운용된다.

식 (17)은 시점 t 에 운용되는 전선에 대한 전류의 방향은 하나이며, 운용되지 않는 전선에서의 전류는 차단됨을 의미한다. 식 (18)은 모든 노드의 전력 공급 경로는 하나 이하임을 의미하며, 식 (19)는 발전원에 해당하는 노드는 다른 노드로부터 전력 공급 받을 수 없음을 의미한다. 식 (17)-(19)에 의하여 네트워크 구성안은 포레스트 구조를 띠게 된다.

식 (20)-(21)은 t 시점에 운용되는 전선으로 연결된 두 노드는 동일한 발전원으로부터 전력을 공급받아야 함을 뜻한다. 식 (22)는 모든 발전원은 자기 자신으로부터 전력 공급받음을 나타낸다.

3.3 배전 계통 운영 관련 제약

Table 3. Notation Associated with the Distribution System Operations

Sets and Parameters	
P_i^D / Q_i^D	Active/reactive power demand of demand location i
$P_{i,j}^{\max} / Q_{i,j}^{\max}$	Active/reactive power limit for line (i,j) at stage t
$R_{i,j} / X_{i,j}$	Resistance/reactance of line (i,j)
V_g^{SS}	Reference voltage(voltage of a power supply g
V^R	Regular Voltage
ϵ	Tolerance of voltage fluctuations
Variables	
$p_{i,j,t} / q_{i,j,t}$	Active/reactive power on line (i,j)
$v_{i,t}$	Voltage on node i at stage t
$\rho_{i,t}$	If node i is energized at stage t , $\rho_{i,t} = 1$, otherwise $\rho_{i,t} = 0$

$$0 \leq p_{i,j,t} \in P_{i,j}^{\max} \cdot x_{i,j,t}, \forall i \in \pi(j), j \in N, t \in T \quad (27)$$

$$0 \leq q_{i,j,t} \in Q_{i,j}^{\max} \cdot x_{i,j,t}, \forall i \in \pi(j), j \in N, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{i \in \pi(j)} p_{i,j,t} - \sum_{i \in \pi(j)} p_{j,i,t} = \rho_{j,t} \cdot P_j^D, \forall j \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{i \in \pi(j)} q_{i,j,t} - \sum_{i \in \pi(j)} q_{j,i,t} = \rho_{j,t} \cdot Q_j^D, \forall j \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (30)$$

$$-M \cdot (2 - x_{i,j,t} - \sigma_{g,i,t}) \leq v_{j,t} - v_{i,t} + \frac{R_{i,j} \cdot p_{i,j,t} + X_{i,j} \cdot q_{i,j,t}}{V_g^{SS}}, \forall g \in N^{SS}, i \in \pi(j), j \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (31)$$

$$\leq M \cdot (2 - x_{i,j,t} - \sigma_{g,i,t})$$

$$V^R - \epsilon \leq v_{i,t} \leq V^R + \epsilon, \forall i \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (32)$$

$$\rho_{i,t} \leq \rho_{i,t+1}, \forall i \in N \setminus N^{SS}, t \in T \setminus \{|T| - 1\} \quad (33)$$

$$\rho_{i,t} \in \{0, 1\}, \forall i \in N \setminus N^{SS}, t \in T \cup \{-1\} \quad (34)$$

“Table 3”에 제시된 주요 매개변수 및 변수들은 배전 계통의 운용과 관련된 전기적 제약 및 수요지별 전력 공급 여부를 결정하는 제약 구성에 사용된다. 식 (27)-(28)은 t 시점에 운용되는 전선에 대한 유효/무효 전력(Active/Reactive Power)의 상한이 있음을 의미한다. 식 (29)-(30)은 전력 균형 방정식(Power Balance Equation)으로 네트워크 흐름 및 재고 관리 모형에서 사용되는 균형 흐름 제약(Flow Balance Equation)과 유사하다. t 시점의 수요 지점 j 에 대하여 전력 공급할 경우, $\rho_{i,t} = 1$ 이 되며, 전달받은 전력에서 지점 j 의 부하량만큼 차감된 전력량이 후속 노드로 전달된다.

식 (31)-(32)는 노드별 전압과 관련된 제약이다. 조류 해석에 있어서는 Baran(1989)가 제안한 LinDistFlow 모델을 사용하였다. 해당 모델을 바탕으로 식 (31)은 t 시점에서의 노드별 전압 크기를 결정한다. 이때의 정규 전압(Regular Voltage)은 노드가 연결된 발전원은 전압을 따른다. 식 (32)는 노드별 전압 크기의 상/하한을 제시한다.

마지막으로 식 (33)은 t 시점에 전력을 공급받는 수요지는 그 이후 시점에서도 지속해서 전력을 공급받아야 함을 뜻한다.

