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

공학박사 학위논문

전기차 증감발 용량을 고려한 송전제약 단기 발전계획

Short-Term Security-Constrained Generation Scheduling Considering Electric Vehicles as Flexible Ramping Product

2018 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 · 컴퓨터 공학부

김 담

전기차 증감발 용량을 고려한 송전제약 단기 발전계획

지도 교수 박 종 근

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2018 년 2 월

서울대학교 대학원
전기 · 컴퓨터 공학부
김 담

김 담의 공학박사 학위논문을 인준함
2017 년 12 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

재생 에너지의 확대정책에 따라 점차 높아지는 전력계통의 재생 에너지 도입률은 출력 변동성과 예측의 불확실성 증가를 야기한다. 따라서 기존과 동일한 방안만으로 계통운영을 지속하는 것은 증대되는 변동성과 불확실성에 대처할 수 있는 증감발 용량의 부족 상황으로 귀결된다. 증감발 용량이 부족하다면 안정적인 전력계통의 운영이 용이하지 않다. 이러한 상황하에서 전기차를 계통상황에 맞도록 운용한다면 이를 적절히 상쇄할 수 있다. 본 논문은 전기차를 증감발 용량 자원으로 활용하여 계통의 유연성을 향상시키는 방안을 제안한다. 더불어 계통에서 필요로 하는 증감발 용량이 점차 증가하여 증감발 용량이 송전선에 미치는 영향을 간과할 수 없게 됨에 따라 증감발 용량을 포함한 송전제약 고려 방안을 제안한다. 이와 같은 방안을 통하여 송전선의 물리적 한계를 넘어서지 않는 범위에서 증감발 용량의 이행성을 담보한다. 한편 제안한 방안에 전기차의 적용이 가능하도록 위치상태, 연결상태, 충전상태를 확률적으로 고려한 전기차의 활용 가능 용량 산정방안을 제시한다. 또한 증감발 용량의 산정방안을 개선하여 더욱 효과적인 계통운영이 될 수 있도록 유도한다. 기존의 증감발 용량 산정방안에서는 시간과 관계없이 증감발 용량의 불확실성을 항상 같은 값으로 설정했다. 기존 방안과는 달리 증감

발 용량의 시간대별 불확실성 산정방안을 제안한다. 예측한 부하량과 재생 에너지의 설비용량 및 예측 출력량 등의 계통 상황을 반영하여 증감발 용량의 불확실성을 산정한다. 본 논문에서는 제안한 증감발 용량 확보방안의 개선안을 통하여 더욱 효과적으로 계통을 운영할 수 있음을 제시한다. 또한 전기차를 증감발 용량자원으로써 활용하는 방안을 제안하며 활용가능성을 살펴본다. 더불어 송전제약을 고려한 경우 전기차가 더욱 유의미하게 이용될 수 있음을 검증한다.

주요어 : 전기차, 증감발 용량, 계통 유연성, 단기 발전계획, 송전제약, 재생 에너지

학 번 : 2012-20745

목 차

제 1 장 서 론 1

제 1 절 연구의 배경 및 목적 1

제 2 절 논문의 구성 7

제 2 장 증감발 용량 9

제 1 절 정의 및 필요성 9

2.1.1 증감발 용량 정의 9

2.1.2 증감발 용량과 재생 에너지 관계 12

2.1.3 증감발 용량 부족에 따른 계통영향 16

제 2 절 증감발 용량의 구성과 할당 19

2.2.1 변동성과 불확실성 19

2.2.2 단일 단위 급전(single interval dispatch)을 활용한 증감발 용량 할당 22

제 3 절 증감발 용량과 예비력 비교 24

제 3 장 증감발 용량의 활용방안 개선 30

제 1 절 다중 단위 급전(multiple interval dispatch)을 활용한 증감발 용량 할당 31

제 2 절 예측오차를 고려한 불확실성 대응 용량 산정 34

제 3 절 송전한계를 고려한 증감발 용량 43

제 4 장 증감발 용량의 전기차 활용 45

제 1 절 전기차의 증감발 용량 적용가능성 고찰.....46

제 2 절 마르코프 체인(Markkov chain)을 이용한 전기차 상태추정 52

4.2.1 단일 구역, 단일 노드 54

4.2.2 단일 구역, 다중 노드 55

4.2.3 다중 구역, 단일 노드 56

4.2.4 다중 구역, 다중 노드 57

제 3 절 전기차의 충방전 가능 용량 산정.....61

제 5 장 전기차 증감발 용량을 고려한 송전제약 단기 발전계획 정식화 69

제 1 절 목적함수 70

제 2 절 제약조건 71

5.2.1 발전기 제약조건 72

5.2.2 전기차 제약조건 73

5.2.3 증감발 용량 제약조건 74

5.2.4 송전한계 제약조건 75

제 6 장 사례연구 77

제 1 절 개선된 방안을 활용한 증감발 용량 산정 81

제 2 절 전기차의 충방전 가능 용량 산정 84

제 3 절 단기 발전계획 수행 결과 92

6.3.1 송전제약에 따른 영향 94

6.3.2 재생 발전원의 변동성에 따른 영향 98

6.3.3 전기차의 보급률 변화에 따른 영향 102

제 7 장 결론 및 제언 104

참고문헌 109

부 록 115

부록 1 예비력을 포함한 단기 발전계획 정식화 115

부록1.1 목적함수 115

부록1.2 제약조건 115

부록 2 기호 및 약어 117

Abstract 120

표 목차

[표 6-1] 발전기 특성 78

[표 6-2] 시간별 순부하의 측정값 및 예측값 79

[표 6-3] 증발 의무용량 81

[표 6-4] 감발 의무용량 82

[표 6-5] 증감발 의무용량 산정 방식에 따른 발전력 변화 82

[표 6-6] 노드 별 감도 92

[표 6-7] 송전제약 적용에 따른 급전 결과 93

[표 6-8] 부하와 재생 발전기 출력값 97

[표 6-9] 재생 발전원의 출력 변동성이 낮은 경우 급전 결과 . 97

[표 6-10] 재생 발전원의 출력 변동성이 높은 경우 급전 결과 99

[표 6-11] 재생 발전원의 출력 변동성이 높은 경우 전기차 활용 결과 100

[표 6-12] 전기차의 보급률에 따른 급전 결과 101

그림 목차

[그림 2-1] CAISO의 2020년 부하와 순부하 및 재생 에너지 예측 12

[그림 2-2] CAISO의 2020년까지 순부하 예측량 14

[그림 2-3] 증감발 용량 부족에 따른 에너지 가격 상승 사례 . 16

[그림 2-4] 순부하의 변동성과 불확실성 20

[그림 2-5] 단일 단위 급전 예시 22

[그림 2-6] 계통 주파수 제어 요소 25

[그림 3-1] t_1의 다중 단위 시결합 급전 예시 31

[그림 3-2] t_2의 다중 단위 시결합 급전 예시 32

[그림 3-3] 불확실성 산정 예시 - 고정된 불확실성 33

[그림 3-4] 불확실성 산정 예시 - 순부하에 비례 36

[그림 3-5] 불확실성 산정 예시 - 예측오차 고려 41

[그림 4-1] 전기차의 이동성 예시 48

[그림 4-2] 단일 구역, 단일 노드에서 마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링 53

[그림 4-3] 단일 구역, 다중 노드에서 마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링 55

[그림 4-4] 다중 구역, 단일 노드에서 마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링 56
[그림 4-5] 다중 구역, 다중 노드에서 마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링 57
[그림 4-6] 전기차 충방전 가능 용량 산정과정 흐름도 60
[그림 6-1] 수정된 PJM 5-모선 계통도 77
[그림 6-2] 예측오차를 고려한 시간 별 불확실성 80
[그림 6-3] 전기차를 포함한 수정된 PJM 5-모선 계통도 84
[그림 6-4] 사례연구 대상 계통의 전기차 마르코프 체인 모델 85
[그림 6-5] 상태천이확률과 시간 별 전기차 대수 - 출퇴근 시간 87
[그림 6-6] 상태천이확률과 시간 별 전기차 대수 - 보통 시간 87
[그림 6-7] 시간 별 활용가능 전기차 대수 - 출퇴근 시간 88
[그림 6-8] 시간 별 활용가능 전기차 대수 - 보통 시간 89
[그림 6-9] 시간 별 활용가능 전기차 용량 - 출퇴근 시간..... 90
[그림 6-10] 시간 별 활용가능 전기차 용량 - 보통 시간 90
[그림 6-11] 사례연구를 수행한 수정된 PJM 5-모선 계통도 . 91
[그림 6-12] T3에서 구역 별 발전량 변화 95

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

재생 에너지의 증가에 따른 전력 계통 운영의 문제점을 지적한 연구들이 시작된 것도 이미 최근의 일은 아니다. 다양한 관점에서 재생 에너지의 증가가 전력계통의 운영에 미치는 영향을 평가한 연구들이 선행되었다 [1-3]. 풍력발전이나 태양광 또는 태양열 발전과 같이 출력의 변동성을 가지는 변동성 재생 에너지(VRE; variable renewable energy) 혹은 간헐성 재생 에너지(IRE; intermittent renewable energy)는 풍속과 일사량에 따라 끊임없이 변동하기 때문이 이들이 대다수 연계된 계통의 운영에는 어려움을 수반한다. 더욱이 재생 에너지는 출력의 제어가 쉽지 않고, 제어 가능 범위가 넓지 않기 때문에 출력의 변동성 측면에서 전력계통의 운영에 영향을 미친다 [4-7]. 재생 에너지의 출력 예측 불확실성 또한 변동성과 마찬가지로 기존 발전원의 보다 크기 때문에 불확실성의 측면에서 전력계통 운영의 어려움을 가중시킨다. 따라서 이러한 변동성과 불확실성에 유연하게 대처할 수 있도록 전력 계통을 계획하고 운영하는 주체는 계통의 유연성(flexibility)을 확보해야 한다 [8, 9]. 만약 계통에 유연성이 충분하지 않다면, 단주기(short-term) 발전력의 부족상황

이 빈번히 발생하고 [10], 재생 에너지 출력의 삭감을 유발하기도 한다 [11]. 이러한 위험은 증감발 용량(FRP; flexible ramping product)의 확보를 통하여 완화시킬 수 있다 [12, 13]. 특히 재생 에너지가 대수 포함된 상황에서의 효과적으로 전력계통을 운영하고 유연성의 증대를 위해서 증감발 용량은 필수적이다 [14, 15].

Midwest Independent System Operator(MISO)와 California Independent System Operator(CAISO)는 계통의 운영 시 요구되는 유연성 확보를 위하여 증감발 용량 시장을 개설하여 운영 중이고, 이를 통해 확보한 증감발 용량을 활용하여 순부하의 변동성과 불확실성에 대비한다 [16-18]. 하지만 증감발 용량을 확보하는 과정에서 불확실성을 산정하는 방법에 따른 한계점이 존재한다. 기존 방법에서는 매 시간 단위 별로 변화하는 계통의 상황에도 불구하고 불확실성을 항상 일정한 값으로 정하여 증감발 용량을 확보한다. 이러한 방식은 계산과정의 복잡성이 적다는 장점이 있다. 하지만 부하의 크기나 재생 에너지의 출력 등의 계통 상황을 고려하지 않았기 때문에 때로는 불확실성을 과대 평가하여 계통 운영의 경제적 측면에서 비효율적이거나, 반대로 불확실성을 과소 평가한 경우에는 증감발 용량의 부족을 유발시킬 수 있다. 이러한 한계를 극복하고자 본 논문에서는 계통의 상황에 따라 예비력을 상이하게 확보하는 것을 제안한 기존의 연구 [19]에서 착안하여 예측부하의 크기와 재생 에너지 설비 용량, 예측 출력을 통해 계통운영의 효율성을 향상 시킬 수 있도록 계통상황을 반영한 불확실성 산정방안을 제안했다.

증감발 용량을 산정하는 기법의 개선과 더불어 전력계통의 증감발 의무용량을 기존의 발전원만으로 충당하는데 발생할 수 있는 한계점을 극복하기 위하여 기존 발전원 이외의 자원으로 증감발 용량을 확보하여 용량 확보가능 자원의 다양성을 제고하고자 하는 연구들이 진행되었다. 풍력발전을 통하여 증감발 용량을 제공하는 방안을 제시하는 연구들이 선행되었고 [20, 21], 전기차를 증감발 용량으로 활용하는 연구도 진행됐다 [22]. 마찬가지로 본 연구는 전기차를 증감발 용량 자원으로 활용하는 방안에 대해 연구하여 제시했다.

증감발 용량 시장을 운영하고 있는 미국의 MISO와 CAISO에서 증감발 용량시장에 참여할 수 있는 자원은 오로지 기존의 일반적인 발전기 뿐이다. 더욱이 이러한 발전기 중 현재 기동 중인 발전기들만 증감발 용량으로 참여할 수 있도록 제한하고 있기 때문에 이를 제공할 할 수 있는 발전기는 한정적이다. 재생 에너지가 증가하게 되면 계통을 안정적으로 운영하기 위하여 요구되는 증감발 용량도 커지게 됨을 앞서 서술했다. 또한 앞으로 일반 수요의 증가는 더딜 것 이라고 예상되는 가운데 재생 에너지원이 늘어나면 기존의 발전원들이 차지하는 비율도 점차 줄어들게 되고 기존 발전원의 절대적인 용량도 줄어들게 된다. 따라서 재생 에너지원이 늘어남에 따라 증감발 용량의 필요량은 늘어나는 반면, 증감발 용량으로 활용할 수 있는 발전원은 점차 줄어드는 경향을 보이기 때문에 이는 증감발 용량 자원의 부족으로 이어진다. 따라서 기존의 발전 자원 이외의 자원으로 증감발 용량 자원을 공급할 수 있는 방안의 필요성이

대두되며, 이러한 맥락의 일환으로 풍력 발전을 통해 증감발 용량을 공급하는 연구가 선행되었다. 하지만 풍력 에너지원을 증감발 용량으로 활용한다면, 지속적인 발전 용량 증가를 예측할 수 있는 자원의 용량 자체가 점차 커질 수 있다는 점에서는 긍정적인 부분이 있지만 그럼에도 불구하고 풍력 발전 출력을 예측하는데 따르는 불확실성 때문에 실제 증감발 용량을 제공하는 것에는 상당한 제약이 따를 것을 유추할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 재생 발전원이 포함된 계통에서 이러한 발전원이 가지는 변동성과 불확실성을 상쇄하기 위하여 전기차를 활용한 증감발 용량의 제공 방안을 제안한다.

전기차의 꾸준한 증가와 장려정책은 CO_2 감축(de-carbonization)을 통한 친환경적 부분에서의 기여뿐만 아니라, 전기차의 동력원인 배터리와 계통 간의 충방전 관계를 활용하여 전력계통의 신뢰도와 유연성을 향상시켜줄 자원으로써 기대를 갖게 한다. 또한 전기차의 적절한 활용을 통하여 계통의 유연성이 향상되면 재생 에너지의 수용률을 증가 시킬 수 있으며 [23], 전기차는 재생 발전원에 에너지 저장 효과를 제공하여 출력을 평탄화에 기여할 수 있다 [24]. 이러한 관점에서 전기차의 활용을 연구한 기존의 문헌들은 대부분 전기차를 주파수 조정 예비력으로 활용하는 방안과 [25] 주파수 조정 예비력을 포함한 다양한 예비력 자원으로 활용하는 연구를 진행해왔으며 [26, 27] 이를 통해 수익을 창출할 수 있음을 밝혔다 [28].

하지만, 전기차의 첫 번째 활용목표가 계통의 운영에 있지 않기 때

문에 매우 짧은 시간 단위로 충방전을 반복해야 하는 주파수 조정 예비력으로써의 전기차 활용은 전기차 소유자의 이용도를 침해할 수 있다. 반면, 증감발 용량으로의 전기차 쓰임은 5-10분 단위로 활용하기 때문에 주파수 조정 예비력으로의 쓰임 보다 훨씬 적다. 따라서 활용빈도의 측면에서 전기차를 증감발 자원으로 활용하는 방안이 더욱 효율적이다. 또한 급격한 충방전을 해야 하는 예비력으로 전기차를 사용하기 보단 증감발 용량으로써의 사용은 전기차의 배터리 수명 차원에서도 활용 이점을 보인다.

전기차 활용의 또 다른 장점은 다음과 같다. 전기차는 서로 다른 구역을 연결하는 송전선에서 발생할 수 있는 송전혼잡 문제에 대하여 상대적으로 자유롭다. 대규모의 일반 발전기 및 재생 발전기들은 평균적으로 전기수요가 주로 존재하는 지역에서 멀리 떨어져있다. 따라서 발전기에서 발생시킨 전력을 전력 수요가 위치한 지역까지 보내기 위해서는 여러 송전선을 거쳐야 하기 때문에 이는 송전혼잡 문제와 밀접한 관계가 있다. 반면, 전기차는 수요가 밀집한 지역에 주로 가까이 분포하는 경향성이 있기 때문에 송전혼잡 문제를 가중시키지는 않는다. 뿐만 아니라, 전기차는 이동성(mobility)를 가지고 있기 때문에 계통에 긍정적인 영향을 미치는 자원으로 활용할 수 있다. 전기차의 이러한 성질을 통하여 송전선에 발생할 수 있는 송전제약을 완화시킬 수 있고, 계통 운영비용을 줄이는데 효과적이다 [19, 29]. 또한 전기차의 이동성을 적절히 활용하면, 재생 발전원의 삭감되는 에너지를 줄일 수 있기 때문에 더 많은 재생 에

너지의 도입을 유도할 수 있다 [30]. 따라서 전기차의 활용은 송전제약의 측면에서 일반 발전기를 활용하는 것 보다 유리하다는 결론을 도출했고 본 논문에서는 전기차의 증감발 자원으로의 활용가능성을 연구했다.

기존의 관련연구들은 에너지와 보조 서비스를 동시 최적화(co-optimization)하는 상황하에서 송전혼잡 문제는 다뤘지만 [31, 32], 증감발 용량을 포함하여 송전혼잡을 다룬 연구는 미비하다. 본 논문에서는 증감발 용량이 송전혼잡에 미치는 영향과 이 때 전기차의 증감발 자원으로써의 활용가능성을 살펴본다.

본 논문에서는 먼저 증감발 용량의 산정하는 과정에서 불확실성을 측정하는 방안을 개선시켜 제안한다. 이를 바탕으로, 송전제약을 고려하면서 구역 별로 증감발 용량을 확보하는 접근방식을 제시한다. 또한 전기차를 적절하게 활용하기 위해 필요한 전기차의 위치상태, 연결상태, 충전상태를 확률적으로 산정하는 방법과 이를 실시간 계통 운영에 적용하는 방안에 대하여 서술한다. 일반 발전기의 에너지를 비롯한 증감발 용량으로써의 활용은 물론이고 전기차의 충전과 방전, 증감발 용량 활용을 모두 고려한 상황에서 비용 최적화된 계통의 단기 발전계획을 수행하는 방안을 단계적으로 수식화하고 이들을 다양한 상황의 사례연구를 통하여 검증한다.

제 2 절 논문의 구성

제 1 장에서는 본 연구를 진행한 동기 및 배경과 본 연구가 추구하고자 하는 쓰임에 대하여 설명했다.

제 2 장에서는 본 연구의 주된 내용인 증감발 용량의 전반적인 내용에 대하여 살펴본다. 먼저 증감발 용량의 정의에 관하여 서술한다. 이어서 재생 에너지와 증감발 용량과의 관계를 살펴보고 증감발 용량의 부족 시에 발생할 수 있는 계통의 영향에 대하여 고찰해본다. 또한 증감발 용량을 산정하는 기존의 방안을 살펴보며 이의 한계를 서술한다.

제 3 장에서는 기존 증감발 용량의 산정방안이 가지고 있는 한계를 극복할 수 있는 개선된 증감발 용량 산정방안을 소개한다. 증감발 용량을 산출을 위해 예측하는 시간 범위를 증대시킴으로써 증감발 용량 산정방안의 개선을 유도하며 또한 증감발 용량의 불확실성을 산정하는 방안도 개선하여 적용하는 방안에 대하여 살펴본다.

제 4 장에서는 증감발 용량의 자원으로써 전기차를 활용할 수 있는 방안을 도출한다. 먼저 전기차의 상태를 마르코프 체인 통하여 예측하며, 이를 바탕으로 시간대 별 전기차의 충방전 가능 용량을 확률적으로 산정하는 방안에 대해 상세히 서술한다.

제 5 장에서는 기본의 발전원과 전기차를 모두 포함하며 송전제약을 고려한 단기 발전계획의 목적함수와 제약조건을 모두 포함한 수식화를 진행한다.

제 6 장에서는 앞서 서술한 방안들을 사례연구를 통하여 검증한다. 기존의 증감발 용량 산정방안과 본 논문에서 제안하는 방안을 비교 분석하여 송전제약의 유무와 재생 발전원의 변동성이 변화하는 상황에서 전기차의 활용가능성을 분석한다. 사례연구에서는 증감발 자원의 활용 효과에 집중하기 위하여 예비력 상품은 제외하고 단기 발전계획을 수립했음을 미리 밝힌다.

제 7 장에서는 개선된 증감발 용량과 전기차의 활용에 대한 본 연구의 의의와 한계점을 서술하며 제언을 마지막으로 논문을 끝맺는다.

제 2 장 증감발 용량

이번 장에서는 증감발 용량의 정의에 대하여 서술한 후, 증감발 용량이 왜 필요하고 계통에 증감발 용량이 부족했을 때 발생할 수 있는 상황에 대하여 살펴보도록 한다. 또한 증감발 용량을 산정하는 과정에 대하여 설명하고 증감발 용량을 구성하는 두 가지 성질인 변동성과 불확실성에 대하여 서술한다. 2 장의 마지막에는 증감발 용량으로 활용할 수 있는 자원의 종류에 관하여 서술하며 기존의 예비력 상품과의 비교를 통해 증감발 용량의 특징을 살펴보는 것으로 2장을 마무리 한다.

제 1절 정의 및 필요성

2.1.1 증감발 용량 정의

전력시스템의 안정적인 운영을 위해서는 끊임없이 변동하는 부하에 적절히 대응해야 하기 때문에 계통운영의 유연성(flexibility)은 반드시 확보해야하는 중요한 요소이다. 재생 에너지원의 수용률이 큰 계통을 운영할 때 더욱이 집중해야 하는 값은 순부하(net load)이다. 순부하는 일반 부하에서 재생 에너지와 같이 제어가 불가능한 혹은 제어를 하더라도 큰 변화를 줄 수 없는 에너지원을 제외한 값을 의미한다.

이와 같은 순부하는 변동성(variability)과 불확실성(uncertainty)의 특성을 가진다. 변동성은 시간의 흐름에 따라 순부하가 변화하는 성질이다. 일반적으로 계통부하가 크게 변화하지 않는 상황에서 재생 에너지원의 수용률이 증가한다면 순부하의 변동성은 증가한다. 한편, 불확실성은 순부하가 변동하는 정도를 정확하게 예측할 수 없기 때문에 발생하는 성질이다. 불확실성은 발전기의 탈락을 포함한 계통에서 발생할 수 있는 다양한 사고 상황 때문에 나타난다. 더불어 재생 에너지 출력예측의 까다로움 때문에도 발생하며 재생 에너지의 수용률이 증가할 수록 이때의 불확실성 값은 기존 계통이 지니고 있는 값보다 더욱 커진다. 결과적으로 재생 에너지가 증가할 수록 순부하의 변동성과 불확실성이 증가하기 때문에 이들을 기존 계통운영 방법만으로 대처하는 것에는 한계가 있다. 따라서 계통운영의 유연성 확보를 위해서는 이를 충족시킬 수 있는 증감발 용량(FRP; Flexible Ramping Product)이 필요하다. 증감발 용량이란, 수분(5-10분) 사이에 급격히 변화하는 순부하의 변화량에 유연하게 대처하기 위해 시간 구간마다 연속적으로 확보하고 급전하는 자원을 의미한다.

증감발 용량은 순부하의 양의 방향 변화에 대처하기 위한 증발 용량(FRU; flexible ramping up)과 음의 방향 변화를 담당하는 감발 용량(FRD; flexible ramping down)으로 나뉜다. 일반적인 발전기의 예를 들면, 발전기가 제공할 수 있는 증발용량은 출력을 늘리는 것이고 감발 용량은 발전기의 출력을 줄이는 것을 의미한다. 반면 에너지 저장 장치가

계통에 증발용량을 제공하려면 가지고 있던 에너지를 계통으로 방출해야 하며 에너지를 충전함으로써 계통에 감발용량을 공급할 수 있다. 위와 같은 증발용량과 감발용량 각각의 산정방법을 식 (2-1), (2-2)에 나타냈다 [33].

$$FRU_{system,t} = \max\left\{\left[NetLoad_{t+s} - NetLoad_t\right] + Uncertainty_{up,t+s}, 0\right\} \quad (2-1)$$

$$FRD_{system,t} = \max\left\{\left[NetLoad_t - NetLoad_{t+s}\right] + Uncertainty_{down,t+s}, 0\right\} \quad (2-2)$$

여기서, $NetLoad_{t+s} - NetLoad_t$와 $NetLoad_t - NetLoad_{t+s}$는 순부하의 변동성을 의미한다. 해당 시간단위 동안 순부하의 증가가 예측되는 경우에는 증대된 순부하에 대처할 수 있는 증발용량을 확보해야 한다. 반대로, 순부하가 해당 시간 이후에 감소할 것으로 예측된다면 줄어드는 순부하에 대처할 수 있는 자원인 감발용량이 필요하다. 시간 $t+s$에 필요한 증감발 용량을 시간 t에 확보하여 순부하의 변동성과 불확실성을 대비한다. 이러한 증감발 용량의 확보를 통하여 계통운영상의 유연성을 향상시킬 수 있다. 여기서 순부하의 변화를 나타내는 변동성과 더불어 불확실성까지 포함하여 증감발 용량을 확보한다. 위와 같은 증감발 용량의 산정방안은 이번 장의 제 2 절에서 보다 자세히 살펴보기로 한다.

한편, 더욱 안정적인 증감발 용량 확보를 위하여 구역(zone) 별로 각각의 증감발 용량의 확보량을 나누어 산정한다. 이러한 방식은 현재

MISO에서도 수행되고 있으며, 이는 식 (2-3), (2-4)에 나타냈다.

$$\sum_{z} FRU_{z,t} \geq FRU_{system,t} \tag{2-3}$$

$$\sum_{z} FRD_{z,t} \geq FRD_{system,t} \tag{2-4}$$

각각의 구역에서 확보한 증발용량의 합은 계통에서 필요로 하는 증발용량의 계통 전체 요구량보다 커야만 계통을 안정적으로 운영할 수 있다. 마찬가지로 아래쪽 방향으로 변화하는 순부하에 대처하기 위한 감발용량 또한 구역 별로 확보한 용량의 합을 전체 계통에서 필요로 하는 수준 이상으로 확보해야 한다. 이와 같은 방식으로 구역 별 증감발 용량의 요구량과 계통 전체의 증감발 용량 요구량을 동시에 만족하도록 확보하는 것은 단순히 계통 전체의 증감발 용량 요구량을 만족 시키는 것보다 계통의 운영에 신뢰성을 가하며 유연성을 더욱 확고히 확보할 수 있는 방법이라고 알려져 있다 [17]. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 방식을 적용하여 증감발 용량을 확보하는 것을 기본으로 삼는다.

2.1.2 증감발 용량과 재생 에너지 관계

재생 에너지의 증가는 친환경적인 요인 때문에 보급이 장려되고 있지만 계통운영상에는 다양한 문제를 유발한다 [1]. 본 논문에서는 재생

에너지의 수용률이 증가하여 증가함에 따라 증감발 용량의 필요량이 커지게 됨에 따라 증감발 용량 확보의 중요성이 증대되는 사안에 집중했다.

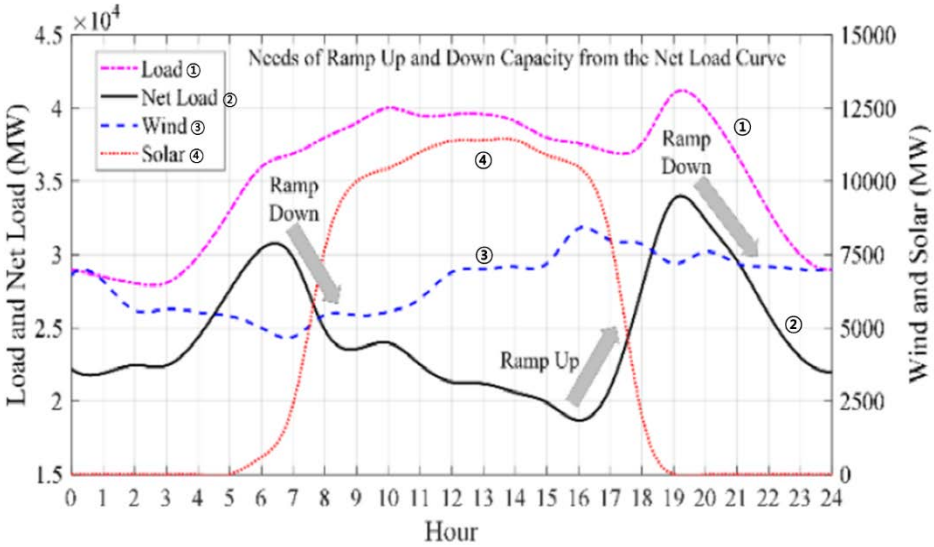


그림 2-1 CAISO의 2020년 부하와 순부하 및 재생 에너지 예측 [16]

CAISO는 2020년까지 발전력의 33%를 재생 에너지원이 담당하도록 계획하고 있다. 위의 **그림 2-1**은 재생 발전원이 다수 연계 된 2020년 CAISO의 하루 중 시간대별 부하와 순부하(왼쪽 축 기준), 풍력과 태양 에너지의 발전량(오른쪽 축 기준)을 예측하여 나타낸 그림이다. 풍력 에너지(③, 넓은 점선)의 출력은 하루 종일 변화의 폭이 비교적 크지 않지만 태양을 에너지원으로 하는 발전원(④, 좁은 점선)은 해가 떠있는 낮 시간에 주로 출력이 집중되며 새벽과 저녁에는 전혀 출력하지 못한다. 한편, 부하(①, 비균일 점선)는 일반적으로 알려져 있는 형태와 마찬가지

로 새벽부터 점차 증가하여 약 10시경과 19시경에서 최대치를 보인다. 위와 같은 일반부하에서 풍력과 태양 에너지를 제외한 순부하(②, 실선)는 기존의 부하와 상당히 다른 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 살펴보면 4시를 기점으로 순부하는 갑자기 증가하여 6시에 고점을 기록하고 다시 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 더욱이 18시 쯤에는 이보다 더 급격하게 순부하가 변화하는 모습을 보인다. 이는 일반부하가 변화하는 양 보다 더욱 많으며 변화의 속도 또한 더 크다. 그림상에 화살표로 표기한 것과 같이 크게 3개의 구간 대에서의 변화가 눈에 띈다. 6시와 20시 직후에는 순부하가 급격히 줄어드는 램프 다운(ramp down) 현상이 발생하며 16시부터는 순부하가 현저히 늘어나는 램프 업(ramp up) 현상이 발생한다. 이와 같이 순부하의 변화가 급격하게 나타나는 원인은 재생 에너지 출력의 변동 때문이다. 이러한 재생 에너지는 급전지시를 따를 수 없기 때문에 위와 같이 순부하로 연산하여 순부하의 값에 기대어 계통을 운영할 수 밖에 없다. 더욱이 재생 에너지 발전원의 설비용량이 증가한다면 순부하의 변화량은 더 커지고 그 변화의 빈도는 잦아질 것으로 추론할 수 있다. 이와 같이 재생 에너지가 늘어남에 따라 변화하는 순부하의 사례를 다음 그림과 같이 확인해 볼 수 있다.

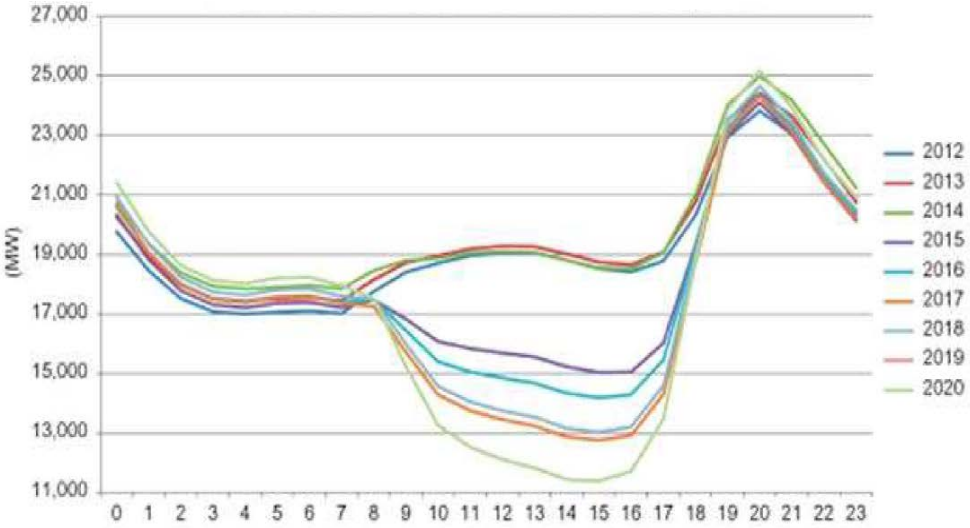


그림 2-2 CAISO의 2020년까지 순부하 예측량 [34, 35]

위의 **그림 2-2**는 2012년도부터 2020년까지 3월의 특정한 날을 대상으로 순부하의 측정량과 예측량을 나타낸 그래프이다. 점차적으로 재생 에너지원이 늘어나게 되고 순부하의 변화량은 점점 커진다. 2020년을 살펴보면 최소 순부하의 양은 약 11,000MW까지 떨어지게 되는데, 이때 순부하의 크기는 기저발전원인 원자력 발전 등과 거의 동일한 수준이며 따라서 출력을 감소시킬 수 있는 설비가 부족한다. 따라서 만약 예측량보다 전력수요가 줄거나 재생 에너지의 발전량이 늘어나 순부하가 줄어들게 되면 기존의 일반 발전기의 발전력을 낭비하거나 재생 에너지의 출력을 감소시켜야만 하는 상황이 발생한다. 더불어 오후 시간대(17시~19시)에서는 순부하가 급격히 증가하는 상황이 발생하는데 기존의 설비만으로 이와 같은 변화에 대처하기 위해 급격히 출력을 증가시키는 것에는 한계가 따른다. 순부하의 크기가 기저 발전원의 수준인 앞선 상황 같은

경우 단순히 재생 발전원을 낭비하는 상황이 발생한다. 반면, 급격히 순부하가 증가하는 상황의 경우에는 발전력 자체는 부족하지 않지만 급격한 순부하의 변화에 빠르게 대응할 수 없는 자원의 부족 때문에 발전력이 순부하량에 못 미치는 상황이 발생할 수 있다. 이는 재생 에너지의 발전량이 늘어날수록 더욱 심화된다. 그러므로 계통의 운영차원에서 이와 같은 상황에 대처할 수 있는 자원이 반드시 요구되고 이러한 역할을 수행하는 자원이 증감발 용량이다. 계통운영자는 매우 짧은 시간(보통 30초 이내) 동안의 주파수 변동 및 발전기 고장 또는 송전선 탈락 등의 사고상황에 대비한 용량 확보와 더불어 짧은 시간 동안 빈번히 변화하지는 않지만 특정시간에 더 급격하고 크게 변화하는 특성에 대비할 수 있도록 증감발 용량을 확보해야 한다. 그렇다면 증감발 용량이 부족한 상황이 발생할 때 계통에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 다음에서 살펴보도록 한다.

2.1.3 증감발 용량 부족에 따른 계통영향

가상의 상황을 상정하여 증감발 용량이 부족했을 때 발생하는 상황을 분석한다. 증감발 용량이 부족함에 따라 계통에 발전력이 부족하여 부하를 만족시킬 수 없는 상황이 발생하기도 하는데 이는 제 6 장 사례연구에서 보이기로 한다. 아래의 그림을 통해서는 모든 시간 동안 수급균형을 유지하긴 하지만 증감발 용량이 부족하여 에너지 가격이 상승한 사례를 보인다.

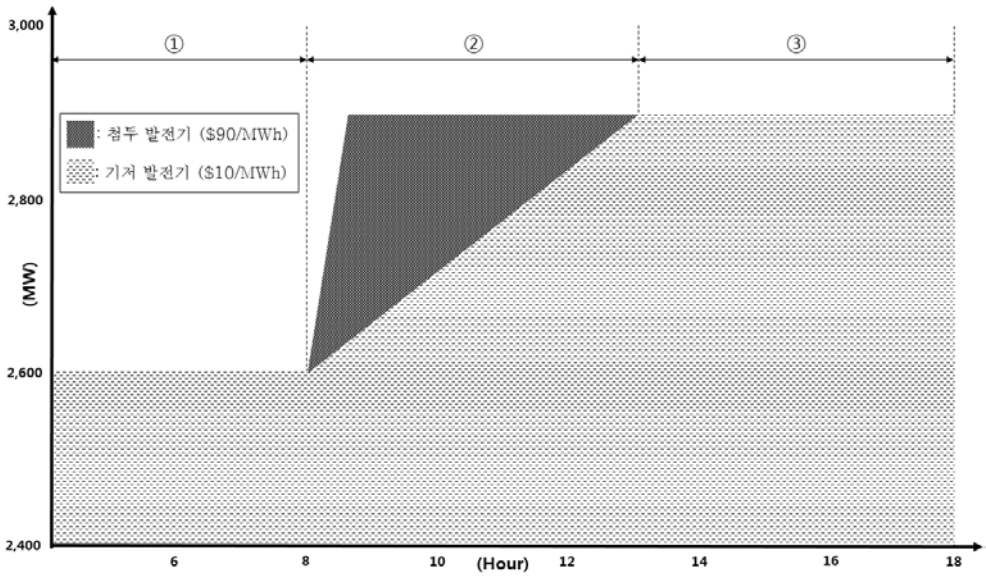


그림 2-3 증감발 용량 부족에 따른 에너지 가격 상승 사례 [36, 37]

위의 **그림 2-3**을 살펴보면, 진한 색으로 색칠한 부분이 첨두 발전기가 발전을 담당하는 부분이고 연한 색으로 색칠한 부분은 기저 발전기가 담당하는 부분이다. 기저 발전기의 에너지 가격은 $10/MWh이며, 첨두 발전기의 에너지 가격은 $90/MWh이다. ① 기간을 살펴보면 8시까지 부하는 2,600MW를 유지한다. 이는 기저 발전이 모두 담당한다. 부하는 ② 기간 범위에 들어서자마자 8시부터 급증하기 시작하여 ③ 기간이 끝날 때까지 최대수준인 약 2,900MW를 유지한다. 모든 시간대에서 수급을 만족하도록 운영하기 위하여 계통운영자는 발전기들을 기동하는데 ③ 기간에서 보이듯 기저 발전기만으로도 최대부하를 만족시킬 수 있음을

알 수 있다. 하지만 ② 기간에서는 ③과 부하의 크기가 같음에도 불구하고 첨두 발전기가 사용됐다. 일반적으로 기저 발전기는 증발 속도가 느리기 때문에 이와 같이 급격하게 증가하는 부하를 기저 발전기의 증발 속도로 따라 잡을 수 없다. 따라서 기저 발전기가 감당할 수 있는 부하의 수준임에도 불구하고 출력을 제공할 수 없는 상황이 발생한 것이다. 이와 같은 상황에서는 부득이하게 증감발 속도가 빠른 첨두 발전기를 가동하여 수급을 유지시킨다. 이 기간 동안 에너지 가격을 살펴보면 ①과 ③ 기간에는 기저 발전기만 사용되기 때문에 에너지 가격은 $10/MWh 이다. 하지만 ② 기간에는 ③ 기간과 부하의 크기는 같지만 첨두 발전기가 사용되기 때문에 에너지 가격은 $90/MWh로 급등한다. 따라서 에너지 가격은 ① 기간에는 $10/MWh 였지만 ② 기간에는 $90/MWh이 되고, 다시 ③ 기간에는 $10/MWh이다. 이와 같은 상황을 통하여 기저 발전기로 공급할 수 있는 에너지가 존재함에도 불구하고 계통의 증감발 능력이 부족하여 에너지 가격이 급등한 상황이 발생할 수 있음을 보였다. 따라서 증감발 용량을 미리 산정하고 급전하여 위와 같이 부하가 급격히 증가 또는 감소하는 상황에 대비한다면 에너지 가격이 급등하는 현상을 방지할 수 있다. 이후에 이어지는 절을 통하여 증감발 용량의 산정방식을 살펴보고 현재 증감발 용량을 제공할 수 있는 자원에는 어떠한 것이 존재하며 증감발 용량과 기존의 예비력의 차이점은 어떠한 것이 있는지 서술한다.

제 2 절 증감발 용량의 구성과 할당

지금까지 증감발 용량의 필요성에 대하여 살펴봤다. 그렇다면 계통 운영에 필요한 증감발 용량은 어떠한 특성을 가지며 과연 얼마만큼 확보해야 하는지를 이번 절에서 서술한다. 또한 본 논문에서 궁극적으로 보이고자 하는 개선된 증감발 용량 확보방안을 제안하기에 앞서 기존의 증감발용량 확보방안을 개괄적으로 서술한다.