3.4 목적식 연관 제약

Table 4. Notation Associated with Constraints Related to the Objective

Sets and Parameters	
H^W	Working hours on day
H^{NW}	Non-working hours on day
U	Start time of job on day
W_i	Priority weight of load at demand location i
ψ	Weight of the term, which is the sum of the repair completion times per fault location
Variables	
f_l	Complete time of a repair job for the fault location l (considered working hours)
g_l	The number of days that elapsed since a repair job for the fault location l was completed
$f_{l,k}$	If $f_l < f_k$, $f_{l,k} = 1$, otherwise $f_{l,k} = 0$
$y_{l,t}$	If the repair at the fault location l is complete at stage t , $y_{l,t} = 1$, otherwise $y_{l,t} = 0$
$\gamma_{i,t}$	If node i is powered for the first time at stage t , $\gamma_{i,t} = 1$, otherwise $\gamma_{i,t} = 0$
h_i	Restoration time that the demand location i

$$f_l \geq e_l + g_l \cdot H^{NW} + U, \forall l \in E^{RE} \quad (35)$$

$$\frac{e_l}{H^W} \geq g_l \geq \frac{e_l}{H^W} - 1, \forall l \in E^{RE} \quad (36)$$

$$f_l \geq f_k + M \cdot (1 - f_{l,k}), \forall l, k \in E^{RE}, l \neq k \quad (37)$$

$$f_k \geq f_l + M \cdot f_{l,k}, \forall l, k \in E^{RE}, l \neq k \quad (38)$$

$$f_{l,k} + f_{k,l} = 1, \forall l, k \in E^{RE}, l \neq k \quad (39)$$

$$|E^{RE}| - y_l = \sum_{k \in E^{RE}} f_{l,k}, \forall l \in E^{RE} \quad (40)$$

$$y_l = \sum_{t=1}^{|T|} t \cdot y_{l,t}, \forall l \in E^{RE} \quad (41)$$

$$\sum_{i \in E^{RE}} y_{l,t} = 1, \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (42)$$

$$\sum_{t \in T} y_{l,t} = 1, \forall l \in E^{RE} \quad (43)$$

$$y_{l,0} = 0, \forall l \in E^{RE} \quad (44)$$

$$f_l, g_l, y_l \geq 0, \forall l \in E^{RE} \quad (45)$$

$$y_{l,t} \in \{0, 1\}, \forall l \in E^{RE}, t \in T \quad (46)$$

이 절에서는 수리 일정 계획과 네트워크 구성안을 바탕으로 업무 외 시간을 고려한 각 수요 지점별 전력 공급 시간 산정에 대해 다룬다. 관련된 매개변수 및 변수는 “Table 4”에서 제시된다. 식 (35)-(36)을 통하여 지점 l 의 수리 완료 시간 e_l 을 업무 외 시간을 고려한 수리 완료 시간 f_l 로 변환할 수 있다.

식 (37)-(38)은 지점 l 의 수리 완료 시간이 지점 k 의 수리 완료 시간보다 이르거나 같을 경우, $f_{l,k} = 1$ 이 되며, 그 반대의 경우에는 $f_{l,k} = 0$ 이 됨을 의미한다. 식 (39)는 지점 l, k 의 수리 완료 시간이 동일한 경우에도, 수리 완료 순서상에서는 그 둘 간의 선·후행 관계가 반드시 존재해야 함을 나타내고 있다. 두 지점이 수리됨에 따라 네트워크 재구성이 두 번 발생하지만, 그 사이의 시간 간격은 0이다. 따라서 두 지점의 수리 완료 순서가 달라지더라도 네트워크 재구성에 따른 노드별 최적 전력 복구 기간의 차이는 존재하지 않게 된다.

수리 완료 시점 기반 이산 시간 공간은 0, 1, 2, ..., 총 손상 지점 수까지로 구성 되어진다. 식 (40)-(43)을 통하여 각 이산 시간과 지점별 수리 완료 시점을 이분 매칭(Bipartite Matching)한다. 식 (40)은 지점별 상대적 수리 완료 순서 관계를 나타내는 $f_{l,k}$ 를 통해 지점별 절대적 수리 완료 순서를 의미하는 y_l 을 결정한다. 식 (41)-(43)에 의해 하나의 지점에 대한 수리 완료 순서는 하나의 시점에 대해 할당될 수 있으며, 그 역도 참이 된다.

$$h_i \geq f_l - M \cdot (2 - y_{l,t} - \gamma_{i,t}), \forall i \in N \setminus N^{SS}, l \in E^{RE}, t \in T \quad (47)$$

$$\rho_{i,t} - \rho_{i,t-1} = \gamma_{i,t}, \forall i \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (48)$$

$$\rho_{i,-1} = 0, \forall i \in N \setminus N^{SS} \quad (49)$$

$$\sum_{t \in T} \gamma_{i,t} = 1, \forall i \in N \setminus N^{SS} \quad (50)$$

$$h_i \geq 0, \forall i \in N \setminus N^{SS} \quad (51)$$

$$\gamma_{i,t} \in \{0,1\}, \forall i \in N \setminus N^{SS}, t \in T \quad (52)$$

식 (47)은 어떤 노드 i 의 전력 복구 시간은 해당 노드의 전력 복구 시점 t 에 수리된 l 지점의 수리 완료 시간을 하한으로 가짐을 의미한다. 식 (48)-(50)은 $\gamma_{i,t}$ 는 노드 i 가 최초로 전력 공급받은 시점 t 에 대해서만 1의 값을 가지도록 한다.

3.5 목적식

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in N \setminus N^{SS}} W_i \cdot P_i^D \cdot h_i + \psi \cdot \sum_{l \in E^{RE}} f_l \quad (53)$$

목적식은 두 가지 항으로 구성된다. 첫 번째 항은 식 (1)에 나타난 복구 기간의 누적 손실을 르베그 적분을 이용하여 다시 표현한 것이며, 수요지 별 전력 복구 기간과 전력 수요량의 곱에 대한 가중 합이다. 이때, W_i 라는 수요 지점 i 별 공급 우선순위 가중치를 고려한다. 높은 공급 우선순위를 가지는 수요 지점은 병원, 군부대, 그리고 정부 시설 등이 될 수 있다.