2.2.1 변동성과 불확실성

2.1.1을 통하여 증감발 용량을 산정하는 법을 간단히 보였다. 증감발 용량은 확보시간단위 별로 연속적으로 확보한다. 증감발 용량은 순부하의 변동성과 예측의 불확실성을 더하여 산정한다. 앞선 **수식 (2-1)**과 **수식 (2-2)**의 앞에 위치한 항이 변동성을 의미하며 이를 다시 보이면 다음 식과 같다.

$$Variability_t = \left| NetLoad_{t+s} - NetLoad_t \right| \qquad (2-5)$$

여기서, 증감발 용량을 확보하는 시간단위를 먼저 고찰 해보도록 한다. 위의 **수식 (2-5)**의 t는 실시간 단기 발전계획의 시간단위를 의미하며 s는 증감발 용량을 산출하는 기준시간 간격(interval)을 의미한다. 실

제 계통에서 활용되고 있는 시간단위를 예로 들면 다음과 같다. 현재 MISO와 CAISO의 단기 발전계획 시간단위는 5분이다. 따라서 위의 수식에 대입해 볼 때 t는 5분을 뜻한다. 반면, 증감발 용량 산출 기준시간 s의 경우 MISO는 10분, CAISO는 5분으로 정하여 계통을 운영한다. 증감발 용량을 산정하기 위한 변동성을 계산할 때 MISO는 지금으로부터 10분뒤의 예측 순부하의 값과 현재 순부하 값의 차이를 변동성으로 계산하며, CAISO는 현재 순부하와 5분 후 예측 순부하의 편차를 증감발 용량의 변동성으로 할당한다. 이와 같이 연산하는 시간 단위는 계통에 따라 상이하더라도 기준으로 하는 시간간격 이후에 예측되는 순부하와 현재 시간의 순부하 차이를 변동성으로 삼는다.

앞서 증감발 용량을 산정할 때, 변동성은 기준 시간간격 이후 순부하의 예측량을 기준으로 하는데 이러한 예측을 수행함에 있어서 항상 불확실성을 내포한다. 불확실성은 앞선 2.1.1의 **수식 (2-1), (2-2)**에서 두 번째 항을 의미한다. 따라서 증감발 용량은 예측한 순부하와 현재 순부하의 차이인 변동성에 순부하 예측의 불확실성을 더하여 최종적으로 산정한다. 이를 다음 그림과 같이 도식화 했다.

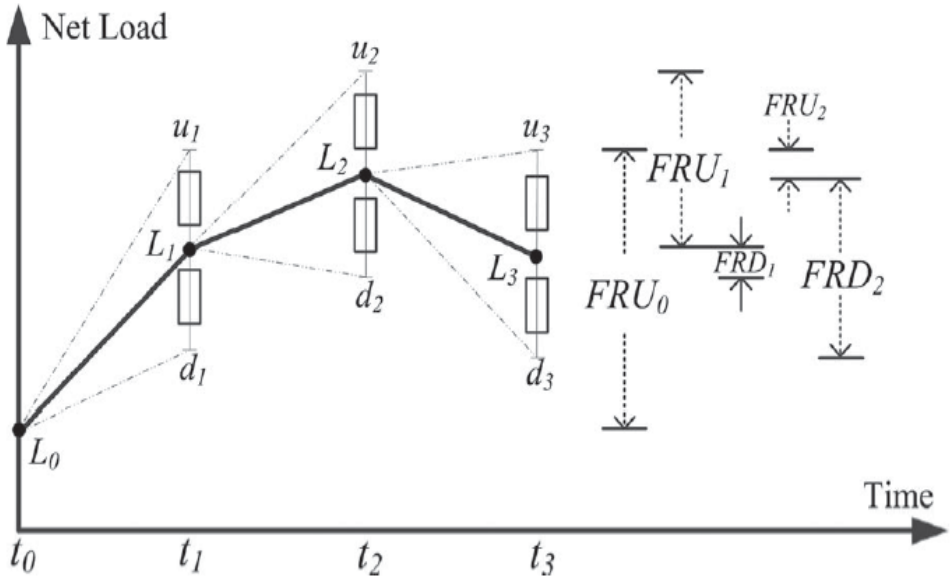


그림 2-4 순부하의 변동성과 불확실성 [38]

위의 **그림 2-4**는 단기 발전계획의 시간단위와 증감발 용량의 기준 시간간격이 동일한 상황하에서 변동성과 불확실성을 통하여 증감발 용량의 필요량을 산출하는 과정을 보인 예시이다.

먼저, t_0에서 요구되는 증감발 용량의 필요량은 t_0과 t_1 순부하의 변동성에 t_0에서 t_1의 순부하를 예측하는데 발생하는 불확실성을 더한 값이다. 이 때 순부하의 변동성은 L_0과 L_1의 세로 간격 차이를 뜻한다. 이와 같이 연산한 변동성에 상방 불확실성 u_1과 하방 불확실성 d_1을 각각 더하여 증발 용량(FRU; flexible ramping up)과 감발 용량(FRD; flexible ramping down)의 필요량을 계산한다. 즉, L_1-L_0과 u_1의 합이 t_0시간에 확보해야 할 FRU_0이다. 한편, L_1에 따른 변동성과 하방 불확실성을 더한 t_1에서의 하방 순부하 예측값은 L_0보다 큰 값이 예상된다. 따라서 순부

하의 값이 현재시간보다 작아질 것에 대비하는 감발 용량은 필요 없으며 즉, t_0에 확보해야 할 FRD_0 값은 0이다.

t_1에서 확보해야 하는 증감발 용량의 계산과정을 한번 더 서술하여 이해를 돕도록 한다. t_1과 t_2의 순부하 변화는 앞선 시간간격(t_0과 t_1)의 변화와 마찬가지로 증가하는 경향을 보인다. t_1에서 확보해야 할 증감발 용량의 변동성은 L_2-L_1이다. 여기에 상방 불확실성 u_2를 더하면 t_1시간에 확보해야 할 증발 용량 FRU_1이다. 앞선 시간간격과는 다르게 변동성에 하방 불확실성을 더하여 계산한 t_2의 하방 순부하의 예측값은 t_1의 순부하인 L_1보다 작기 때문에 이 차이만큼은 t_1에서 감발 용량 FRD_1를 확보해야 한다.

2.2.2 단일 단위 급전(single interval dispatch)을 활용한 증감발 용량 할당

증감발 용량을 할당하는데 있어서 현재 사용되고 있는 모델은 단일 단위 급전(single interval dispatch)이다. 매 순간 급전 단위시간 별로 이때 예측되는 순부하를 만족시킬 수 있는 발전 계획을 수립한다. 또한 그 대상시간에 필요한 증감발 용량에 해당하는 순부하의 변동성과 불확실성을 만족 시킬 수 있도록 증감발 용량을 확보한다. 급전 단위는 5분이고, 증감발 용량 산출 기준시간이 10분(급전 단위시간의 두 배)의 예시를 다음 **그림 2-5**와 같이 보인다.

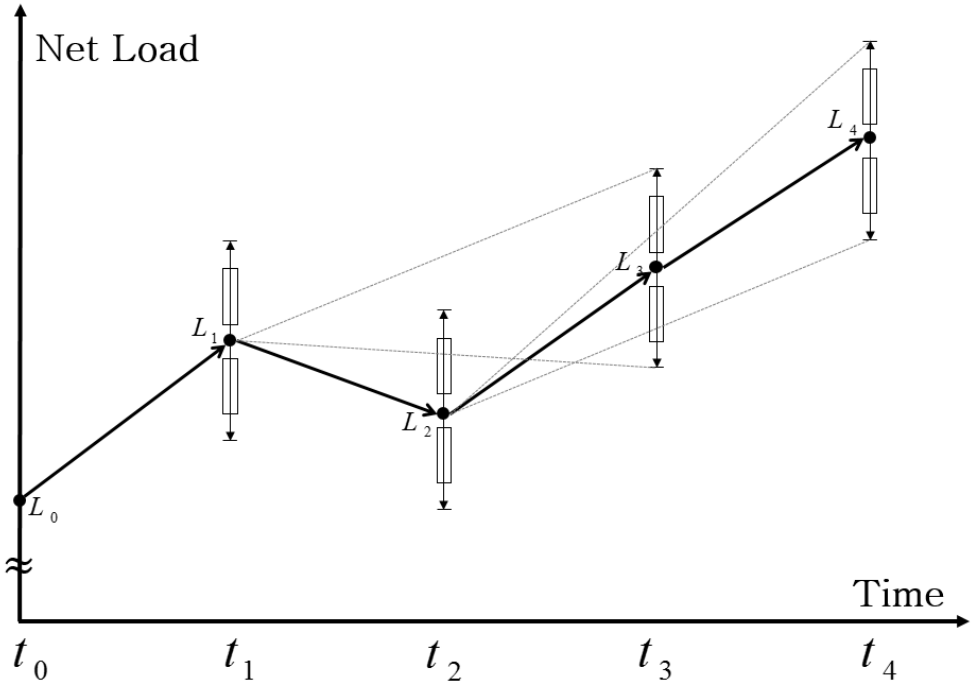


그림 2-5 단일 단위 급전 예시

매 급전시간에 따라 필요한 증감발 용량을 연속적으로 계산해야 한다. 먼저 t_1에서 순부하 예측량을 만족시키기 위한 급전계획을 살펴본다. t_1에서의 급전량은 t_1의 수급 균형을 위한 발전력을 우선으로 하고 또한 t_1으로부터 증감발 용량 산출 기준시간(2 interval time) 이후인 t_3의 순부하를 예측하여 이에 대비하기 위한 FRP_1을 함께 확보하는 급전계획을 수립한다. 이와 마찬가지로 t_2에서는, t_2의 순부하와 t_2에서 예측한 t_4 순부하의 변동성과 불확실성에 대처하기 위한 FRP_2를 만족하도록 급전계획을 세운다. 이와 같이 한 단위 씩의 급전계획만 수립하는 방법을 단일 단위 급전(single interval dispatch)라고 하며, 현재 활용되고 있는 방식

이다. 이러한 방식은 단지 한 단위 앞만을 예측하여 급전을 한다는 점에서 한계가 발생하며 이를 개선한 다중 단위 급전(multiple interval dispatch)를 3장의 1절, 3.1.1에서 보인다. 또한, 순부하를 예측함에 있어서 항상 불확실성을 동일하게 확보하는 방법에 따른 한계가 존재하기 때문에 이를 개선시켜 예측 오차를 반영하여 불확실성을 산정하는 방안을 3장의 3.1.2에서 제시한다.

제 3 절 증감발 용량과 예비력 비교

앞서 서술한 증감발 용량의 산정방안을 통해 확보해야 하는 증감발 용량은 현재 기동 중인 일반적인 발전기들만 제공할 수 있다. 이 절에서는 위와 같은 증감발 용량 자원은 기존의 예비력 자원과 어떻게 다른가를 비교하여 서술한다.

재생 에너지의 증가로 인하여 순부하의 변동성과 불확실성이 증대하게 됨에 따라 증감발 용량이 필요하다는 것을 본 장의 1절과 2절에서 서술했다. 증감발 용량이란, 수분(5-10분) 사이에 급격히 변화하는 순부하에 대처하기 위한 용량이다. 이러한 증감발 용량은 이전과는 상이한 순부하의 패턴 때문에 새롭게 요구되는 성질인데 기존의 예비력 상품들과는 역할이 어떻게 다르고 예비력으로는 왜 순부하의 변화에 효과적으로 대응할 수 없으며 이에 따른 증감발 용량의 필요성에 대해 살펴보도록 한다.

예비력은 계통을 운영하고 있는 시장 별로 각각 조금씩 다르게 정의하고 있으며 확보 방법 또한 차이가 있다. 증감발 용량과의 비교를 위해 일반적인 예비력의 기능과 분류를 먼저 살펴보고 이를 증감발 용량과 비교하도록 한다.

예비력은 계통의 주파수를 일정한 기준 범위 내에서 유지시키기 위한 필요한 자원이다. 전기의 공급과 수요가 적절히 균형을 이루는 상황에서는 주파수가 일정하게 유지되지만 발전설비의 고장 및 탈락, 송전선 탈락 등 계통내의 사고 상황이 발생하게 되면 수급의 균형이 무너지게 되며 이에 따라 주파수가 급격하게 변화한다. 주파수가 일정한 범위를 벗어나게 되면 사고 상황으로 간주되고 이를 방치할 경우 계통에 연쇄적으로 악영향을 유발한다. 따라서 이러한 상황을 방지하기 위해 일정수준의 발전력을 대기 시켜놓는 것이 예비력이며 이는 주파수를 일정하게 유지 시키는데 필수적이다. 주파수 변화에 따라 필요로 하는 제어요소를 기준으로 1차, 2차, 3차 제어 요소로 나눌 수 있고 이들을 활용한 예비력은 각각 1차, 2차, 3차 예비력으로 등치한다. 각각의 주파수 제어 요소와 이들 사이의 관계 및 활용 단계를 도식화하면 다음 **그림 2-6**과 같다.

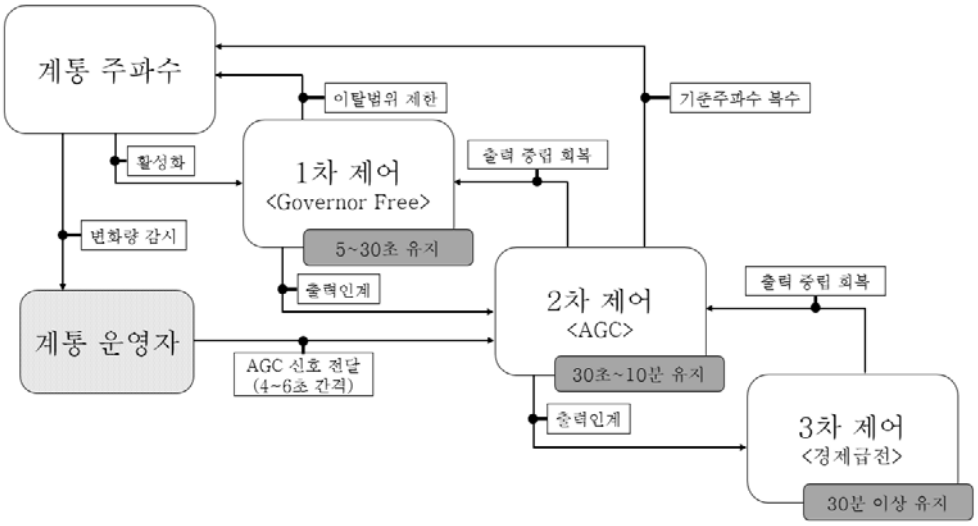


그림 2-6 계통 주파수 제어 요소 [39]

계통 주파수의 변화가 있을 때 1차적으로는 대부분의 발전기에 설치되어 있는 조속기(governor)를 통하여 주파수의 변화를 억제시킬 수 있는 방향으로 출력을 조정한다. 이를 1차 제어라고 한다. 조속기를 통한 발전력의 변화는 약 5초에서 30초 가량 유지할 수 있다. 또한 이러한 상황에서 주파수와 전압이 변화하면 소비전력이 일부 변화하게 되므로 이 또한 주파수 변화를 억제하는 방향으로 작용한다. 하지만 이들의 제어 요소만을 활용하면 어느 정도의 주파수 변화는 억제 시킬 수 있지만 정상 수준의 주파수로 복귀되진 않기 때문에 다시 정상 주파수에 도달할 수 있도록 1차 제어 이외의 다른 제어 요소가 필요하다. 계통 운영자의 자동발전제어(AGC; Auto Generator Control)를 통하여 정상 범위의 주파수로 복귀시킬 수 있고 이를 2차 제어라고 한다. 2차 제어는 일반적으로 사전에 선정한 발전기를 주파수 변화에 따라 자동적으로 출력

을 제어하고 이를 통하여 주파수가 정상적인 범위에 도달할 수 있도록 한다. 2차 제어를 통한 발전기 제어는 약 30초에서 10분 정도의 지속 능력이 있으며 이를 초과하는 변화량에 대해서는 30분 이상 주파수 변화의 억제를 목적으로 할당해둔 발전자원을 투입해야 한다. 이를 3차 제어라고 하며 이와 같은 제어요소들은 예비력을 통하여 확보된다.

제어 요소와 관련된 예비력 자원은 일반적으로 미국에서는, 1차 제어의 경우 1차 주파수 조정 예비력(primary frequency control), 2차 제어와 3차 제어의 경우 2차 주파수 조정 예비력(secondary frequency control), 3차 주파수 조정 예비력(tertiary frequency control)으로 분류한다. 미국의 경우 1차 제어는 일정 규모 이상의 발전기라면 의무적으로 확보를 해서 계통에 제공해야 한다. 2차 제어 자원은 regulation과 spinning reserve로 나뉘는데 regulation은 주파수의 미소 변화량에 대처하는 자원이다. 또한 spinning reserve 자원은 비상시에 주파수 복구의 용도로 할당되는 2차 제어 자원이다. 우리나라의 예비력의 경우에는 1차와 2차 제어 자원은 주파수조정 예비력의 항목으로 확보하며 3차 제어 자원은 대기, 대체 예비력으로 확보한다.

여기까지 예비력의 개괄적인 내용에 대해 살펴봤다. 지금부터는 증감발 용량과 예비력의 차이에 중점을 두고 살펴보도록 한다. 가장 먼저 두 자원 활용의 기준이 되는 지표를 비교하면, 증감발 용량은 순부하의 값을 기준으로 필요량을 산정하여 급전하지만 예비력의 경우에는 계통의 주파수 값을 기준으로 응동 여부를 판단한다. 주파수의 변화는 순부하의

변화에 따라서 발생하기도 하지만, 주로 예측된 순부하의 값에서 실제 측정값이 벗어난 경우 수급 불균형이 발생하게 되고 이때 주파수의 변화가 발생한다. 또한 각 자원의 목적을 비교하면 다음과 같다. 증감발 용량의 경우 순부하의 변화량과 이에 포함되는 변동성 및 불확실성에 대처하기 위함이다. 반면, 예비력의 목적은 예측되어 급전한 값에서 벗어난 불확실성에 대응이며 이를 위해 존재한다. 정리하면 증감발 용량은 순부하의 변동성에 불확실성을 더하여 이를 대비하기 위한 자원이고 예비력은 예측한 순부하를 벗어나는 불확실성에 대비하기 위한 자원으로 그 쓰임이 상이하다. 따라서 증감발 용량의 할당 없이 기존의 예비력만으로 계통을 운영하는데 어려움이 따른다.

증감발 용량은 변동성과 불확실성에 대비하는 자원이고 예비력은 불확실성에 대비하는 자원이다. 하지만 증감발 용량이 예비력보다 단순히 더욱 포괄적이고 중요한 자원이라고는 볼 수 없다. 예비력의 경우 수 초부터 수 십분 이상까지 출력을 유지시키는 자원으로 종류가 다양하기 때문에 증감발 용량만으로는 예비력이 담당하는 부분을 충족 시킬 수 없다. 예를 들어 발전기의 탈락으로 인하여 수초 단위로 급격하게 변화하는 주파수의 변화는 1차 및 2차 예비력으로는 대응이 가능하지만 증감발 용량은 5-10분 단위이기 때문에 이러한 변화에 대응하기 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서 주장하는 바는 예비력의 쓸모가 덜 하다는 것이 아니라 각자의 용도가 다름을 밝히고 기존의 예비력과 더불어 증감발 용량 또한 필요함을 주장하는 바이다.

증감발 용량은 급격하게 변화하는 순부하에 대응 할 수 있도록 증감발 자원을 한, 두 단위 급전간격 이전에 미리 산정하여 급전에 활용하는 용량을 의미한다. 반면 예비력은 혹시 생길지도 모르는 사고에 대응하기 위하여 급전 시간단위 동안 대기 시켜놓는 용량을 의미한다. 따라서 증가한 변동성에 대처하기 위한 목적으로 예비력을 확보한다면 급전 시 에너지로 이용될 수 있는 자원의 양이 줄어들기 때문에 에너지 가격의 상승을 유도한다. 더욱이 증감발 용량의 경우에는 급전 시 에너지 가격으로 보상 받지만 에너지로 사용된 예비력의 경우는 페널티 가격으로 보상 받는다. 따라서 증가하는 변동성을 해소 시키기 위하여 예비력을 활용한다면 실시간 에너지 가격을 상승시킬 뿐만 아니라 예비력의 원래 확보 의도에 부합하는 사고가 발생했을 때 정작 이를 활용 못하여 수급의 불균형이 발생하는 상황도 유추해 볼 수 있다 [40]. 따라서 용도를 세분화하여 이에 적합하도록 증감발 용량을 따로 확보하는 것이 가격적 측면과 더불어 계통 운영적 측면에서도 효과적이다. 더불어 증감발 용량은 실시간 시장에서만 확보할 수 있지만 예비력은 실시간 시장과 전일 시장에서 확보를 한다는 차이점이 있다.

제 3 장 증감발 용량의 활용방안 개선

이번 장에서는 앞서 서술한 기존의 증감발 용량 모델이 가지고 있는 한계를 극복할 수 있는 개선된 증감발 용량 모델을 제시한다. 증감발 용량의 필요량을 산정함에 있어서 기존의 모델은 시간단위를 단일 단위(single interval)로 했지만 본 논문에서 제시하는 모델은 이의 시간단위를 다중 단위(multiple interval)로 증가시켜 더욱 정교한 증감발 용량 필요량의 계산을 유도한다. 더불어 순부하의 크기와는 상관없이 모든 시간 동안 동일하게 불확실성에 대처하는 용량을 확보하던 기존 용량 산정 방식을 개선한다. 불확실성을 순부하의 크기에 따라 계통상황을 고려하여 시간 별로 상이하게 확보함으로써 더욱 안정적이고 효과적으로 계통을 운영할 수 있도록 한다. 또한 새로운 증감발 용량 자원으로써 전기차의 활용을 새롭게 제시하며 이를 중점적으로 보인다.

제 3 장의 1절에서는 증감발 용량을 할당하기 위해 예측 시간단위 증가를 고려하는 다중 단위 급전을 서술한다. 이어서 증감발 용량의 불확실성을 산정함에 있어서 예측오차를 고려하여 불확실성 대응용량을 산정하는 방안과 송전한계를 고려하는 방안을 2절과 3절에서 차례로 서술한다.

제 1 절 다중 단위 급전(multiple interval dispatch)을 활용한 증감발 용량 할당

다중 단위 급전(multiple interval dispatch)은 기존의 단일 단위 급전(single interval dispatch)보다 더욱 정교하게 발전력 및 증감발 용량을 확보하고 할당하는 방법이다. 단일 단위 급전을 활용하여 계통을 운영하는 방식에서는 한 단위시간 앞에서 확보해야 할 순부하량을 산정하고 이의 변동성 및 불확실성을 포함한 증감발 용량을 각 발전자원과 증감발 자원에게 급전을 지시한다. 하지만 다중 단위 급전의 할당 방안에서는 한 단위시간이 아니라 여러 단위시간 앞까지 예측하여 급전을 한다. 예측을 하는 것에만 그치지 않고 시간대 별로 각각 예측한 여러 단위시간을 함께 고려하여 이에 대응 할 수 있도록 시간 단위 별로 발전량을 급전하는 방법을 다중 단위 시결합 급전(multiple interval time-coupled dispatch)이라고 한다. 이와 같이 여러 시간단위까지 고려한다면 한 단위시간만 고려하는 방안 보다는 급격한 순부하의 변화에 더욱 적절히 대처할 수 있으며 발전기의 증감발 능력을 고려하여 이에 알맞게 급전지시를 할 수 있다. 예를 들어 세 단위시간 이후에 급격한 순부하의 변화가 예측된다면 단일 단위 급전에서는 이를 한 단위 이전에서만 고려할 수 있다. 하지만 다중 단위 시결합 급전을 활용하면 각각의 단위시간 별로 적합한 발전량을 할당할 수 있으며 이와 같은 방식은 단일 단위 급전 보

다 계통을 운영함에 있어서 효율적임이 알려져 있다 [15, 17]. 이와 같은 다중 단위 시결합 급전을 본 논문에서 활용했고 네 개의 시간단위를 함께 고려하는 예시를 아래에서 보인다.

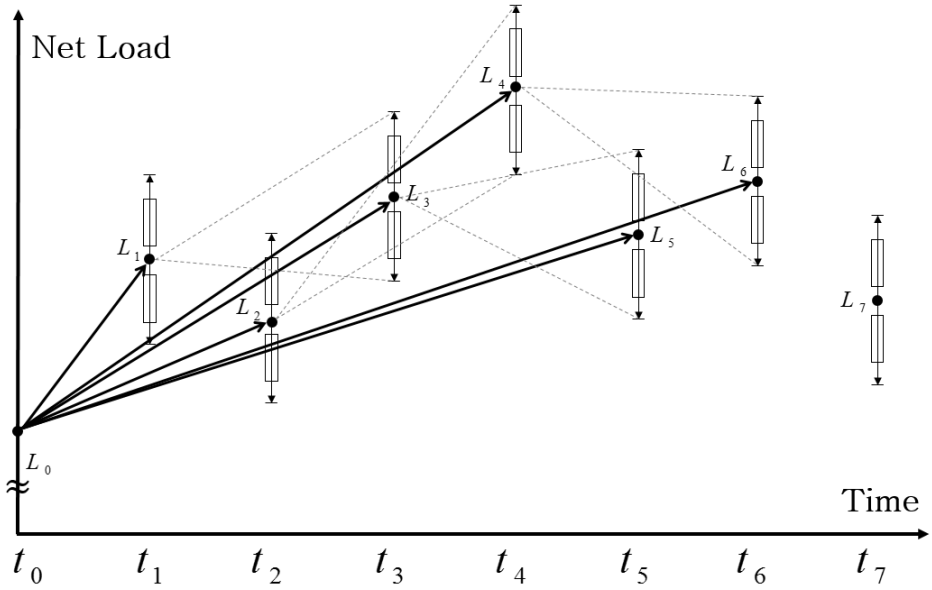


그림 3-1 t_1의 다중 단위 시결합 급전 예시

위의 **그림 3-1**은 t_0에서 수행한 t_1에 확보해야 할 순부하와 증감발 용량을 다중 단위 시결합 방법을 통해 급전 한 예시를 나타냈다. 이 예시에서 다중 단위의 기준은 네 개의 시간단위이다. t_0에서는 t_1에서 확보해야 하는 발전력을 산정하기 위해 t_1부터 t_6까지의 순부하를 예측한다. 예측한 순부하를 바탕으로 t_1 ~ t_4의 순부하를 함께 고려하여 이들을 만족시킬 수 있는 급전계획을 세운다. 또한 이들 순부하의 변동성과 불확실성을 고려하여 증감발 용량을 함께 고려한 급전계획을 한다. 여기서,

급전계획은 t_1부터 t_4까지만 세우지만, t_4에서는 t_6의 순부하 변동성 및 불확실성을 계측하여 이에 필요한 증감발 용량(FRP_4)을 확보해야 하기 때문에 t_6까지의 순부하 예측이 필요하다. 결과적으로 t_1부터 t_4까지 이들의 순부하와 증감발 용량을 만족시키는 급전계획을 세우고 이때 산출한 t_1의 결과를 급전한다. 따라서 앞으로 네 단위시간 동안 예측되는 순부하에 대비할 수 있는 t_1의 급전을 지시할 수 있다. t_2의 급전량을 산정하는 예시를 아래 **그림 3-2**에서 보인다.

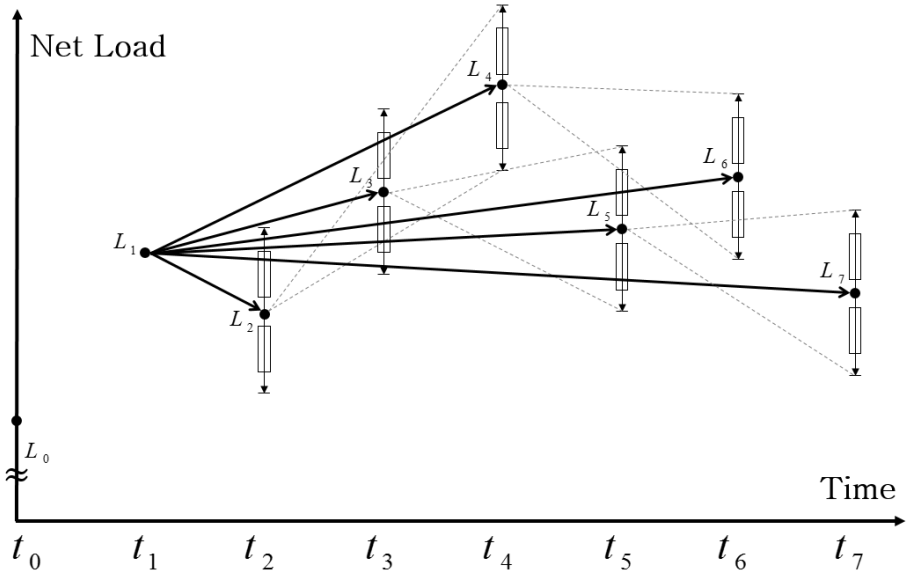


그림 3-2 t_2의 다중 단위 시결합 급전 예시

t_1에서, t_2의 급전계획을 세우기 위하여 t_2부터 t_7까지의 순부하를 예측한다. 순부하 예측량을 바탕으로 t_2부터 t_4의 증감발 용량을 포함한 급전계획을 세우며 이때 산정한 t_2의 급전량을 지시한다.

제 2 절 예측오차를 고려한 불확실성 대응 용량 산정

증감발 용량은 변동성과 불확실성의 합으로 산정한다. 이들을 측정하는 방법을 살펴보면, 우선 변동성은 예측한 순부하들의 차이를 통하여 측정한다. 시간 별로 순부하는 끊임없이 변화하는 성질을 가지고 있다. 따라서 순부하가 변화하므로 이들을 통해 측정되는 변동성도 변화하며, 시간에 따라 변동성에 대비하기 위해 확보해야 하는 용량 역시 지속적으로 변한다. 하지만, 기존 방법에서 불확실성은 시간에 관계없이 항상 같은 값으로 가정하여 활용한다. 이와 같이 불확실성의 값을 항상 일정하게 고려하여 증감발 용량을 산정하는 과정을 다음 **그림 3-3**에서 보인다.

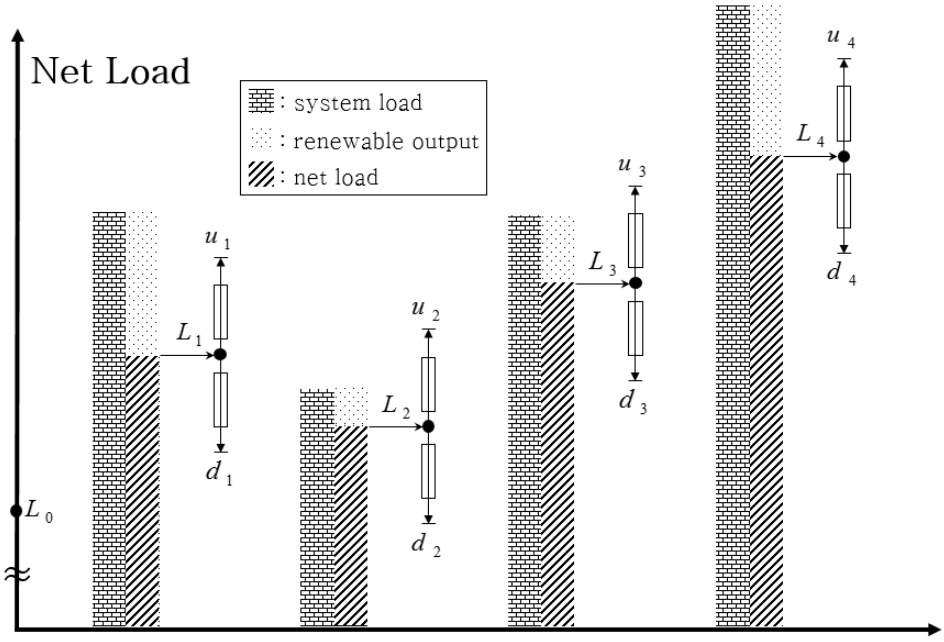


그림 3-3 불확실성 산정 예시 – 고정된 불확실성

위 그림은 기존의 일반적인 증감발 용량 산정 방법을 나타낸다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 불확실성의 값 u_1 ~ u_4와 d_1 ~ d_4 은 시간과 상관없이 항상 고정된 값으로 정한다. **그림 3-3**에서 벽돌 무늬로 색칠된 부분이 일반적인 계통 부하이며, 점으로 채워진 부분은 재생 에너지의 출력을 뜻한다. 계통 부하에서 재생 에너지 출력을 제외한 값이 순부하이며 그림상에서 왼쪽 사선으로 색칠된 부분이 이를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 계통의 상황과는 관계없이 모든 시간에서 항상 상방 불확실성 값(u_1 ~ u_4)은 일정하다. 마찬가지로 하방 불확실성 값(d_1 ~ d_4) 또한 일정하게 설정한다. 실제로, 증감발 용량을 확보하는 해외의 실제 전력시장에서는 불확실성의 값을 항상 일정한 값으로 설정하며 이 값은 과거 측정 순부하를 바탕으로 산정한다. 예를 들어 MISO의 경우에는 과거 수요의 예측값과 실제 측정값을 바탕으로 자기회귀분석(Autoregressive) 기법을 활용하여 불확실성의 예측 오차를 산출한다. 이러한 과정을 통하여 MISO는 시간과 순부하의 크기와 관계없이 항상 고정 된 12MW를 증감발 용량을 산정함에 필요한 불확실성의 값으로 사용한다. 이와 같이 항상 고정된 불확실성의 값을 사용하게 되면 증감발 용량 확보를 통하여 안정적인 계통을 운영하는데 한계가 발생할 수 밖에 없으며 합리적이지 않음을 추론할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 같은 값의 증감발 용량을 항상 활용하는 기존의 방법에서 벗어나 시간별로 그 때의 계통 상황을 적절히 반영하여 불확실성을 산정하는 방안을 제시한다.

시간 대 별로 계통 상황을 고려하여 불확실성을 산정하는 방안은 다양하게 존재할 수 있다. 그 중에서 첫 번째로 생각해 볼 수 있는 방안은 해당시간에 예측되는 순부하의 값을 바탕으로 순부하 예측오차의 분포를 생성하며 각 시간대에서 증감발 용량의 불확실성을 산정하는 기법이다. 먼저 이를 제시한다.

증감발 용량은 순부하의 값을 바탕으로 산정하기 때문에 불확실성 역시 순부하에 비례하게 확보하는 것을 먼저 제안한다. 예를 들면, 순부하 값의 5%를 순부하 예측 오차의 표준편차로 정하여 불확실성에 대비하는 용량을 산정하는 것이다. 순부하가 100MW일 경우에는 100*0.05 = 5MW를 순부하 예측오차의 표준편차로 산정한다. 순부하의 예측오차는 평균이 0인 정규분포의 형태임이 알려져 있다 [41]. 따라서 이와 같은 경우 예측오차의 분포는 평균이 0이고 표준편차가 5인 정규분포를 이룬다. 산출한 정규분포를 통하여 일정 신뢰도를 만족하는 값을 산출하고 이를 예측의 불확실성에 대비하는 용량으로 정한다. 해당 시간대의 순부하를 바탕으로 시간마다 필요로 하는 증감발 용량을 산정한다. 물론 시간 별로 순부하의 값이 변화하므로 불확실성에 대응하는 용량 또한 다르게 측정된다. 따라서 항상 고정된 값으로 불확실성에 대비하던 앞선 방법 보다는 진보한 방법이라고 할 수 있다. 하지만 순부하에 비례하게 적용하여 생성한 예측오차의 분포를 통해 불확실성을 정하는 방식은 다음 그림과 같은 한계를 지닌다.

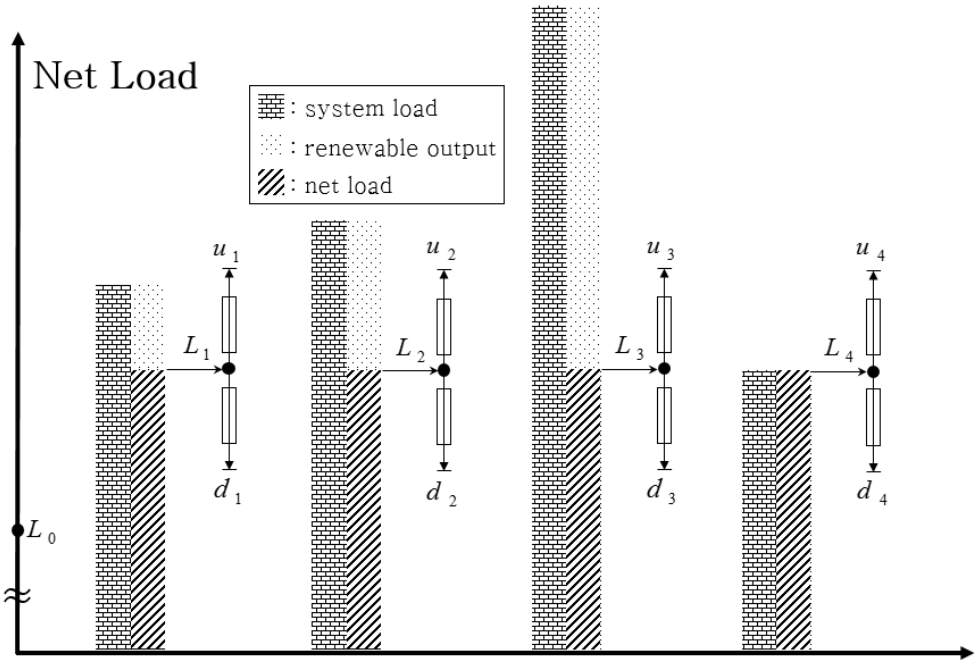


그림 3-4 불확실성 산정 예시 – 순부하에 비례

위의 **그림 3-4**를 살펴보면 일반 계통부하와 재생 발전원의 출력은 각각 다르지만 순부하의 값 L_1 ~ L_4는 모두 같은 값을 나타낸다. 증감발 용량의 불확실성을 산정함에 있어서 이를 순부하에 비례하게 확보한다면, 계통의 상황을 반영하여 불확실성을 확보하고자 하는 증감발 확보용량 산정방법 개선의 취지와는 다르게 계통의 상황이 다름에도 불구하고 순부하값이 일정하게 산정된다. 따라서 불확실성에 대비하는 값이 동일하게 산출되는 문제점이 발생할 가능성이 존재한다.

예측의 불확실성이 발생하는 원인은 크게 두 가지이다. 부하를 예측함에 따라 발생하는 불확실성과 재생 에너지원의 출력을 예측하면서 생겨나는 불확실성이다. 일반적으로 부하의 값이 클수록 이에 따르는 예측

오차 분포의 표준편차가 커지며 재생 발전원의 출력 또한 마찬가지다. 위의 그림에서 L_3와 L_4를 비교해보도록 한다. L_3는 예측되는 부하의 값이 L_4보다 훨씬 크고 재생 에너지의 출력량도 훨씬 크게 예측된다. 이에 비해 L_4의 재생 에너지 출력량은 아예 없을 것으로 예측된다. L_3에서 예측되는 부하와 재생 에너지의 출력량이 훨씬 큼에도 불구하고 L_3와 L_4의 순부하의 값이 같다. 그러므로 순부하에 비례하게 불확실성을 확보한다면 위와 같은 두 경우에서는 증감발 용량의 불확실성에 대비하는 필요량은 같은 값으로 산정된다. 이처럼 계통의 일반부하와 재생 발전원 출력을 연산한 순부하의 값이 우연히 같더라도 이 때의 일반부하와 재생 발전량이 각기 다를 수도 있으므로 이를 고려하지 않으면 불확실성의 합리적인 산정 방안이 될 수 없다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 확률론적 연산방식을 통하여 불확실성을 산정하는 방안을 제안한다. 제안하는 방법을 통하여 기존에 활용하고 있는 산정방식과 본 논문에서 앞서 제안한 비율적 방법 보다 더욱 효과적으로 계통상황에 대처할 수 있는 불확실성의 확보를 목적으로 한다.