메시 그리드 형태의 전력망은 모든 전선의 수리가 완료되지 않더라도, 모든 수요 지점에 대한 전력 공급이 가능할 수 있다. 즉, 목적식을 첫 번째 항만으로 구성할 경우, 모든 수요 지점에 대한 전력 공급 이후 남은 수리 지점들의 최적 수리 완료 시간은 최소로 요구되는 수리 완료 시간과 다를 수 있다. 이 점을 보완하기 위하여 두 번째 항으로 지점별 수리 완료 시간의 합을 ψ 가중치를 곱한 형태로 구성한다.

4. 수리 모형 기반 휴리스틱

NP-hard 문제로 잘 알려진 차량 경로 문제 혹은 유연한 작업장 일정 계획 문제(Flexible Job Shop Scheduling Problem; FJSP)는 본 연구에서 제안된 수리 일정 계획 문제의 특별한 경우이다. 추가로 이 문제에서는 매 의사결정 시점마다 포레스트 구조의 네트워크를 구성하고 수요지에 대한 공급 여부를 결정해야 하기에 그 문제의 복잡도가 높다. 본 연구에서는 해 풀이에 드는 연산 시간을 줄이기 위하여 혼합 정수 선형 계획법 외에 수리 모형 기반의 휴리스틱 방법론을 제시한다.

4.1 유전 알고리즘

메타 휴리스틱(Meta Heuristic) 알고리즘으로 잘 알려진 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)은 자연선택 설에 따른 생물학적 진화를 모방한 전역 탐색이 가능한 최적화 방법론이다. 해당 알고리즘에서는 탐색 대상이 되는 해를 염색체로 정의한다. 알고리즘 과정에서 염색체에 대한 적합도 평가(Fitness Value Evaluation)를 수행하여 염색체의 우월성을 가늠한다. 염색체는 염색체 간의 교차(Crossover) 혹은 염색체의 변이(Mutation) 과정을 통하여 더 좋은 염색체로 진화할 수 있는 가능성을 내포하게 된다.

본 연구에서는 원 문제 중 수리 일정 계획 문제를 유전 알고리즘을 활용하여 그 해를 도출하고자 한다.

유전 알고리즘을 통해 얻은 수리 일정 계획안은 수리 모형에 의해 평가된다. 앞으로의 절을 통하여 본 연구에 적합한 염색체 및 연산자를 소개한다.

4.2 염색체

“Figure 5”는 전체적인 염색체의 구조를 나타낸다. 각 염색체를 구성하는 총 유전자(Gene)의 수는 $|E^{RE}| + |C| - 2$ 이며, 염색체를 구성하는 각 셀(Cell) 단위의 유전자는 수리 팀 구분자(Sep) 혹은 손상 지점을 의미한다. 염색체는 전선 수리 팀 유전자 집합(G_{LT})과 중장비 팀 유전자 집합(G_{HT})으로 작업 유형에 따라 구분할 수 있다. 작업 유형에 따른 유전자 집합은 수리 팀 구분자에 의하여 다시 팀별 손상 지점 방문 순서로 구분된다. 문제의 매개변수가 정의된 이후, 각 팀의 유전자 집합이 가지는 유전자의 종류는 변하지 않는다. 그림에서의 염색체는 첫 번째 전선 수리 팀이 $5 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 순서로 손상 지점을 방문하는 해를 나타낸다.

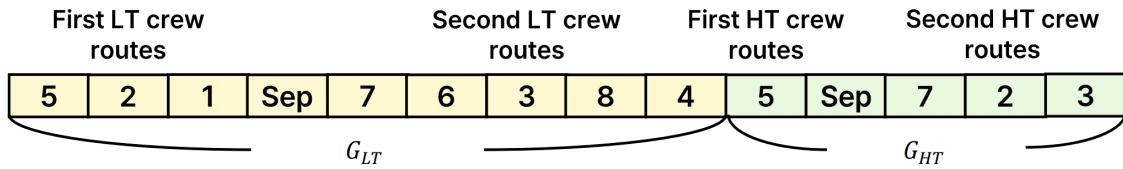


Figure 5. Chromosome

문제 특성을 고려하지 않는 진화 연산 혹은 각 유전자 집합별 무작위 비복원추출에 의해 생성된 염색체는 불가능해(Infeasible Solution)일 수 있다. “Figure 6”에서의 상단은 전선 수리 팀의 유전자 집합을 의미하며, 하단은 중장비 팀의 유전자 집합을 의미한다. 문제 설정에 의하여, 심각한 손상 지점은 두 유전자 집합에 모두 포함되며 전선 수리 팀과 중장비 팀의 동시 수리가 요구된다. 이에 기초하여 손상 지점들의 수리 순서를 그림 상의 구부러진 붉은 화살표로 나타낼 수 있다. 향후, 적합도 평가 단계에서 해당 수리 순서를 바탕으로 손상 지점별 수리 완료 시간을 계산하기에 수리 순서 내 순환은 허용되지 않으며, 이 염색체는 불가능해가 된다.