본 논문에서 제안하는 불확실성 산정방안은 부하와 재생 에너지의 예측오차를 모두 고려하는 방식이다. 앞서도 언급한 것과 같이 순부하를 예측함에 있어서 발생하는 불확실성은 부하의 예측오차와 재생 에너지의 출력을 예측하는데 따르는 예측오차로부터 기인하다. 따라서 부하의 예측오차와 재생 에너지 출력의 예측오차를 각각 고려하여 불확실성을 산정한다. 이때 부하 예측오차의 분포는 평균값이 0인 정규분포로 가정하

고 [42] 재생 발전원의 출력 예측의 불확실성 역시 평균값이 0인 정규분포로 가정한다 [41]. 더불어 이러한 정규분포의 표준편차 값을 계통상황에 맞도록 산정한다. 이와 같이 산정한 각각의 불확실성의 분포에서 일정한 신뢰도 범위를 만족하는 값을 산출하고 이들을 합하여 해당 급전시간의 증감발 용량 불확실성으로 정한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$FE_{load} \sim N\left(0, \sigma_{load}^2\right) \tag{3-1}$$

$$FE_{renew} \sim N\left(0, \sigma_{renew}^2\right) \tag{3-2}$$

$$\sigma_{load,t} = \delta \cdot d_t \tag{3-3}$$

$$\sigma_{renew,t} = \omega_1 \cdot \overline{rp_t} + \omega_2 \cdot rp_t \tag{3-4}$$

위의 식 (3-1) ~ (3-4)에서 FE_{load}와 FE_{renew}는 각각 부하의 예측오차와 재생 발전원의 출력 예측오차 분포를 나타낸다. 앞서 서술한 것과 마찬가지로 이들은 평균이 0인 정규분포를 이룬다. 여기서, 부하 예측오차 분포의 표준편차는 해당시간에 예측되는 부하에 계수 δ를 곱하여 계산한다. 선행연구 [42]에서는 $\delta = 0.02$로 정하였다. 예를 들어 어떠한 시간에 예측되는 부하의 값이 100 MW라고 가정하면, 부하의 예측오차 분포는 평균값이 0이고 표준편차는 0.02*100 = 2MW 인 정규분포 $\mathrm{N}(0, 2^2)$를 이룬다. 한편, 재생 발전원 출력의 예측오차 분포 또한 정규분포이지

만 이때의 표준편차는 해당시간 재생 발전원의 설비의 용량과 재생 발전원의 예측 출력값을 활용하여 산정한다. 이는 위의 식 (3-4)에 나타냈다. $\overline{rp_t}$는 해당시간의 재생 발전원의 설비용량을 의미하고 rp_t는 그 시간대에 재생 발전원의 발전량을 의미한다. 출력의 예측오차는 재생 발전원의 설비크기 자체에도 비례하고 예측 출력값에도 영향을 받기 때문에 두 항목으로 나눠서 산정한다. 이 때 재생 발전원의 설비 용량과 예측 출력량 각각에 계수를 곱하여 재생 발전원 출력 예측오차의 분포를 계산한다. 재생 발전원의 설비용량은 예방 정비 등의 특수한 상황을 제외하고는 대부분 일정하고 출력량은 시시각각 변화하므로 출력의 예측오차는 시간별 출력량에 더욱 영향을 받는다. 따라서 재생 발전원의 출력에 곱하는 계수 ω_2는 설비용량에 곱하는 계수 ω_1보다 상대적으로 크게 설정하여 반영한다. 기존의 연구 [41]는 비록 풍력발전원만 존재하는 계통을 대상으로 삼아서 계수를 설정했지만 재생 에너지원의 예측오차를 본 논문과 유사한 방법으로 산정했으므로 참고할만하다. 해당 연구 [41]에서는 설비용량에 관련한 계수(ω_1)는 0.02로 설정하고 예측 출력량에 곱하는 계수(ω_2)는 0.2로 설정했다. 이를 예로 들어보면, 풍력설비의 용량이 20 MW이고, 이 때 풍력의 발전량이 5 MW로 예측되는 상황에서 풍력발전의 예측오차의 표준편차는 20*0.02 + 5*0.2 = 1.4MW이다. 이에 따라서 위와 같은 상황의 예측오차는 정규분포 $\mathrm{N}(0, 1.4^2)$를 따르고 더불어 신뢰도 99%를 만족하는 값을 산정하여 증감발 용량의 불확실성 값 산출에 활용한다.

위의 예제와 같이 부하의 예측오차의 분포와 재생 에너지의 출력 예측오차의 분포를 통하여 해당시간에 필요한 증감발 용량의 불확실성을 산출하는 방법은 다음과 같다. 부하 예측오차의 분포는 $\mathrm{N}(0, 2^2)$이고, 재생 에너지 출력 예측오차의 분포는 $\mathrm{N}(0, 1.4^2)$이다. 99%의 신뢰도를 만족하는 값은 부하 예측오차의 경우 5.16MW이고, 재생 에너지의 출력 예측 오차는 3.612MW이다. 따라서 이 시간대의 불확실성은 5.16 + 3.612 = 8.772MW이다. 시간대 별 상방 불확실성(u_t)과 하방 불확실성(d_t)이 서로 같다고 가정할 때, 예제 시간대의 불확실성은 상방과 하방 모두 동일하게 8.772MW이다. 결과적으로 이 시간대에 필요한 증감발 용량은 순부하의 차이인 변동성에 위의 계산을 통하여 산출한 불확실성 8.772MW를 더하여 최종적으로 결정할 수 있다. 이와 같은 방법에 영향을 미치는 요소들은 물론 예측 부하의 크기와 재생 에너지 출력이지만 이들에 곱해지는 계수(δ, ω_1, ω_2)의 값 또한 중요한 요소이다. 이들을 어떠한 값으로 정하느냐에 따라 불확실성의 예측분포가 변화한다. 계수값의 설정은 예측오차의 분포를 어떠한 형태로 활용할 것인가, 부하와 재생 에너지의 예측오차를 얼만큼 반영할 것인가, 재생 에너지의 설비용량과 발전량의 반영비율은 어느 정도로 정할 것인가에 따라 계수를 다르게 설정하여 계통 운영 시 증감발 용량의 확보에 활용할 수 있다. 계수의 적정한 값을 설정하는 연구는 본 논문에서는 다루지 않기로 하며 단지 본 논문에서 제시하는 계통상황을 고려하는 방안과 이전 방안을 비교하여 제안하는 방법의 우수성을 사례연구에서 비교하여 보인다.

이처럼 계통 상황을 반영하여 불확실을 산정한 예제를 아래 그림과 같이 나타냈다. 이는 순부하의 값이 유연히 일정한 시간들에서도 계통상황 반영여부의 가능성을 확인하기 위하여 **그림** 3-4과 동일한 상황에서 예측오차를 고려한 불확실성 산정예제를 아래의 **그림** 3-5에 나타냈다.

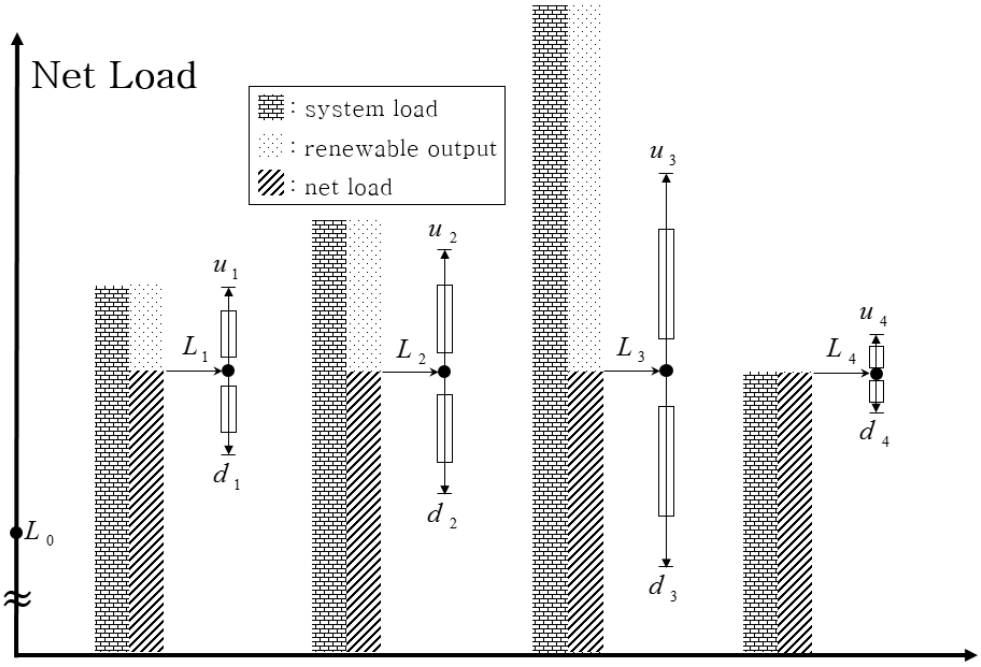


그림 3-5 불확실성 산정 예시 - 예측오차 고려

위의 그림을 통해, 계통 부하와 재생 에너지 출력의 예측오차를 활용하여 불확실성을 산정하면 매 시간 별로 순부하의 값은 같지만 불확실성을 계통의 상황을 반영하여 시간 별로 다르게 산정되는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 방법을 적용하여 불확실성을 계산하며 이를 통하여 필요 증감발 용량을 최종적으로 산정한다.

제 3 절 송전한계를 고려한 증감발 용량

재생 에너지가 증가함에 따라 변동성 및 불확실성이 증가하게 되며 이에 대한 결과로 증감발 필요용량이 증가하게 될 것임을 앞서 일관되게 서술해왔다. 증감발 필요용량이 증가함에 따라 이들이 송전선 전력의 흐름에 미치는 영향을 간과할 수 없다. 예비력이 송전혼잡에 미치는 영향을 고려하기 위하여 구역 별로 필요한 예비력을 따로 산정하는 방안을 활용한다. 하지만 이와 같은 방식은 off-line study를 통하여 구역 별로 예비력 요구량을 미리 정해놓고 이들의 합이 전체 예비력 요구량을 만족하도록 운영하는 방식이다. 사전에 구역 별로 필요한 예비력 요구량을 정하는 방식과는 다르게 급전 순간순간 할당되는 발전량과 예비력 및 부하와 재생 에너지의 출력량이 송전선에 미치는 영향을 평가하는 기존의 연구가 존재하며 이는 실시간으로 계통상황을 반영하여 이들이 송전선에 미치는 영향을 적용하여 급전하기 때문에 송전한계를 고려한 계통 운영이 가능하다는 점에서 기존의 방안보다 효율적이다 [31]. 본 논문에서는 예비력이 송전선의 조류에 미치는 영향을 고려한 것에서 발전시켜 증감발 용량이 송전한계에 미치는 영향 또한 고려하였으며 이는 감도(sensitivity)를 활용하여 산출할 수 있다. 기본적으로 감도는 PTDF(power transfer distribution factor)를 통하여 산정하며 본 논문에서는 $H_{l,n}$으로 나타냈다. 이는 노드 n의 발전력 또는 부하의 증감이 송전선 l에 미치는 영향을 의미한다. 감도는 노드 별로 각각 상이하게 산

정하며 감도의 크기는 노드에 연계되어 있는 기존의 발전기의 출력과 재생 에너지의 발전량 또는 부하량에 모두 동일하게 적용하나 부호는 반대이다. 만약 기존 발전기의 발전력이 송전선에 흐르는 조류의 양을 증가시키는 쪽으로 작용한다면 같은 노드에 위치한 재생 발전원의 출력과 부하는 이와는 반대로 조류의 양을 감소시키는 작용을 하기 때문이다. 반면, 예비력과 증감발 용량처럼 이들이 필요한 경우에만 선별적으로 쓰이는 자원들은 비정기적인 특성을 가지고 있기 때문에 각각의 노드 별로 감도를 산정하지는 않고 구역 별로 이들이 특정 송전선에 미치는 영향을 평가하는 통합 감도(aggregated sensitivity)를 활용한다. 예를 들어 $H_{l,z}^{FRU}$와 같은 경우는 구역 z에 할당된 증발 용량 자원들이 송전선 l에 미치는 영향을 산정하는 통합감도이다. 이와 같은 발전량 및 부하, 증감발 용량이 송전혼잡에 미치는 영향은 시간에 따라 변화한다. 따라서 시간에 따라 부하와 재생 에너지, 일반 발전기의 발전력은 감도를 활용하고 예비력 또는 증감발 용량의 경우는 통합 감도를 통하여 그 영향을 평가하여 이들의 합이 송전용량을 초과하지 않도록 운영한다. 일반적으로 구역간을 연결하는 모든 송전선을 대상으로 평가하지는 않으며 가장 취약한 즉, 송전 여유용량이 가장 부족한 송전선을 선정하여 이를 대상으로 송전혼잡을 관리한다. 본 논문에서는 이와 같은 방안을 활용하여 송전제약을 침해하지 않는 범위에서 계통 운영을 할 수 있도록 하는 방안을 적용했다. 더욱이 증감발 용량을 포함한 모든 요소를 고려하여 송전혼잡을 유발하지 않도록 계통을 운영하는 방안을 활용한다.

제 4 장 증감발 용량의 전기차 활용

전기차의 동력원은 배터리이다. 연료를 공급하여 내연기관을 작동시켜 운행을 하는 일반 자동차와 다르게 전기차는 내부의 배터리에 전력을 충전시켜 이를 활용하여 운행한다. 전기차의 지속적인 활용을 위해서는 운행 시에 배터리로부터 사용한 전력을 충전해야만 하고, 배터리의 충전은 계통으로부터 이루어지기 때문에 반드시 계통과 연결해야 한다. 따라서 전기차가 증가하면 이를 충전시키기 위한 충전부하 또한 늘어나게 되며 계통의 전체 전기수요를 증가시키는 결과를 초래한다. 하지만 배터리는 충전뿐 아니라 방전 또한 할 수 있는 기기적인 특성을 지니고 있기 때문에 반드시 계통에 나쁜 영향만을 야기시키는 것은 아니다. 계통운영자는 계통에 연계 된 전기차를 증감발 능력이 우수한 배터리로써 계통의 상황에 맞도록 충방전에 활용할 수 있다. 전기차의 지속적인 증가가 예상됨에 따라 전기차를 통하여 충분한 용량의 확보가 가능하기 때문에 용량의 측면에서 전기차의 활용이 용이하다 [43].

우리나라 교통안전공단의 통계에 따르면 하루 평균 전체 자동차의 주행거리는 43.9km이며, 주된 전기차의 용도일 것으로 예상하는 승용차일 경우 하루 평균 주행거리는 37.6km 이다 [44]. 더욱이 전기차의 하루 평균 운행시간은 24시간 중 2시간도 채 안되기 때문에 운행시간 이

외의 시간 동안 계통과 연계만 되어 있다면 계통운영자는 전기차 사용자의 편의를 크게 침해하지 않는 범위에서는 얼마든지 활용가능 하다. 따라서 활용가능 시간의 측면에서 또한 전기차의 활용도는 우수하다. 제 4장의 1절에서는 전기차를 증감발 자원으로 활용하기 적합한가에 대하여 더욱 자세히 분석해보도록 하며 이를 증감발 용량으로 활용하기 위해 필요한 과정들을 2절과 3절에 자세히 서술한다.

제 1 절 전기차의 증감발 용량 적용가능성 고찰

전기차 배터리는 증감발 능력이 매우 우수하기 때문에 5-10분 단위의 급격한 변화에 대응하는 증감발 용량으로 활용하는데 있어 출력의 특성 측면에서는 부족함이 없다. 또한 전기차의 보급이 가속화되고 있으므로 전기차를 증감발 용량으로 활용하기 위한 용량 측면으로서도 충분하다는 것을 앞서 살펴봤다. 전기차는 전력계통에서 다방면으로 활용할 수 있다. 기존에 진행되었던 대부분의 연구들은 전기차가 지니고 있는 배터리의 특징인 빠른 응동 속도를 활용하여 전력계통의 운영 시에 필요한 예비력으로 전기차를 활용하는 것에 대하여 집중하였다. 특히, 이러한 증감발 능력의 특성을 극대화 시키기 위하여 대상 시간이 수 초 이내인 1차 주파수 예비력(primary frequency reserve)으로 이용하는 연구들이 주류를 이룬다 [26, 27]. 그렇다면 전기차를 주파수 예비력이 아니라 증감발 용량으로 활용하는 것이 가지는 이점들을 살펴보도록 한다.

전기차를 주파수 조정 예비력이 아니라 증감발 용량으로 활용함에 따르는 첫 번째 이점은 활용빈도가 적다는 것이다. 주파수 조정 예비력 자원으로 활용하게 된다면 수초 단위 안에서 끊임없이 변화하는 주파수를 정상 범위에 위치시키기 위하여 전기차의 충방전을 연속적으로 반복해야 한다. 계통의 주파수 조정만을 목적으로 하는 기존의 주파수 조정 예비력 자원들과는 달리 전기차의 최우선 목표는 소유주의 이동수단으로써의 활용일 것이다. 따라서 주파수 조정 예비력으로 활용 시 다양한 제약조건들을 통하여 전기차 소유자의 이용도를 침해하지 않도록 설정하더라도 수 초 단위로 매우 잦게 활용하는 예비력 자원이라면 소유주의 전기차 활용도에 악영향을 미치게 된다. 또한 주파수 조정 예비력으로 언제 쓰이게 될지를 사전에 예측하는데 어려움이 있기 때문에 이러한 점 또한 사용자의 활용도를 크게 침해하는 원인이 된다. 반면 증감발 용량으로 전기차를 사용한다면 쓰임이 예정된 급전 단위시간(5분 단위)에는 전기차의 활용이 제한 될 수도 있지만 해당 기간이 길지 않고, 이 쓰임은 최소한 10-15분 전에 예정되어 있기 때문에 전기차의 첫 활용목표인 이동수단으로써의 이용을 크게 침해하지 않는다. 그러므로 전기차의 활용도 측면에서 예비력으로 활용하는 것 보다 증감발 용량으로 활용하는 것이 유리하다. 게다가 주파수 조정 예비력으로 사용된 전기차의 사용량은 아주 짧은 시간에 많은 횟수를 반복하므로 실제 사용량을 측정하기가 쉽지 않지만 반대로 증감발 용량으로 활용되는 용량은 쉽게 측정이 가능하므로 향후 사용에 따른 정산이 필요한 상황에서도 이점이 있다.

더불어 배터리의 수명 측면에서도 증감발 용량 활용의 이점이 있다. 시중에 판매되고 있는 전기차는 대부분 리튬-이온 배터리를 사용한다. 리튬-이온 배터리의 수명에 크게 영향을 주는 것은 배터리의 작동 온도(operating temperature), 방전심도(DoD; depth of discharge), 충방전율(charge/discharge current rate)이다 [45]. 여기서 방전심도란 배터리가 방전된 양의 비율을 의미한다. 방전심도가 30%이면 전체의 30%가 방전되고 70%가 남은 것이고, 방전심도가 100%이면 배터리가 완전히 방전된 상태이다. 배터리의 수명에 미치는 영향을 바탕으로 생각해보면 배터리의 작동 온도는 차치하더라도 상대적으로 적은 에너지를 사용하는 주파수 조정 예비력으로의 활용은 방전심도 측면에서는 증감발 용량의 활용보다는 이점이 있을 수 있다. 하지만 짧은 시간 동안 급격히 충방전을 반복해야 하기 때문에 충방전율의 측면에서는 증감발 용량의 활용이 배터리 수명에 훨씬 유리하다.

위에서 전기차의 증감발 용량으로써 활용이 예비력으로의 쓰임보다 이점을 가지고 있음을 확인했다. 여기까지는 전기차의 다양한 쓰임 중에서 증감발 용량으로의 활용이 가지는 장점을 살펴봤다면 지금부터는 조금 다른 관점에서 증감발 용량으로 활용할 수 있는 자원 중에서 전기차가 가지는 이점을 살펴보고자 한다. 이를 비교하는 대상은 에너지저장장치(ESS; energy storage system)로 삼는다. 전기차와 마찬가지로 에너지저장장치는 배터리 그 자체로 특성의 유사성 때문에 비교가 가능하며 전기차가 에너지저장장치 보다 증감발 용량으로 활용하기 적합함을 보인다.

에너지저장장치와 다르게 전기차가 지니고 있는 주된 특징은 이동성(mobility)이다. 에너지저장장치는 발전기와 유사하게 처음 설치된 곳에서 이동하지 않으며 이에 따라 에너지저장장치의 설치 위치는 신중하게 결정해야 한다. 반면 전기차는 이동수단이기 때문에 자연히 이동하게 되고 이러한 특징을 이동성이라 한다. 전기차의 이동성을 그림으로 나타내면 다음 **그림** 4-1과 같다.

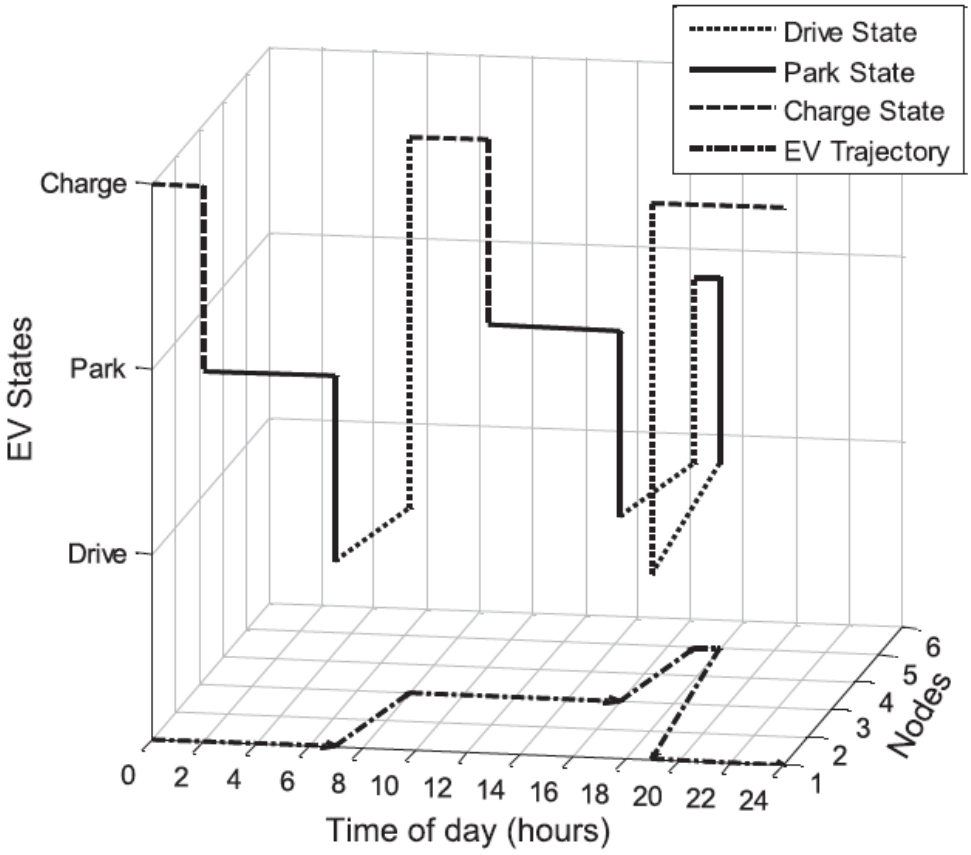


그림 4-1 전기차의 이동성 예시 [19]

위 그림의 세로축은 전기차의 상태를 나타낸다. 다양하게 상태를 나눠볼 수 있지만 그림에서는 전기차가 충전 중인 상태, 충전은 하지 않지만 주차 중인 상태 또는 이동 중인 상태로 나누었다. 이동 상태 중에는 노드를 자유롭게 이동할 수 있으며 이동한 노드에서 주차도 할 수 있으며 물론 충전도 할 수 있다. 위 그림의 예시를 살펴보면 0시부터 2시까지는 1번 노드에서 충전을 하고 있으며, 2시부터는 충전은 하지 않은 채(또는 충전이 다 되었거나) 같은 노드에 계속 위치한다. 전기차는 7시부터 이동을 시작하여 8시에 3번 노드에 도착하고 도착과 동시에 충전을 한다. 이후 시간에서도 전기차의 이동성을 잘 보여주고 있다. 8시부터 16시까지는 줄곧 3번 노드에 위치하지만 16시 이후에 잠시 5번 노드로 이동했다가 다시 1번 노드에 돌아온다. 이처럼 전기차는 이동성을 가지고 있다. 이와 같은 전기차의 특성을 바탕으로 본 논문에서 집중하고 있는 사항은 다음과 같다. 일반적으로 전기에너지가 발전원으로부터 부하로 이용하는 경우 송전선을 활용해야 하지만 전기차는 이동하면서 배터리에 충전되어있는 에너지도 같이 이동하기 때문에 송전선을 사용하지 않고 에너지를 이용시킬 수 있다는 특징을 지닌다. 또한 자동차의 운행은 대부분 일정한 운행패턴을 지니고 있기 때문에 이를 계통운영의 측면에서 적절히 활용할 수 있다는 점에 착안하였고, 이러한 전기차의 이동성을 활용하면 계통의 운영비용을 줄일 수 있고 계통의 혼잡을 해소 시킬 수 있다는 연구도 이미 진행된 바 있다 [29]. 따라서 이동성을 가지지 않는 일반적인 에너지저장장치 보다 전기차를 활용하는 것이 계통 운

영비용의 측면과 송전혼잡의 측면에서 더욱 유리하다.

이와 비슷한 맥락에서 전기차 활용의 또 다른 장점은 다음과 같다. 에너지저장장치를 활용하는 경우와 비교했을 때 전기차를 활용하면 송전혼잡 문제에서 상대적으로 자유로울 수 있다. 일반적으로 에너지저장장치는 이의 주된 사용목적에 따라 재생 발전원의 출력의 변동을 감소시키는 용도로 재생 발전원이 존재하는 지역에 주로 분포하는데, 이들의 지역은 수요가 밀집되어 있는 지역과는 거리가 떨어져 있는 경향이 있다. 반면, 전기차는 전기수요가 있는 지역에 주로 분포한다. 왜냐하면 사람이 있는 곳에 전기수요가 발생하며 사람은 이동수단을 이용하여 이동하기 때문이다. 따라서 에너지저장장치는 전기수요와 상대적으로 떨어져 있는 반면 전기차는 전기수요와 가까이 존재한다. 이에 따른 결과로 에너지저장장치를 활용했을 경우보다 전기차를 이용하는 경우에는 에너지를 멀리 이동 시키지 않아도 되기 때문에 대체적으로 송전선 이용거리가 짧을 수 밖에 없고 이는 송전혼잡 문제를 가중시키지 않는다. 이를 적절히 활용하면 송전혼잡 문제를 해소시킬 수 있으며 송전한계 때문에 어쩔 수 없이 발생하는 재생 에너지의 삭감 또한 방지할 수도 있다 [30].

앞선 설명들을 통하여 전기차를 주파수 예비력으로 활용하는 것보다 증감발 용량으로 활용하는 것이 보다 효율적임을 보였으며 또한 증감발 용량을 확보하는 자원으로써 전기차의 활용이 일반 에너지저장장치를 사용하는 것보다 유리함을 보였다. 따라서 전기차를 증감발 용량으로 충분한 활용이 가능하며 보다 이점이 있음을 알 수 있다.

제 2 절 마르코프 체인(Markov chain)을 이용한 전기차 상태추정

증감발 용량 자원으로 전기차를 활용하기 위해서는 전기차의 위치상태와 연결상태, 충전상태를 예측하는 것이 선행되어야 한다. 이를 이번 절에서 서술한다. 본 논문에서는 전기차의 상태를 확률적으로 산정하고 적용하여 단기 발전계획의 시간단위에 따라 변화하는 전기차의 시간 별 활용가능용량을 계산한다. 단기 발전계획에 적용하기 위한 전기차의 충방전 가능용량의 산출과정은 다음 절에 서술한다. 이와 같은 과정을 거쳐 산출한 전기차의 활용가능용량 범위 내에서 계통으로 방전 가능 용량을 산정할 수 있으며, 계통으로부터 전력을 받아 전기차의 배터리에 충전할 수 있는 용량의 산정이 가능하다. 계통과 전기차 간의 충방전 뿐만 아니라 활용 가능 용량 내에서 증감발 용량 등을 포함한 다양한 상품으로 사용할 수 있기 때문에 전기차의 시간 별 활용 가능 용량을 산출하는 방안이 의미를 가지며 이를 수행하기 위해 선행되어야 하는 전기차의 상태추정 과정을 먼저 보인다. 전기차의 위치상태와 충전상태, 연결상태는 시간의 흐름에 따라 변화한다. 이와 같은 전기차의 상태는 이전의 상태와는 독립적이고 오로지 바로 직전 시간단위의 상태만 영향을 받는 무기억(memoryless) 성질을 보이기 때문에 이를 고려하기 적합한 모델인 마르코프 체인(Markov chain)을 활용하여 전기차의 상태를 추정한다.

전기차가 나타낼 수 있는 상태는 먼저 운행(traveling) 중인 상태와 주차(parked) 중인 상태로 나눌 수 있다. 주차 중인 전기차는 충전 상태에 따라서 부분 충전(partially charged) 상태와 완전 충전(fully charged) 상태로 나뉜다. 모든 상태는 자신의 상태로 다시 되돌아 올 수 있고 또한 각각의 상태는 다른 상태로 천이 할 수 있으며 이는 기준 시간의 간격 마다 천이 확률(transition probability)에 따라 변화한다. 여기서 기준 시간의 간격이란, 단기 발전계획의 시간 단위를 의미한다. 이와 같은 마르코프 체인은 어떠한 계통구성이라도 적절히 변화하여 적용할 수 있는 범용성이 있으며 또한 새로운 전기차의 상태를 자유롭게 추가하여 구성할 수 있는 확장성을 내포한 모델이기 때문에 다양하게 활용할 수 있다. 또한 뛰어난 이용성을 지니고 있다는 점에서 의의가 있다. 전기차가 전력계통에서 존재하는 위치와 계통운영자의 계통 운영적인 판단에 따라 구역(zone)을 세분화할 수도 있고 또한 각 구역내의 노드(node)도 나누어 운영할 수 있다. 이를 나누는 주된 판단은 발전원 및 부하의 분포와 송전선을 기준으로 하며 세분화하여 운영하는 것에 대한 다양한 필요성이 있을 때 분리하여 운영한다. 우리나라의 경우는 단일 계통으로 운영되고 있지만 미국과 같이 큰 계통은 여러 계통으로 적절히 나누고 이를 다시 구역으로 나누어 운영하고 있다. 본 논문에서 궁극적으로 제안하고 적용하는 전기차의 활용 가능 용량 산출을 다양한 계통의 형태에 적용할 수 있도록 가장 기본적인 상태추정 모델부터 단계적으로 서술한다.

4.2.1 단일 구역, 단일 노드

가장 간단한 형태인 단일 구역(zone), 단일 노드(node)를 대상으로 전기차의 상태를 마르코프 체인으로 모델링하는 것을 가장 먼저 서술하며 이는 다음 **그림** 4-2와 나타낼 수 있다. 본격적인 서술에 앞서 다시 한번 강조하면, 구역과 노드의 구분은 계통의 물리적인 크기에서 전적으로 비롯되는 것이 아니라 계통 운영의 판단에서 이루어지며 본 논문은 이를 구분하는 기준을 다루지는 않는다. 다만 다양한 계통에 적용할 수 있는 전기차의 상태추정 모델의 제시를 목표로 한다. 더불어 전기차의 상태 구분은 때에 따라 계통의 구분과 항상 일치하게 운영하지 않더라도 전기차가 가지는 위치적 상태에 따라 적용할 수 있다. 하지만 이것 또한 본 논문에서는 다루지 않으며 계통의 구분과 동일하게 전기차의 위치 상태를 구분하는 것을 중점적으로 서술한다.

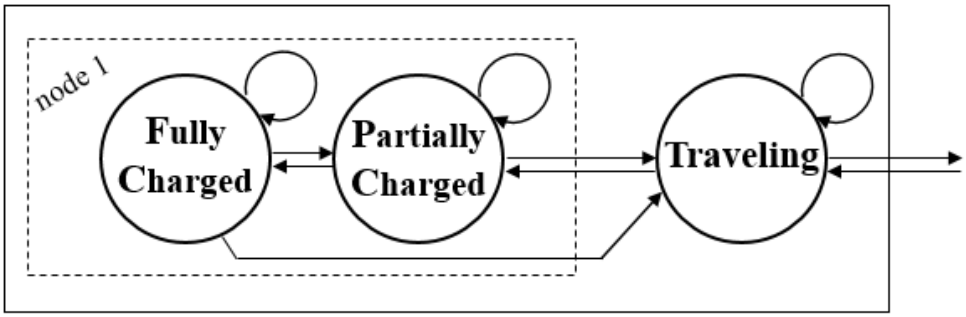


그림 4-2 단일 구역, 단일 노드에서
마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링

위의 **그림 4-2**는 단일 구역 및 단일 노드로 이루어진 계통을 나타낸다. 이 때 전기차는 구역 안을 운행 중인 상태와 완전 충전상태, 부분 충전상태로 이루어지며 이들은 위 그림의 화살표와 같이 상태천이가 발생한다. 또한 구역 내에서 운행 중인 전기차는 다른 계통으로 이동하는 것을 고려하여 마르코프 체인을 구성하였다. 이와 같은 모델에서는 운영하는 계통의 구역을 구분하지 않으므로 구역간을 연결하는 송전선에 전기차의 충방전 전력이 미치는 영향을 고려하지 않는다. 또한 노드도 구분되어 있지 않기 때문에 노드 간의 이동 및 노드 별 송전선에 미치는 영향 등을 고려하지 않는 기본적인 모델이다.

4.2.2 단일 구역, 다중 노드

앞서 서술한 단일 구역, 단일 노드에서 노드의 개수를 증가시킨 다중 단일 구역, 다중 노드 모델에 대하여 서술한다. 이를 도식화하면 아래의 **그림 4-3**과 같다. 이와 같은 모델은 같은 구역 안에 존재하는 다양한 노드를 고려할 수 있다는 점에서 앞선 모델과의 차이점을 가진다. 그림상에는 단일 구역의 2개 노드만을 나타냈지만 같은 구역이라면 노드의 개수를 증가시키더라도 얼마든지 적용 가능하다. 노드간에는 운행 상태를 거쳐 이동이 가능하여 운행 상태에서 다른 계통으로 이동하는 것 또한 표현했다. 같은 구역에서 노드의 구분이 필요한 경우 이와 같은 모델을 활용하여 전기차의 상태추정이 가능하다.

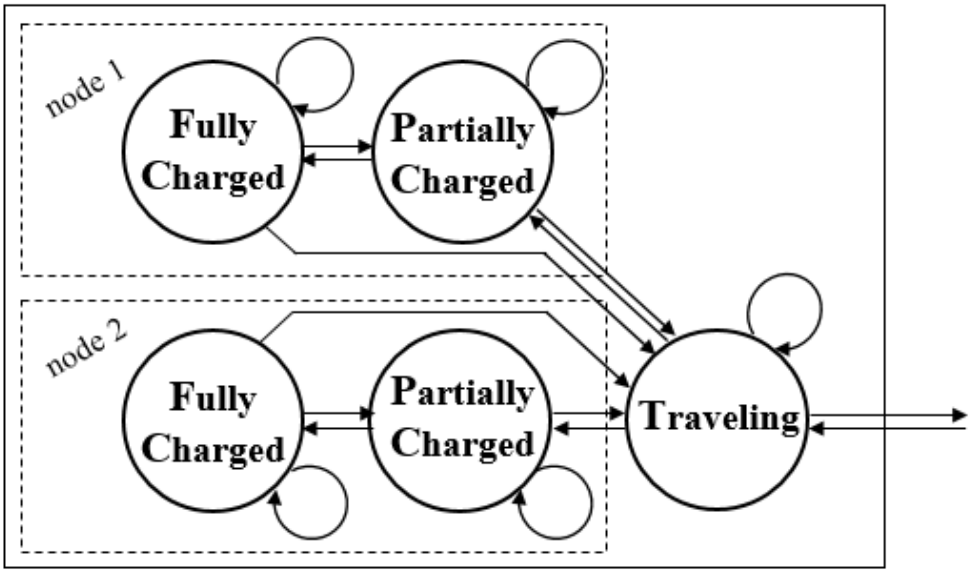


그림 4-3 단일 구역, 다중 노드에서
마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링

4.2.3 다중 구역, 단일 노드

그림 4-4는 계통 내에 구역이 여러 개 존재하지만 각 구역 별 노드는 한 개씩 존재하는 다중 구역, 단일 노드 전기차 상태 모델링을 나타낸다. 앞서의 모델들과는 달리 처음으로 구역간을 연결하는 송전선을 고려할 수 있는 모델이다. 다른 계통으로의 이동은 구역 B(zone B)에서만 이루어진다고 가정하여 진행했다. 이러한 전기차 상태의 모델링은 같은 운행 상태일지라도 구역마다 운행 상태를 달리 나타낼 수 있기 때문에 이를 구분 가능한 모델이다. 운행 상태를 각각의 구역을 구별함으로써 이들을 연결하는 송전선을 고려할 수 있으며 이에 따라 구역을 구분하여 송전한계를 고려하고자 한다면 다음과 같은 모델을 적용해야 한다.

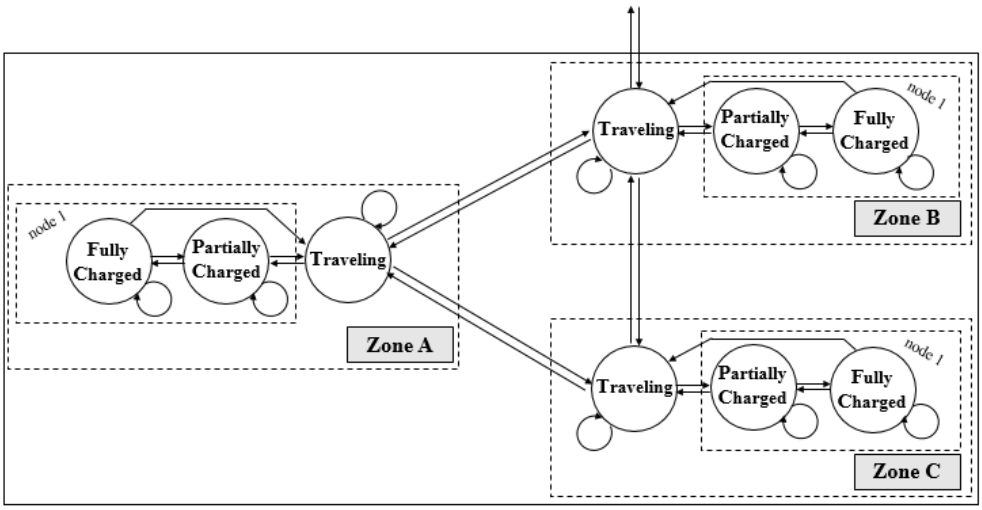


그림 4-4 다중 구역, 단일 노드에서
마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링

4.2.4 다중 구역, 다중 노드

본 논문에서 최종적으로 제시하고자 하는 다중 구역, 다중 노드를 나타내는 전기차 상태의 모델링이다. 이는 **그림 4-5**에 나타냈다. 예제 그림의 각각 3개, 1개, 2개의 노드로 이루어진 3개 구역이 존재하는 임의의 계통에서 전기차가 나타낼 수 있는 모든 상태를 마르코프 체인으로 도식화했다. 이와 같은 다중 구역, 다중 노드를 바탕으로 전기차 각각의 상태에서 다른 상태로의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 운행상태(traveling state)에서 상태 변화를 서술하고, 부분 충전상태(partially charged state)와 완전 충전상태(fully charged state)에 존재하는 모든 상태 변화에 대하여 살펴본다.

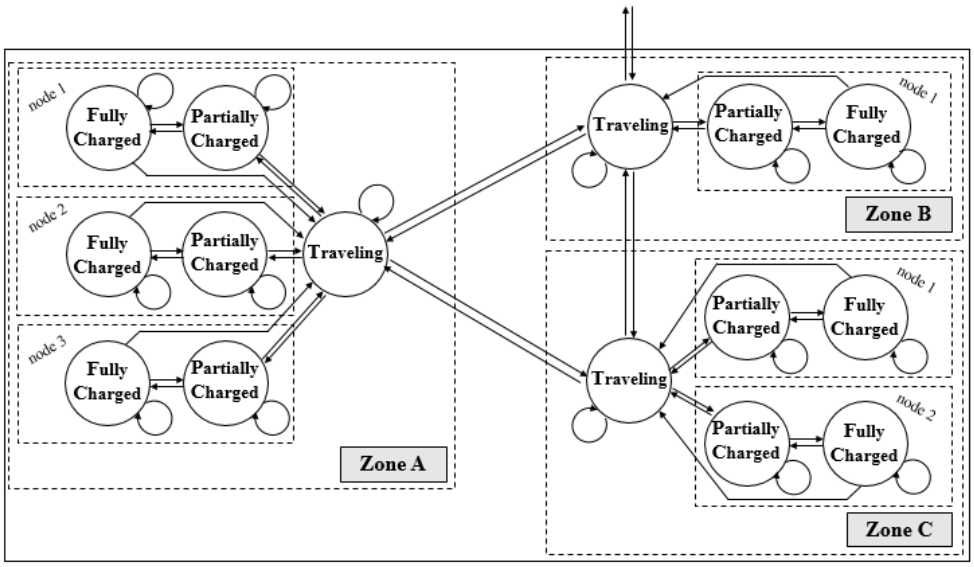


그림 4-5 다중 구역, 다중 노드에서
마르코프 체인을 활용한 전기차 상태 모델링

1. 운행상태로부터 발생하는 전기차 상태 변화

어느 한 구역에서 운행 중인 전기차가 다른 구역으로 이동하여 주차(계통과 연계)하기 위해서는 다른 구역 내의 운행 상태를 거쳐야만 한다. 이동하는 시간을 고려하여 구역 간을 이동할 때는 한 단위 시간 이상이 필요하다고 가정하여 위와 같이 모델링을 진행했다. 예를 들면, 구역 A에서 운행 중 이였던 전기차가 C 구역에 주차하기 위해서는 최소한 1번 이상 C 구역에서 운행하는 상태를 거쳐 C 구역 내의 노드에 주차를 한다. 또한, 같은 구역 내의 노드 사이를 이용할 때에도 해당 노드들이 존재하는 구역의 운행 상태를 통하여야만 한다. 운행 중인 상태에 있던 전기차는 운행 시에 배터리의 전력을 사용했기 때문에 주차를 하더라도 반드시 부분 충전된 상태 일 수밖에 없고 부분 충전상태를 거쳐서 완전 충

전된 상태로 도달할 수 있다. 물론 운행 중인 전기차는 운행 상태에 지속적으로 머무를 수 있다. 따라서 이를 정리하면 다음과 같다.