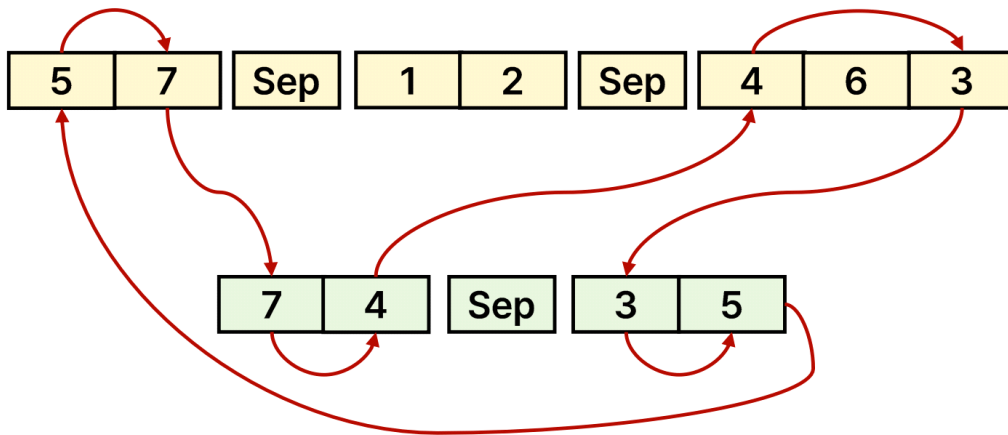


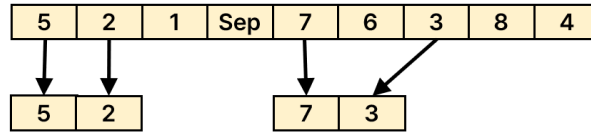
Figure 6. An Example of an Invalid Chromosome: Looping within a Job Sequence

4.3 의존적 순서 보존 연산

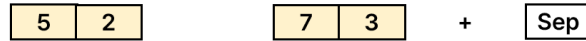
의존적 순서 보존 연산(Depended Order-Preserving Operator)은 염색체의 생성 단계인 인구 초기화(Initialize Population), 교차, 변이에서 앞서 보인 불가능해를 생성하지 않도록 본 연구에서 제시하는 연산이다. 해당 연산의 입력 자료는 전선 수리 팀의 유전자 집합이며, 출력 자료는 중장비 팀의 유전자 집합이다. 연산 과정에서 심각한 손상 지점에 대한 전선 수리 팀의 방문 순서를 보존하여 중장비 팀의 방문 순서를 무작위로 생성한다.

“Figure 7”은 의존적 순서 보존 연산을 단계적으로 설명한 그림이다. 이 중 세 번째 단계에서는 각 전선 수리 팀별로 먼저 수리되는 심각한 손상 지점이 나중에 수리되는 지점보다 중장비 팀의 유전자 배열상에서 더 작은 인덱스를 가지도록 한다.

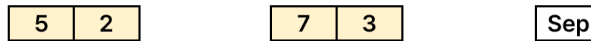
1. Ordered sampling only critical fault location on each LT crew routes



2. Adding (number of crews on the HT - 1) Sep

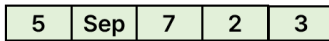


3. Random indexing while maintaining order for each genes



Index 0 < 3 2 < 4 1

4. Merging genes by Indices



Index 0 1 2 3 4

Figure 7. Depended Order-Preserving Operator

4.4 적합도 평가

염색체는 수요지별 전력 복구 기간과 전력 수요량의 곱에 대한 가중 합과 지점별 수리 완료 시간의 합이 작을수록 우월하다고 정의한다. 본 유전 알고리즘에서는 염색체의 팀별 지점 방문 순서를 활용하여, 부분 혼합 정수 선형 계획법 모형에 의하여 적합도 값(Fitness Value)을 산출한다. 사용되는 수리 모형은 아래와 같다.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in N \setminus N^{SS}} W_i \cdot P_i^D \cdot h_i + \psi \cdot \sum_{l \in E^{RE}} f_l \quad (54)$$

$$\text{Subject to} \quad (14)-(34)$$

$$(48)-(52)$$

부분 수리 모형은 앞서 제시한 수리 모형에서 수리 일정 계획 및 업무 외 시간을 고려한 지점별 수리 완료 시간을 결정하는 데 관련된 제약을 제거한 모형이다. 수리 모형은 지점별 수리 시간을 의미하는 f_l 과 지점별 수리 순서를 나타내는 이진 변수 $y_{l,i}$ 를 매개변수로 받는다. 두 매개변수는 유전 알고리즘의 염색체

정보를 가공하여 얻을 수 있다.

“Figure 8”은 염색체 정보가 의미하는 팀별 손상 지점 방문 순서 정보를 통해 손상 지점별 수리 완료 시간을 산출하는 과정을 나타낸다. 각 유전자 아래에 표시된 값은 지점별 수리 시간 혹은 누적 수리 시간을 의미한다.