1-a. 자기상태에 머무는 경우 – 계속 운행

1-b. 다른 구역의 운행상태로 천이하는 경우 – 구역 이동

2. 부분 충전상태로부터 발생하는 전기차의 상태변화

부분 충전상태의 전기차는 세가지 상태로 변화할 수 있다. 첫째, 계통에 부분 충전상태로 머물거나. 둘째, 운행 상태로 상태를 천이하거나. 셋째, 완전 충전으로 상태가 변화할 수 있다. 첫 번째 상황은 부분 충전상태에서 계통에 쓰임을 위해서 전기차의 배터리를 계통으로 방전(에너지로 쓰이거나 증감발 용량으로 활용)한다면 부분 충전상태에 머물게 되고 혹은 배터리를 충전하더라도 완전 충전상태에 도달하지 못하는 경우 또는 충전 및 방전을 모두 행하지 않으면 계속 부분 충전상태에 머무른다. 두 번째 상황은 부분 충전상태였던 전기차가 운행을 하면 발생하게 되고, 마지막 상황은 충전이 완료되어 부분 충전상태에서 완전 충전상태로 변화하는 상황을 나타낸다. 이를 정리하면 다음과 같다.

2-a. 자기상태에 머무르는 경우 – 계속 충전 중 또는 방전 시작

2-b. 운행상태로 천이하는 경우 – 운행 시작

2-c. 완전 충전상태로 천이하는 경우 – 충전 완료

3. 완전 충전상태로부터 발생하는 전기차의 상태변화

완전 충전상태에 있는 전기차는 방전을 한다면 부분 충전상태로 상태천이가 발생하고, 그렇지 않다면 완전 충전상태에 머물거나 운행 상태로 천이할 수 있는 확률이 있다. 이를 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

3-a. 자기상태에 머무르는 경우 – 완충 상태 유지

3-b. 운행상태로 천이하는 경우 – 운행 시작

3-c. 부분 충전상태로 천이하는 경우 – 방전 시작

이와 같이 전기차의 상태를 나누고 이들에서 존재하는 모든 상태변화를 나타내어 마르코프 체인을 도출한다. 각각 상태의 변화는 일정한 확률을 바탕으로 변화한다. 이를 마르코프 체인의 상태천이확률(state transition probability)라고 한다. 여기서 상태천이확률의 적절한 설정을 통하여 각 시간대 전기차의 운행 특성을 반영할 수 있다. 예를 들면 다음과 같다. 전기차의 운행시간을 대표적으로 출퇴근 시간과 보통 시간으로 나눌 수 있다. 출퇴근 시간대라면 운행 중인 전기차가 많은 시간대이기 때문에 계통과 연계하여 활용 가능한 전기차의 대수가 부족한 상황이고, 출퇴근 시간이 아닌 일반적인 보통 시간의 경우는 활용할 수 있는 전기차의 대수가 많은 상황을 의미한다. 이와 같은 상황에서 출퇴근 시간 같은 경우 운행 상태에 존재하는 확률이 크기 때문에 운행 상태로 천이하는 상태천이확률을 크게 설정하고 반대로 보통 시간에는 부분 충전이나 완전 충전상태에 존재하는 확률이 많도록 상태천이확률을 설정하여

시간대에 맞는 전기차의 운행특성을 반영할 수 있다. 이러한 상태천이확률은 기존의 운행 데이터를 바탕으로 설정가능하며 각각의 확률값에 운행특성을 더욱 적절히 반영하는 것은 향후 연구로 남겨둔다.

위와 같은 전기차의 마르코프 체인을 바탕으로 전기차의 시간대 별 사용가능 한 충방전 용량을 산정하는 방법을 3절의 수식 전개과정을 통하여 보인다.

제 3 절 전기차의 충방전 가능 용량 산정

아래의 **그림** 4-6과 같은 순서로 전기차의 충방전 가능 용량을 산정한다.

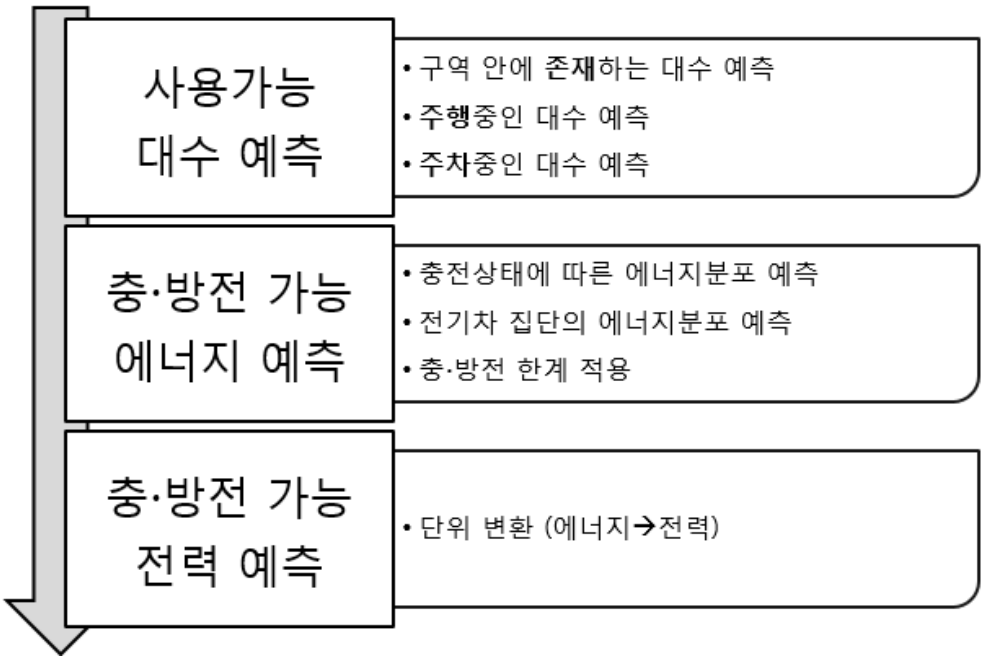


그림 4-6 전기차 충방전 가능 용량 산정과정 흐름도

각 구역에 존재하는 전기차의 대수는 정규분포(normal distribution)를 따른다고 가정하며 [46], 구열 별 전기차 대수의 분포는 다음 **식 (4-1)**과 같다. 이 때에 각 구역의 전기차 대수의 평균값 m_z는 앞서 마르코프 체인을 통하여 산출한 값을 적용한다.

$$E_z \sim N\left(m_z, \sigma_z^2\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{(v-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} \tag{4-1}$$

충분히 많은 수의 자동차가 존재할 때, 도로에 주행중인 자동차 대수의 확률은 푸아송 분포(Poisson distribution)를 따른다고 알려져 있다 [47, 48]. 어떠한 시간대에 평균적으로 존재하는 자동차의 대수가 ρ대일 때, 자동차 k대가 주행 중일 확률은 다음과 같다. 마찬가지로 ρ는 마르코프 체인을 통하여 산출한 값을 적용한다.

$$P_{tr}\left(k\right) = \frac{\rho^k}{k!} e^{-\rho} \tag{4-2}$$

만약, v대의 전기차 존재하고 v대가 충분히 많은 수라고 가정하면 이 전기차들 중에서 j대가 주차 중일 확률은 $v-j$대가 주행 중일 확률

과 같다. 또한 평균적으로 m_z대가 정규분포의 형태로 존재하는 구역 내에서 v대의 자동차가 존재할 확률 식 (4-1)과 식 (4-2)의 확률을 결합하면 결과적으로 전기차 v대 중에서 j대가 주차 중일 확률을 산정할 수 있고 이를 수식화하면 다음 식 (4-3)과 같다.

$$P_{pa}(j) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho^{(v-j)}}{(v-j)!} e^{-\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{(v-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} dv \qquad (4-3)$$

구역 내에 존재하는 전기차 중에서 운행중인 전기차를 제외하고 주차 중인 대수만 계통과 연계되어 있고 따라서 이들만 계통에서 활용 할 수 있기 때문에 주차된 전기차의 대수를 기준으로 시간 별 활용 가능 용량을 계산한다. 엄밀히 말하자면, 주차 된 전기차 중 계통과 연계된 것들만 이용 가능하지만 본 논문에서는 전기차의 활용에 요구되는 기반시설이 충분하다는 가정하에 주차된 전기차는 모두 계통과 연계되어 있다(활용할 수 있다)고 고려하여 연구를 진행했다. 주차된 전기차는 충전상태에 따라 활용 가능 용량이 상이하므로 위의 마르코프 체인 모델에서도 보인 것과 같이 각각의 충전상태를 따로 고려해야 한다. 전기차의 충전상태는 부분 충전상태(pc; partially charged state)와 완전 충전상태(fc; fully charged state)로 나누고, 각 상태에 따른 에너지확률분포는 다음과 같다.

$$E_{pc} \sim N\left(m_{pc}, \sigma_{pc}^2\right) \tag{4-4}$$

$$E_{fc} \sim N\left(m_{fc}, \sigma_{fc}^2\right) \tag{4-5}$$

전기차에 충전된 에너지는 정규분포를 따른다고 가정할 때 [22], 완전 충전상태의 평균값 m_{fc}은 전기차 배터리의 충전가능 최대용량과 같고 완전 충전상태의 표준편차 σ_{fc}는 0에 가깝다. 충전상태가 부분 충전 또는 완전 충전 일 각각의 확률 p_{pc}, p_{fc}과 위의 식 (4-4), (4-5)에 나타낸 전기차의 각 상태 별 에너지확률분포를 결합하여 계통에 연계된 상태(pl; plugged state)의 전기차 에너지 확률분포를 계산할 수 있으며 이는 식 (4-6) ~ (4-8)과 같다. 이와 같은 과정에 필요한 P_{pc}, P_{fc}는 마르코프 체인을 통해 산출한 전기차 대수를 적용하여 연산한다.

$$E_{pl} \sim N\left(m_{pl}, \sigma_{pl}^2\right) \tag{4-6}$$

$$m_{pl} = \frac{P_{pc}}{P_{pc} + P_{fc}} \cdot m_{pc} + \frac{P_{fc}}{P_{pc} + P_{fc}} \cdot m_{fc} \tag{4-7}$$

$$\sigma_{pl}^2 = \left(\frac{P_{pc}}{P_{pc} + P_{fc}}\right)^2 \cdot \sigma_{pc}^2 + \left(\frac{P_{fc}}{P_{pc} + P_{fc}}\right)^2 \cdot \sigma_{fc}^2 \tag{4-8}$$

위와 같은 과정들을 거쳐서 전기차가 계통에 연계된 대수 별 확률을

산정했고 또한 연계된 전기동차의 상태를 부분 충전상태와 완전 충전상태로 나누어 연계된 전기차가 지니고 있는 에너지의 확률분포를 정식화했다. 지금부터는 위의 과정에 산출했던 결과들을 결합하여 계통에 연계된 전기차를 통하여 얻을 수 있는 실제적인 에너지를 확률적으로 예측하는 방법을 보인다. 각각의 전기차를 한 대씩 각기 다르게 활용한다면 계통에 유의미한 영향을 줄 수 있는 용량이 아니기 때문에 같은 구역에 연계된 전기차는 집단(fleet)으로 묶어서 통합하여 활용한다. 먼저, 주차된 전기차 집단이 보유하고 있는 에너지의 누적분포확률함수(c.d.f.; cumulative distribution function)를 계산한다. 이는 전기차 v대 중에서 j대가 주차할 확률과 이 때 전기차의 에너지 확률분포를 결합하여 연산한다.

$$K_E(g) = \left[\begin{array}{l} \int_{-\infty}^{g} \sum_{j=1} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho^{(v-j)}}{(v-j)!} \cdot e^{-\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot e^{-\frac{(v-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} dv \right) \cdot \frac{1}{j\sqrt{2\pi}\sigma_{pl}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{u}{j}-\sigma_{pl}\right)^2}{2\sigma_{pl}^2}} du \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1} \frac{\rho^{(v-j)}}{(v-j)!} \cdot \frac{1}{j2\pi\sigma_z\sigma_{pl}} \cdot e^{-\left(\rho + \frac{(v-m_z)^2}{2\sigma_z^2} + \frac{\left(\frac{u}{j}-\sigma_{pl}\right)^2}{2\sigma_{pl}^2}\right)} dvdu \end{array} \right]$$

(4-9)

위의 식 (4-9)을 통하여 같은 구역에 주차된 전기차 집단의 총 에너

지분포를 산출할 수 있다. 이를 활용하여 총 전기차 v대 중에서 주차중인 j대로 이루어진 전기차 집단에서 충전과 방전을 할 수 있는 각각의 에너지량을 다음과 같이 계산한다.

$$eev^{dis} = K_E^{-1}(\alpha) - \gamma \times C_{total}^{fleet} \times \frac{v-\rho}{v} - q \times \rho \qquad (4-10)$$

$$eev^{cha} = C_{total}^{fleet} - K_E^{-1}(\beta) \qquad (4-11)$$

여기서, 전기차가 계통에 방전할 수 있는 에너지량을 나타낸 위의 식 (4-10)의 첫 번째 항목에서는 계수 α를 통하여 전기차의 집단에서 확보할 수 있는 에너지량의 기대수준을 정한다. $K_E(g) = \alpha$는 전기차 집단이 α확률로 g만큼의 에너지를 확보할 수 있음을 나타낸다. 이를 바꿔 말하면 g보다 큰 에너지 값을 확보할 확률이 $1-\alpha$라는 것을 의미한다. 따라서 α값을 작게 설정할 수록 최소한 확보 할 수 있는 용량에 대한 기대수준이 커지기 때문에 확보가능기대용량 g는 작아진다. 식 (4-10)의 두 번째 항과 세 번째 항을 통하여 전기차에 최소한으로 남아 있어야 하는 에너지량을 고려한다. γ는 방전한계를 나타내고, q는 전기차가 한 간격의 단기 발전계획 시간단위에 필요한 평균에너지를 나타내는 값이다. 전기차의 방전한계의 설정을 통하여 최소한으로 배터리에 잔존해야 하는 에너지의 양을 남겨둔다. 또한 한 단위시간 동안 전기차를 활용하는데 사용되는 에너지량을 설정함에 따라 한 단위의 시간을 운행할 수 있는

에너지 용량만큼은 남겨둘 수 있다. 한편, 전기차의 배터리를 충전으로 활용할 수 있는 에너지량 eev^{cha}는 전기차 집단이 가질 수 있는 총 에너지용량 C_{total}^{fleet}에서 현재 충전되어 있는 에너지를 제외하여 연산한다.

$$pev^{dis} = eev^{dis} / h \tag{4-12}$$

$$pev^{cha} = eev^{cha} / h \tag{4-13}$$

앞서 계산한, 전기차 집단으로부터 충방전 가능한 에너지를 기준시간 단위 h로 나누어 에너지(energy)의 값을 출력전력(power) 값으로 변환한다. 여기에 전기차의 충방전 최대 증감발 능력($r^{dis,max}$, $r^{cha,max}$)을 적용하여 해당시간에 실제로 사용할 수 있는 전기차의 전력을 다음과 같이 산정한다.

$$Limit^{dis} = r^{dis,\max} \times n_d \tag{4-14}$$

$$Limit^{cha} = r^{cha,\max} \times n_c \times \frac{P_{pc}}{P_{pc} + P_{fc}} \tag{4-15}$$

여기서, $P_{pa}(n_d) \le \alpha$, $P_{Pa}(n_c) \ge \beta$

보통의 경우 전기차의 충방전시 최대 증감발 능력($r^{dis,max}$, $r^{cha,max}$)은 계통과 전기차를 연결하는 충방전 기기의 최대값으로 결정된다.

$$pev^{dis,\max} = \min\left(pev^{dis}, Limit^{dis}\right) \tag{4-16}$$

$$pev^{cha,\max} = \min\left(pev^{cha}, Limit^{cha}\right) \tag{4-17}$$

위의 최종적인 식 (4-16), (4-17)을 통하여 전기차가 계통에 방전을 통하여 기여할 수 있는 에너지 제공과 증감발 용량 자원으로써의 활용가능 용량과 계통으로부터 전력을 받아와서 충전할 수 있는 용량을 산출할 수 있다.

제 5 장 전기차 증감발 용량을 고려한 송전제약 단기 발전계획 정식화

본 논문에서 제시한 방법론을 수식으로 전개했다. 이후의 사례연구를 진행하는 전력시장의 구조는 수직적 통합구조를 가정했으며 이와 같은 환경에서는 계통운영자가 계통상황을 유지 시키기 위하여 각 발전기와 전기차에 급전을 지시하여 에너지를 확보하고 예비력 및 증감발 용량 또한 발전기와 전기차를 통하여 확보한다. 이러한 상황하에서 단기간 발전계획인 실시간 경제급전을 수행한다. 또한 증감발 용량 자원의 활용 효과에 집중하기 위하여 예비력 상품은 제외하고 정식화를 전개했으며 다음 장의 사례 연구 또한 예비력 상품을 제외하고 진행했다. 예비력 상품을 포함한 단기 발전계획에 관련한 수식은 부록에 첨부했다.

단기 발전계획의 목적함수는 계통운영비용의 최소화이다. 이 때, 제약조건은 계통의 수급균형 유지, 발전기와 전기차의 출력 제약, 증감발 용량 필요량과 송전제약으로 구성되며 또한 부하차단이 포함된다. 이들의 총합이 최소가 될 수 있는 각 발전기의 발전용량과 증감발 용량의 시간 별 참여용량을 산정하고 전기차의 충방전 용량, 증감발 용량 또한 산출하며 이들을 하나씩 살펴보도록 한다.

제 1 절 목적함수

일반 발전기의 발전비용과 증감발 용량을 구성하는 증발 용량(FRU; flexible ramping up)과 감발 용량(FRD; flexible ramping down)에 소요되는 비용, 전기차의 충방전 및 증감발 용량 자원 활용에 따른 비용 및 부하차단 비용 등 계통운영에 필요한 모든 비용의 총합이 최소화 되도록 목적함수를 설정한다. 전기차의 유효한 용량 확보를 위하여 집단(fleet) 단위로 전기차를 모집하여 운영한다. 또한 각각의 단기 발전계획의 시간 간격 내의 운영비용만을 최소화 하는 것이 아니라, 대상으로 하는 모든 시간대의 계통 운영비용 총합의 최소화를 목표로 한다.

$$Min\sum_{t=t_0}^{t_s}(CG_t + CEV_t + CLS_t) \tag{5-1}$$

$$CG_t = \sum_{i\in I}\left[C_i^{energy}\left(p_{i,t}\right) + C_i^{FRU}\left(FRU_{i,t}\right) + C_i^{FRD}\left(FRD_{i,t}\right)\right] \tag{5-2}$$

$$CEV_t = \sum_{x\in X}\begin{bmatrix} C_x^{dis}\left(pev_{x,t}^{dis}\right) - C_x^{cha}\left(pev_{x,t}^{cha}\right) \\ +C_x^{EVRU}\left(EVRU_{x,t}\right) + C_x^{EVRD}\left(EVRD_{x,t}\right)\end{bmatrix} \tag{5-3}$$

$$CLS_t = VOLL \times \sum_{n\in N} LS_{n,t} \tag{5-4}$$

여기서, 식 (5-2)은 일반 발전기의 운영비용을 뜻한다. 발전기가 제공하는 에너지, 증감발 용량과 이에 해당하는 가격을 곱하여 해당 시간 일반 발전기의 총 운영비용을 산정한다. 식 (5-3)는 전기차가 제공하는 에너지와 증감발 용량에 관련한 비용의 총합을 의미한다. 식 (5-4)는 부하차단 비용을 뜻한다. 부하차단 비용은 공급지장비용(VOLL; value of lost load)에 부하 차단량을 곱하여 산정한다. 일반적으로 공급지장비용은 발전기의 발전비용보다 훨씬 크기 때문에 계통 운영비용의 최소화를 위해서는 부하의 차단이 최대한 적게 발생해야 한다. 따라서 운영비용이 최소화 되도록 계통을 운영하는 것은 발전비용의 최소화는 물론이고 계통의 안정적인 운영 또한 담보한다.

제 2 절 제약조건

전력계통의 안정적인 운영을 위해서는 아래의 다양한 제약조건을 만족해야 한다. 기본적으로 모든 시간 동안, 순부하와 다양한 전기 수요를 충족하도록 각 발전기의 발전량을 할당한다. 여기서 전기차 집단은 배터리에 충전되어있는 에너지를 계통에 제공하여 전기 공급을 늘리는데 기여하거나 배터리를 충전하여 계통의 수요를 증대시키는 역할을 할 수 있다. 계통운영의 가장 기본적인 조건인 모든 시간대에서 수요를 만족하는 발전을 의미하는 수식은 다음 식 (5-5)와 같다.

$$\forall t : \sum_{i \in I} p_{i,t} + \sum_{x \in X} pev_{x,t}^{dis} = \sum_{n \in N} nl_{n,t} + \sum_{x \in X} pev_{x,t}^{cha} - LS_t \qquad (5-5)$$

위의 식에서 nl은 순부하(net load)를 의미하고 이는 일반수요에서 재생 에너지의 발전량을 제외한 수치를 의미한다. 계통에 전력을 공급하는 역할을 하는 발전기의 출력과 전기차에서 방전(계통으로 출력)하는 전력량은 순부하와 전기차가 충전하는 전력량에 부하의 차단량을 제외한 값과 같아야 한다. 이러한 값들이 모든 시간대에서 연속적으로 균형을 이뤄야만 전력공급의 차질 없이 안정적으로 또는 낭비되는 발전량 없이 경제적으로 계통이 운영된다.