1. Input the required repair time per line

5	2	1	Sep	7	6	3	8	4	5	Sep	7	2	3
8	6	3		6	5	5	3	4	8		6	6	5

2. Calculate the cumulative required repair time per line

5	2	1	Sep	7	6	3	8	4	5	Sep	7	2	3
8	14	17		6	11	16	19	23	8		6	12	17

3. Calibrate repair time recursively

5	2	1	Sep	7	6	3	8	4	5	Sep	7	2	3
8	14	17		6	11	16	19	23	8		6	12	17
5	2	1	Sep	7	6	3	8	4	5	Sep	7	2	3
8	14	17		6	11	16	19	23	8		6	14	19
5	2	1	Sep	7	6	3	8	4	5	Sep	7	2	3
8	14	17		6	11	19	22	26	8		6	14	19

Figure 8. Transform Repair Orders to Schedules

심각한 손상 지점의 경우, 전선 수리 팀과 중장비 팀이 동시에 수리를 시작해야 하며, 완료 시간이 동일해야 한다. 따라서 심각한 손상 지점에 대한 두 팀별 누적 수리 시간을 그중 큰 수로 하여 값을 일치시킨다. 이후, 값의 변동이 생긴 유전자 집합에 대해서 그 후속 방문 지점에 대한 누적 수리 시간도 보정 작업이 진행된다.

그림 상의 세 번째부터 다섯 번째 염색체를 통해서 그 보정 방식을 확인할 수 있다. 지점 2의 누적 수리 시간 값은 각각 전선 수리 및 중장비 팀에 대하여 14, 12이며, 그 차이는 2이다. 이중 큰 값은 14이므로 중장비 팀에 대한 지점 2의 수리 완료 시간에 2를 더한다. 이후, 지점 2 다음으로 중장비 팀이 방문하는 지점 3에 대해서도 수리 완료 시간에 2를 더한다. 지점 3은 전선 수리 팀도 방문해야 하기에, 전선 수리 팀이 지점 3 이후에 방문하는 지점들에 대해서도 동일한 보정이 적용된다.

그림 상의 세 번째 단계를 모든 수리 지점에 대하여 반복적으로 진행하여 지점별 수리 완료 시간을 계산할 수 있다. 해당 작업이 완료된 이후, 식 (35)-(36)을 활용하여 최종적으로 업무 외 시간을 고려한 지점별 수리 완료 시간을 도출한다.

4.5 선택/대치, 교차, 그리고 변이

유전 알고리즘은 세대를 거듭해 나감에 따라 보존할 일부 염색체를 선택하고 어떤 염색체를 통해 교차 및 변이 과정을 거칠지 선택한다. 이에 대한 본 유전 알고리즘의 전략은 엘리트주의(Elitism)로 적합도 값이 큰 염색체만을 보존하고, 진화 과정에 사용하는 전략이다.

교차 연산은 전선 수리 팀에 대한 순서 교차(Order Crossover; OX) 연산과 의존적 순서 보존 연산으로 구성된다. 순서 교차는 외판원 문제, 차량 경로 문제에서 자주 활용하는 연산으로 염색체의 순열 정보의 보

존이 필요한 경우 사용된다. 두 염색체에 대한 순서 교차 연산은 하나의 염색체 중 일부 유전자를 제거한 뒤, 나머지 염색체상의 유전자별 상대적 순서를 유지하며 제거한 유전자들을 재배치하는 연산이다. 이를 통하여 전선 수리 팀 유전자 집합을 변경하고, 이를 의존적 순서 보존 연산의 피연산자로 하여 중장비 팀의 유전자 집합을 생성한다.

변이 연산은 회전(Rotation) 연산과 의존적 순서 보존 연산으로 구성된다. 하나의 염색체에 대한 회전 연산은 염색체 중 일부 유전자를 선택하여, 특정 방향으로 임의의 크기만큼 이동시키는 연산이다. 마찬가지로 이를 통해 전선 수리 팀 유전자 집합을 변경하며, 이후 의존적 순서 보존 연산으로 중장비 팀의 유전자 집합을 생성한다.

4.6 파라미터

“Table 5”는 본 연구에서 사용된 유전 알고리즘의 파라미터들의 명칭, 설명, 그리고 설정값에 대하여 나타낸다. 알고리즘의 종료 조건은 2가지로 하나는 *EarlyStopCount* 회의 세대 전이 동안 세대마다 얻은 가장 좋은 적합도 값이 변화하지 않는 경우이며, 나머지 하나는 세대 전이를 *MaxGens* 회 반복한 경우이다.

Table 5. Parameters in Generic Algorithms

Parameters	Descriptions	Values
<i>EarlyStopCount</i>	The algorithm stops when the best fitness value does not change for <i>EarlyStopCount</i> number of generations	2
<i>MaxGens</i>	The algorithm stops when the number of generations reaches <i>MaxGens</i>	200
<i>ChildRatio_{El/Cr/Mu}</i>	Ratio of children generated by elitism/crossover/mutation strategies	0.2/0.6/0.2
<i>ChromoProp_{Cr/Mu}</i>	Crossover/mutation is operated on the top <i>ChromoProp_{Cr/Mu}</i> % chromosomes based on their fitness value	50/50
<i>GeneProb_{Cr/Mu}</i>	Probability of preserving each gene's relative order and value on a chromosome	0.5/0.5

세대는 각각 *ChildRatio_{El}*, *ChildRatio_{Cr}*, *ChildRatio_{Mu}*의 비율로 엘리트주의, 교차, 변이 전략에 의하여 생성된다. 이때 현재 세대 내 속하며, 적합도 기준 상위 *ChromoProp_{Cr}*, *ChromoProp_{Mu}*에 포함되는 염색체들이 각각 교차와 변이에 사용된다.

교차 연산 과정에서 두 염색체 중 하나의 유전자 일부를 그 상대적 순서를 유지한 채 보존한다. 이때 각각의 유전자가 보존될 확률은 *GeneProb_{Cr}*이며, 변이 연산 과정에서의 각각의 유전자가 보존될 확률은 *GeneProb_{Mu}*이다. 모든 파라미터의 값들은 반복적인 실험을 통하여 가장 평균적으로 좋은 성능을 내는 값으로 구성하였다.

5. 전산 실험

5.1 실험 환경

본 절에서는 수리 모형 및 수리 모형 기반 휴리스틱에 대한 실험 환경에 대해 다룬다. 실험에 사용된 CPU는 12th Gen Intel® Core™ i9-12900KS 3.40 GHz이며, RAM은 32GB, 4800MHz이다. 수리 모형의 풀

이에는 Gurobi 10.0.2를 사용하였으며, 수리 모형 기반 휴리스틱은 Python 3.8 환경에서 구현 및 실험 진행하였다.

“Figure 9”는 실험 대상이 되는 문제 인스턴스(Problem Instance)를 나타낸다. 두 전력망 모두 IEEE Test Node Test Feeder에 기초한 수정안이다. 원 구성에서 메시 그리드 구조를 형성하기 위하여 일부 전선을 추가하였으며, 일부 노드를 분산전원으로 수정하였다.

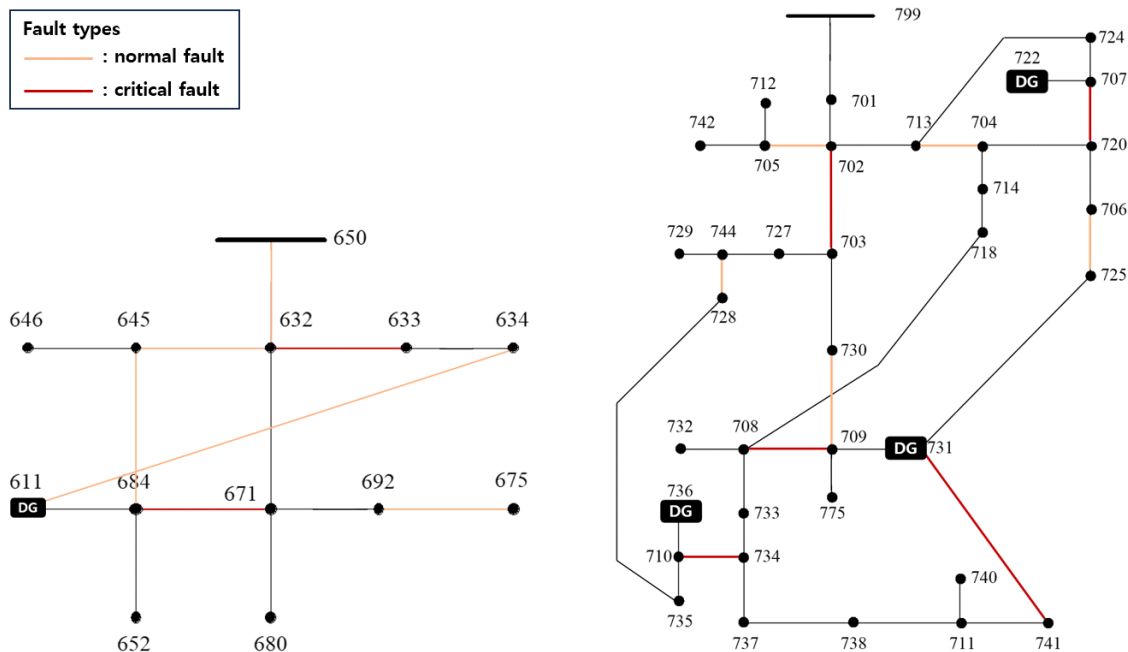


Figure 9. Modified IEEE 13, 37 Node Test Feeder

5.2 수리 모형과 수리 모형 기반 휴리스틱의 비교

본 연구와 동일한 문제 구성의 수리 일정 계획 및 네트워크 재구성 동시 최적화 연구는 지금까지 진행된 바가 없기에 본 연구에서 제시하는 방법론과 선행 연구에서 제시한 방법론의 비교는 불가하였다. 그에 따라 제시한 수리 모형과 수리 모형 기반의 휴리스틱 성능 비교만을 수행하였다.

Table 6. Comparison of MILP and Matheuristic

Instance	# LT	# HT	MILP			Matheuristic		
			Obj.val	Run time	Gap(%)	Obj.val	Run time	Gap(%)
13 node	2	1	107492.1	160.8(s)	0.0	107492.1	6.9(s)	0.0
37 node	3	2	11903.7	24.0(h)	100.0	11903.7	4.6(m)	0.0

위 실험에서 사용된 두 문제 인스턴스의 모든 전선은 전력 스위치를 포함한다. 지점별 수리 시간은 로그 정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다 (Japata, 2008). 그에 따라 로그 정규분포상의 표본 추출을 통해 지

점별 수리 시간을 결정하였으며, 이때 각 인스턴스에 대한 수리 시간의 평균은 약 5.5이며, 표준편차는 3이었다.

“Table 6”의 MILP Gap(%)은 풀이 과정에서 발견한 목적식 값의 상한과 하한의 비율을 의미하며, Matheuristic Gap(%)은 MILP 풀이로 얻은 목적식 값 상한과 Matheuristic을 통해 얻은 목적식 값의 비율을 의미한다. 13 노드 문제 인스턴스의 실험 결과를 통하여 수리 모형 기반의 유전 알고리즘이 최적해를 도출하는 데에 수리 모형보다 더 적은 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다. 37 노드 문제 인스턴스의 실험에서 수리 모형은 24시간 동안 최적해를 도출하지 못하였으며, 큰 문제 인스턴스를 수리 모형으로 해결하기엔 한계가 존재하는 것으로 나타났다. 반면 수리 모형 기반의 유전 알고리즘은 24시간 동안의 수리 모형 풀이 과정에서 얻은 목적식 상한과 동일한 목적식 값을 약 4분 40초만에 도출하였다.

수리 모형 기반의 유전 알고리즘의 해 품질을 확인하기 위하여 37 Node Test Feeder를 기반으로 추가 실험을 진행하였다. 최적해를 확인하기 위하여 전력 스위치 및 결손 지점의 수를 줄인 문제 인스턴스를 구성하였으며, LT와 HT 수를 변경해나가며 두 방법론의 성능을 비교하였다. “Table 7”은 그 실험 결과이며, 수리 모형 기반의 유전 알고리즘을 활용하였을 때 수리 모형의 목적식 상한값을 약 1분 남짓한 시간에 도출하는 모습을 확인할 수 있었다.

Table 7. Sensitivity Analysis for 37 Node Test Feeder

# sources	# lines	# switch lines	# fault lines	# Demands	# L T	# H T	Method	Obj.val	Run time	Gap (%)
2	40	8	6	33	2	2	MILP	20010.5	24.0(h)	33.1
							Matheuristic	20010.5	1.0(m)	0
					2	1	MILP	15623.5	24.0(h)	41.8
							Matheuristic	15623.5	1.0(m)	0
					1	1	MILP	37463.6	1.4(h)	0
							Matheuristic	37463.6	1.0(m)	0

5.3 업무 외 시간의 고려 유무에 따른 수리 모형의 해 비교

본 연구는 재난 이후, 전력망 복구에 있어 장기간이 소요될 수 있기 때문에, 업무 외 시간을 고려하지 않는 수리 일정 계획은 현실적이지 않음을 주장하였으며, 업무 외 시간을 고려한 문제 및 수리 모형을 정의하였다. 만약 업무 외 시간을 고려하지 않는 전통적 방식의 일정 계획 문제로 접근하였을 때, 두 문제의 최적해가 동일하다면 업무 외 시간의 고려는 불필요하다고 할 수 있다. 본 절에서는 업무 외 시간 고려 유무에 따라 수리 모형 풀이 시 최적해가 상이함을 보인다.

업무 외 시간을 고려하지 않는 수리 모형은 3절에서 소개된 수리 모형에서 식 (34)-(35)를 제외한 뒤 모든 수식 상의 f_i 변수를 e_i 로 대체하여 구성하였다. 실험은 하나의 13 노드 문제 인스턴스를 사용하여 진행하였다.

“Figure 10”은 두 모형의 수요지별 최적 전력 공급 시간 순서(Restoration Time Orders)와 손상 지점별 최적 수리 순서(Repair Completion Orders)를 나타낸다. 직사각형 내 숫자는 각 수요지를 의미하며, 같은 직사각형 내 포함된 수요지는 전력 공급 시간이 모두 동일하다. 원 내의 숫자는 각 손상 지점을 의미한다. 그림에서 나타나는 실험 결과를 통하여 업무 외 시간의 고려 유무에 따라 수리 모형의 최적해가 달라짐을 확인하였다.

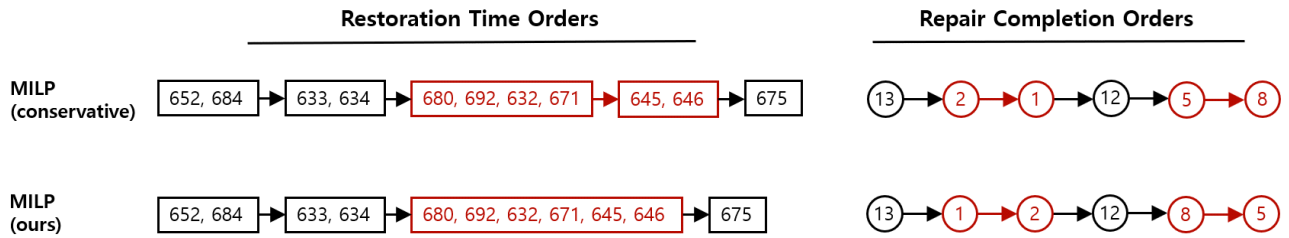


Figure 10. Comparison of Two MILPs on the Modified 13 Node Test Feeder

6. 결론

본 연구는 기존의 연구와 다른 수리 일정 계획 및 네트워크 재구성 문제를 제안하였다. 수리 일정 계획 문제상에서는 수리 팀 유형 세분화와 업무 외 시간을 고려한 일정 계획이 고려되었다. 또한 네트워크 재구성 문제를 메시 그리드 형태의 스마트 그리드 상에서 그리드 포밍 방식의 분산전원을 고려하여 소규모 독립형 전력망을 형성하는 문제로 정의하였다. 상기 문제 정의 및 사건 기반의 이산 시간 공간 하에서 수리 모형을 정의하였으며, 문제의 복잡도를 고려하여 수리 모형 기반 휴리스틱 방법론을 추가 정의하였다.

전산 실험을 통하여 수리 모형 기반의 휴리스틱 방법론이 수리 모형과 비교하여 더 이른 시간 내에 합리적인 해를 제공해 줄을 보였다. 이에 더해 업무 외 시간의 고려 유무에 따라 수리 모형의 최적해가 달라짐을 보였다. 이는 전력망 복구와 같이 장기간이 소요될 수 있는 작업과 병행하여 동적인 공급망 구성 변경이 요구되는 문제 상황에서 업무 외 시간을 고려하지 않을 경우 좋은 해를 얻지 못할 가능성이 있음을 시사한다.

향후 해당 연구는 앞으로 다양한 전력망 운영 요소를 고려한 문제 상황에 적용될 수 있다. 그 예로 시간에 따라 수요량이 상이한 상황이나, 부하차단(Load Shedding)과 같이 비용을 지불하고 공급량을 일정 시간 의도적으로 낮추는 것을 들 수 있다. 부하차단과 같이 사건의 발생 시점이 변수가 될 수 있는 경우, 사건 기반의 이산시간공간 하의 모형화는 도전적인 영역에 속한다. 이외에 에너지저장장치(Energy Storage System; ESS) 및 그 운송수단(Mobility)을 활용하여 적재적소에 전력을 공급하는 방식으로 추가적인 문제 정의가 제안될 수 있다.

현재까지 재해로 인한 공급망 내 손상이 발생하였을 때, 배전 계통처럼 공급망을 통한 물류 공급과 도로와 같은 공급망 내 설비의 수리를 동시 최적화할 수 있는 기반 시설은 존재하지 않는다. 하지만 앞으로 물류 체계의 통합 관리가 이루어질 수 있다면 본 연구를 물류 분야에 직접적으로 활용할 수 있을 것으로 여겨진다.

참고문헌

- Arif, A., Wang, Z., Chen, C., & Wang, J.(2019), Repair and resource scheduling in unbalanced distribution systems using neighborhood search. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1), 673-685
- Baran, M. E., & Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power delivery*, 4(2), 1401-1407.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D.(2003), A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752
- Ding, T., Lin, Y., Li, G., & Bie, Z. (2017). A new model for resilient distribution systems by microgrids formation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 4145-4147.
- Ding, T., Wang, Z., Jia, W., Chen, B., Chen, C., & Shahidehpour, M. (2020), Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 4795-4808
- Drye, W.(2017), 2017 Hurricane Season Was the Most Expensive in U.S. History, *National Geographic*, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/2017-hurricane-season-most-expensive-us-history-spd> (Accessed on 10/20/2023)
- Hickey, R. B. (2002). *Electrical construction databook*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Lu, M., Liu, Y., Yan, Y., Bian, R., Du, Y., & Jiang, X.(2022), Distribution Network Repair Scheduling With Multiple Types of Cooperation Using Dynamic Programming after Disasters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38(1), 631-641
- Pham, T. T. H., Bésanger, Y., & Hadjsaid, N. (2009). New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(1), 398-406.
- Reed, D. A., Kapur, K. C., & Christie, R. D.(2009), Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure. *IEEE Systems Journal*, 3(2), 174-180
- Shi, Q., Liu, W., Zeng, B., Hui, H., & Li, F.(2022), Enhancing distribution system resilience against extreme weather events: Concept review, algorithm summary, and future vision. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 138, 107860
- Tan, Y., Qiu, F., Das, A. K., Kirschen, D. S., Arabshahi, P., & Wang, J.(2019), Scheduling post-disaster repairs in electricity distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(4), 2611-2621
- Webber, T.(2017), Why It's So Hard To Turn The Lights Back On In Puerto Rico, *National Public Radio*, <https://www.npr.org/2017/10/20/558743790/why-its-so-hard-to-turn-the-lights-back-on-in-puerto> (Accessed on 10/20/2023)
- Zapata, C. J., Silva, S. C., & Burbano, O. L. (2008), Repair models of power distribution components. In 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (pp. 1-6). IEEE

요약문

본 연구에서는 중대한 자연재해 이후의 전력 복구 기간을 단축시키고자 하는 최적화 문제를 다룬다. 각 수요 지점별 전력 복구 속도를 개선하기 위하여 첫 번째, 전력망 상에서의 결합 위치에 대한 수리 일정을 계획하며, 두 번째로 망 내 구성 요소가 수리됨에 따라 전력망을 재구성한다. 대부분의 수리 일정 계획 및 전력망 재구성 동시 최적화 문제에서는 전선의 운용 여부를 결정하는 스위치를 소수로 가져가며, 전력망 구성안으로 방사형 네트워크만을 고려하고 있다. 또한 장기간의 수리 일정을 요구하는 문제 상황에 대하여, 업무 외 시간을 고려하지 않는 전통적인 일정계획 문제로 접근한다. 본 연구의 가치는 전력 공급 경로 및 전원 장치가 여러 개이며, 대다수 전선의 운용 여부를 온라인으로 제어할 수 있는 스마트 그리드 상에서의 네트워크 재구성 및 업무 외 시간을 고려한 장기적인 수리 일정계획 최적안을 제시하는 데에 있다. 이를 위하여 혼잡 정수 계획법을 바탕으로 한 수리 모형 및 문제의 복잡도를 고려한 수리 모형 기반 메타 휴리스틱 방법론을 소개한다.

주제어: 스마트 그리드, 수리 일정 계획, 네트워크 재구성, 재난 이후 회복