5.2.1 발전기 제약조건

제어가 가능한 자원들의 출력 및 특성 한계를 나타냈다. 일반 발전기는 해당시간 동안 발전할 수 있는 최소 발전량과 최대 발전량 제약이 있으며, 각각의 발전기 마다 증감발 능력의 물리적인 한계가 존재한다.

$$\forall t, \forall i : p_{i,t}^{\min} \le p_{i,t} \le p_{i,t}^{\max} \qquad (5-6)$$

$$\forall t, \forall i : p_{i,t} + FRU_{i,t} \le p_i^{\max} \qquad (5-7)$$

$$\forall t, \forall i : p_{i,t} - FRD_{i,t} \ge p_{i,t}^{\min} \qquad (5-8)$$

$$\forall t, \forall i : 0 \le FRU_{i,t} \le RC_i \times \Delta t \qquad (5-9)$$

$$\forall t, \forall i : 0 \le FRD_{i,t} \le RC_i \times \Delta t \qquad (5-10)$$

$$\forall t, \forall i : -RC_i \times \Delta t \le p_{i,t} - p_{i,t-1} \le RC_i \times \Delta t \qquad (5-11)$$

5.2.2 전기차 제약조건

전기차는 해당시간에 전기차의 배터리에 충전되어 있는 용량만큼 계통에 제공할 수 있다. 반면, 배터리 용량의 한계 때문에 전체 용량에서 배터리 잔량을 제외한 만큼만 충전할 수 있다. 배터리 자체의 증감발 능력은 무한대에 가깝지만, 전기차는 전기차와 계통을 연결하는 충전소 또는 충전기의 충방전 능력에 따라 증감발 능력이 제한된다. 또한 충전과 방전 시 발생하는 손실을 고려하기 위해 계수 (η^-, η^+)를 적용하고 특정 시간에 유지시켜야 할 배터리 에너지의 수준(ε_{req})을 정한다.

$$\forall t, \forall x : 0 \le pev_{x,t}^{dis} \le pev_{x,t}^{dis,\max} \qquad (5-12)$$

$$\forall t, \forall x : 0 \le pev_{x,t}^{cha} \le pev_{x,t}^{cha,\max} \qquad (5-13)$$

$$\forall t, \forall x : pev_{x,t}^{dis} - pev_{x,t}^{cha} + EVRU_{x,t} \le pev_{x,t}^{dis,\max} \qquad (5-14)$$

$$\forall t, \forall x : pev_{x,t}^{dis} - pev_{x,t}^{cha} - EVRD_{x,t} \ge -pev_{x,t}^{cha,\max} \qquad (5-15)$$

$$\forall x : eev_{x,t-1} - eev_{x,t} = \left(\frac{1}{\eta^{+}} pev_{x,t}^{dis} - \eta^{-} pev_{x,t}^{cha} \right) \times \Delta t \qquad (5-16)$$

$$\forall x : eev_{x,t} \mid_{t=t_s} \geq C_{x,total}^{fleet} \cdot \varepsilon_{req} \qquad (5-17)$$

5.2.3 증감발 용량 제약조건

각 구역에 존재하는 발전기와 전기차는 구역 별로 증감발 용량의 요구량을 각각 만족해야 한다. 또한 이와 같이 각각의 구역 별 발전기와 전기차 요구량의 총합은 최종적으로 계통 전체 증감발 용량 필요량을 충족해야 한다.

- 계통 증감발 용량 필요량

$$\forall t : \sum_{z \in Z} r_{z,t}^{RU} \geq R_{system,t}^{RU} \qquad (5-18)$$

$$\forall t : \sum_{z \in Z} r_{z,t}^{RD} \geq R_{system,t}^{RD} \qquad (5-19)$$

- 구역 별 증감발 용량 필요량

$$\forall t, \forall z : \sum_{i \in I,z} FRU_{i,t} + \sum_{x \in X,z} EVRU_{x,t} \geq r_{z,t}^{RU} \qquad (5-20)$$

$$\forall t, \forall z : \sum_{i \in I,z} FRD_{i,t} + \sum_{x \in X,z} EVRD_{x,t} \geq r_{z,t}^{RD} \qquad (5-21)$$

5.2.4 송전한계 제약조건

송전선에 미치는 모든 요소들의 영향을 고려하여 송전제약을 초과하지 않도록 급전한다. 재생 에너지를 포함한 모든 발전기의 발전력과 전기차의 충전량 및 방전량 그리고 일반 전기수요가 송전선에 흐르는 전력량을 결정짓는다. 이러한 요소들이 각각의 송전선 l에 미치는 영향은 노드 별 감도(sensitivity) $H_{l,n,t}$를 통하여 산정할 수 있다. 반면, 구역 별로 확보한 증감발 용량이 송전선에 미치는 영향은 통합 감도(aggregated sensitivity) $H_{l,z,t}^{FRU/FRD/EVRU/EVRD}$를 통하여 산정하며 이들의 합이 송전제약 용량 $F_{i,t}^{N,max}$를 초과하지 않도록 운영한다. 해당 시간대에 활용될 것이 예정되어있는 발전력과 수요, 재생 에너지의 발전량 그리고 전기차의 충전과 방전은 각 요소들이 위치한 노드에 따라 송전선에 미치는 영향이 상이하기 때문에 노드 별로 상이한 감도(sensitivity)를 활용한다. 하지만 발전기에 할당된 증발용량과 감발용량 및 전기차가 증감발 용량을 제공하는 EVRU와 EVRD는 증감발 용량이 부족한 시점에서만 쓰이는 비정기적인 특성을 가지고 있고 구역 별 필요량을 만족하도록 운영한다. 따라서 이와 같은 증감발 용량 자원이 송전선에 미치는 영향을 평가할 때에는 구별 별로 산정한 통합 감도(aggregated sensitivity)를 활용한다.

감도와 통합감도를 이용하여 각 요소들이 송전선에 미치는 영향을 계산하고 이들의 합은 송전용량을 초과하지 못하도록 제약조건을 설정하는 위와 같은 사항을 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$\forall t, \forall l : F_l\left(\mathbf{P_t}, \mathbf{RP_t}, \mathbf{EV_t}, \mathbf{D_t}\right) = \begin{bmatrix} \sum_{i \in I, n} \left\{ p_{i,t} \cdot H_{l,n,t} \right\} + \sum_{i \in I, n} \left\{ rp_{i,t} \cdot H_{l,n,t} \right\} \\ + \sum_{x \in X, n} \left\{ \left(pev_{x,t}^{dis} - pev_{x,t}^{cha} \right) \cdot H_{l,n,t} \right\} \\ - \sum_{n \in N} \left\{ d_{n,t} \cdot H_{l,n,t} \right\} \end{bmatrix}$$

(5−22)

$$\forall t, \forall l : \begin{bmatrix} F_{l,t}\left(\mathbf{P_t}, \mathbf{RP_t}, \mathbf{EV_t}, \mathbf{D_t}\right) \\ + \sum_{i \in I, z} \left\{ FRU_{i,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRU} \right\} - \sum_{i \in I, z} \left\{ FRD_{i,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRD} \right\} \\ + \sum_{x \in X, z} \left\{ EVRU_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRU} \right\} - \sum_{x \in X, z} \left\{ EVRD_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRD} \right\} \end{bmatrix} \le F_{l,t}^{limit}$$

(5−23)

제 6 장 사례연구

본 논문에서 제안하는 방법을 사례연구를 통하여 검증한다. 1절에서는 안정적인 계통의 운영을 위하여 확보해야 하는 증감발 의무용량의 산정 방법을 비교한다. 단일 단위 급전에서 개선시킨 다중 단위 시결합 급전을 통하여 사례연구를 진행하며, 증감발 의무용량의 산정 시 매시간 같은 값으로 불확실성을 산정하던 방법과 부하와 재생 에너지 출력의 예측오차를 활용하여 제안한 방법을 비교 분석한다. 2절은 사례연구에서 제시한 임의의 계통에서 전기차를 통해 확보할 수 있는 용량의 산정 결과를 보인다. 전기차의 활용성이 높은 시간대와 상대적으로 활용성이 떨어지는 출퇴근 시간을 비교하여 시간대 별로 변화할 수 있는 전기차의 활용용량 산출 결과를 제시한다. 이와 같은 전기차를 포함하여 단기발전계획을 수립한 결과를 3절에서 보인다. 3절에서는 송전제약의 유무에 따른 발전계획의 변화와 재생 발전원의 변동성의 증가에 따른 변화를 보여주며 전기차의 보급률의 증가에 따른 급전 수행 결과를 제시한다. 단기발전계획은 매 5분마다 시행하며 총 네 개의 시간단위 즉, 20분간의 단기발전계획을 수립한다. 필요 증감발 용량은 급전시간대의 순부하와 그로부터 10분 후의 예측 순부하를 바탕으로 산정한다. 증감발 의무용량의 상방 불확실성과 하방 불확실성은 같다고 가정하며 더불어 전기차의 증

감발 용량 참여에 따른 결과를 집중적으로 분석하기 위하여 예비력은 제외하고 사례연구를 진행했다. 또한 전기차의 증감발 용량 사용부분은 감발 용량은 제외하고 부족 시 계통에 더 큰 영향을 미치는 증발 용량으로만 활용한다고 가정했다. 사례연구를 진행한 대상계통은 다음 **그림 6-1**과 같다.

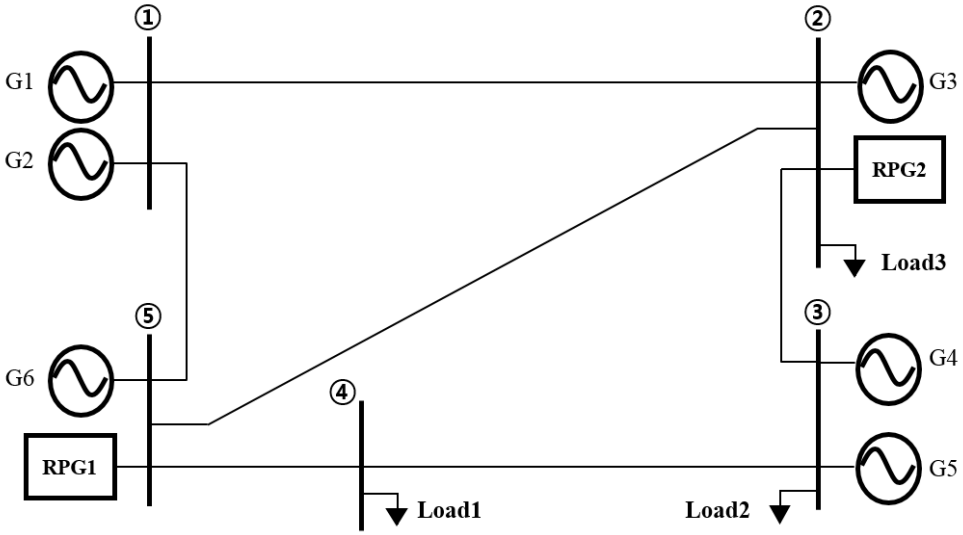


그림 6-1 수정된 PJM 5-모선 계통도

사례연구의 대상계통은 수정된 PJM 5-모선이다. 이는 본 논문에서 참고로 하는 선행연구 [31]의 사례연구를 진행한 계통이며 다양한 문헌에서 위와 계통을 대상으로 연구가 선행되었다. 본 연구에 맞도록 수용할만한 범위 내에서 계통을 수정했으며 이를 바탕으로 사례연구를 진행했다. 이 계통은 일반적인 발전기 6대와 재생 발전기(RPG; renewable

power generator) 2대로 구성되어 있다. 또한 부하는 세 곳에 분포하고 있다. 본 사례연구에 포함된 일반 발전기의 특성은 다음 **표** 6-1과 같다.

표 6-1 발전기 특성

Generator	Min (MW)	Max (MW)	Ramp rate (MW/min)	Offer price ($/MWh)	Initial output (MW)
G1	0	80	4	10	50
G2	0	80	4	10.1	25
G3	0	60	1	8	60
G4	0	160	1	25	160
G5	0	160	1	30	50
G6	0	100	1	15	100

1번 모선에 연결된 발전기 G1과 G2에서 출력 가능한 용량은 발전기 G4, G5, G6에 비하여 적지만 발전기의 증감발 능력이 다른 발전기에 비하여 우수하다. 또한 발전단가가 비교적 저렴하기 때문에 출력의 변화가 요구되는 상황에 우선적으로 급전된다. G3은 계통에 연결되어 있는 발전기 중에 가장 발전단가가 저렴하다. 하지만 발전기의 한계 출력까지 출력을 하고 있으므로 더 이상 출력을 늘릴 수는 없다. G4, G5와 G6는 용량이 큰 반면 증감발 능력이 우수하지 않다. 또한 발전단가 또한 상대적으로 비싸기 때문에 급전 순위는 뒤에 위치한다.

대상계통에 포함된 재생 발전원 두 개의 설비 용량은 각각 100MW이다. 시간 별로 계통 부하와 이들 재생 발전원의 측정값 및 해당 시간에 예측한 값을 다음 **표** 6-2에 나타냈다.

표 6-2 시간별 순부하의 측정값 및 예측값

		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
T1	Load	498	504	513	501	507	510			
	Renewable	68	70	74	72	68	64			
	Net load	430	434	439	429	439	446			
T2	Load		506	512	503	510	510	512		
	Renewable		68	72	72	69	64	67		
	Net load		438	440	431	441	446	445		
T3	Load			513	504	509	510	513	520	
	Renewable			73	72	70	68	70	74	
	Net load			440	432	439	442	443	446	
T4	Load				504.5	510	515	516	517	525
	Renewable				72	70	68	73	78	84
	Net load				432.5	440	447	443	439	441

제 1 절 개선된 방안을 활용한 증감발 용량 산정

불확실성을 매시간 일정하게 설정하여 활용하는 기존의 방법과 본 논문에서 제안하는 부하와 재생 에너지 출력 예측의 오차를 바탕으로 불확실성을 산정하는 방안을 비교한다. 기존의 방법은 불확실성을 12MW로 동일하게 설정했다. 반면 제안하는 방법에서는 부하에 곱해지는 계수 $\delta = 0.002$로 설정 했으며 재생 발전원의 설비용량에 곱해지는 계수 $\omega_1 = 0.002$, 출력량에 곱하는 계수 $\omega_2 = 0.04$로 설정했다. 또한 예측오차의 분포에서 신뢰도 99%를 만족하는 값을 해당 예측시간의 불확실성으로 정한다. 이러한 계수를 바탕으로 시간 별 부하와 재생 발전원 출력 변화에 따른 불확실성의 산출 결과를 아래의 그림 6-2에서 보인다.

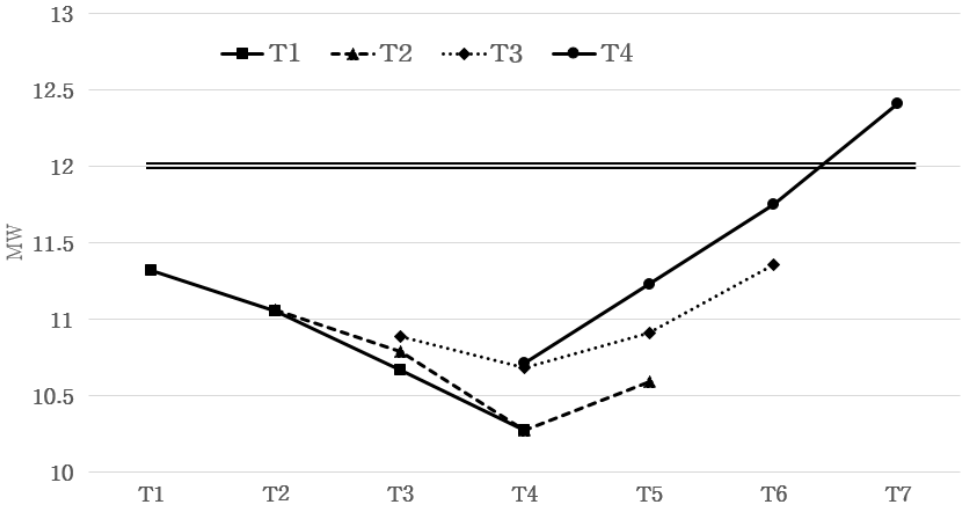


그림 6-2 예측오차를 고려한 시간 별 불확실성

위의 결과를 살펴보면 동일 불확실성 12 MW는 겹선으로 표현했다. 예측의 불확실성을 고려하여 불확실성을 산출할 때 재생 에너지의 설비 용량은 변화하지 않지만 시간에 따라 부하와 재생 에너지의 발전량이 변화하므로 이에 따라 불확실성의 산출 결과도 변화했다. 총 20분동안 5분 간격의 급전을 수행 했으며 네 개 시간단위를 시결합 다중 단위 급전을 한 결과이다. 각 시간에 필요로 하는 증감발 용량을 확보하는데 있어서 요구되는 불확실성 값을 위의 그림과 같이 표현했다. 이를 비교해보면 T4에서 예측한 T7의 불확실성을 제외한 대부분의 시간에서는 고정 불확실성을 사용한 결과보다 개선된 방법을 활용하여 측정한 불확실성의 값이 작게 나타났다. 이와 같은 결과를 포함하여 시간 별 증감발 의무용량을 산정한 값은 다음 **표 6-3, 6-4**와 같다. 여기서 (a)는 고정 불확실성을 활용한 기존의 방법을 의미하고 (b)는 본 논문에서 제안한 방안을 활용한 결과이다.

표 6-3 증발 의무용량

	Up Ramp	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
T1	(a)	21	7	12	29			
	(b)	20.32	6.05	10.67	27.27			
T2	(a)		5	13	27	16		
	(b)		4.06	11.78	25.27	14.59		
T3	(a)			11	22	16	16	
	(b)			9.88	20.68	14.90	15.35	
T4	(a)				26.5	15	4	10
	(b)				25.21	14.23	3.75	10.41

표 6-4 감발 의무용량

	Down Ramp	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
T1	(a)	3	17	12	0			
	(b)	2.32	16.05	10.67	0			
T2	(a)		19	11	0	8		
	(b)		18.06	9.78	0	6.59		
T3	(a)			13	2	8	8	
	(b)			11.88	0.68	6.9	7.35	
T4	(a)				0	9	20	14
	(b)				0	8.23	19.75	14.41

위의 표와 같이 산정한 증감발 필요용량을 바탕으로 대상계통에 대하여 단기발전계획을 수행했을 때 (a)와 (b)를 적용하여 얻어진 결과의 차이는 다음 표 6-5와 같다. (a)를 기준으로 (b)에 변화한 발전량을 나타냈다.

표 6-5 증감발 의무용량 산정 방식에 따른 발전력 변화

	Up Ramp	Down Ramp
T1	G1 0.68 MW 감소 G2 3.06 MW 감소	G1 1.33 MW 감소
T2	G2 2.63 MW 감소	G1 1.41 MW 감소
T3	G2 3.07 MW 감소	G1 1.75 MW 감소
T4	G1 1.29 MW 감소 G2 0.61 MW 감소	G1 0.16 MW 증가

예측오차를 고려하여 불확실성을 산출했을 때 발전원의 출력이 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. (a)에서, T1부터 T4까지의 시결합 다중단위 급전의 운영비용의 합은 약 $40,833 이다. (b)를 활용함으로써 줄어든 발전량을 발전비용으로 환산하면 약 $53 정도 되며 이는 1.3%의 운영비용 절감의 효과이다. 더불어 (a)와 (b)의 두 경우 모두에서 부하차단은 발생하지 않았다. 따라서 개선시킨 증감발 용량의 확보 모델을 활용하면 부하의 차단을 발생시키지 않으면서도 계통 운영비용을 절감할 수 있는 효과를 얻을 수 있기 때문에 새롭게 제안한 방안이 기존 방안보다 더욱 효율적이다.

제 2 절 전기차의 충방전 가능 용량 산정

이번 절에서는 전기차의 충방전 가능 용량을 산정하는 것을 대상 계통을 통하여 보인다. 본 논문에서 궁극적으로 보이고자 하는 전기차를 증감발 용량 자원으로 활용한 단기 발전계획으로 도달하기 위하여 먼저 해당 시간마다 전기차의 대수를 앞서 설명한 확률적인 방법으로 예측하고 이를 통해 확보할 수 있는 용량을 산정한다.

사례연구의 대상 계통에서 부하가 위치한 모선에 전기차도 위치한다고 가정하며 구역(zone) A와 구역 B로 나누어 산정한다. 이는 이후 절에서 수행하는 송전한계를 고려하기 위함이다. 아래의 **그림 6-3**은 전기차가 포함된 계통도를 보인다.

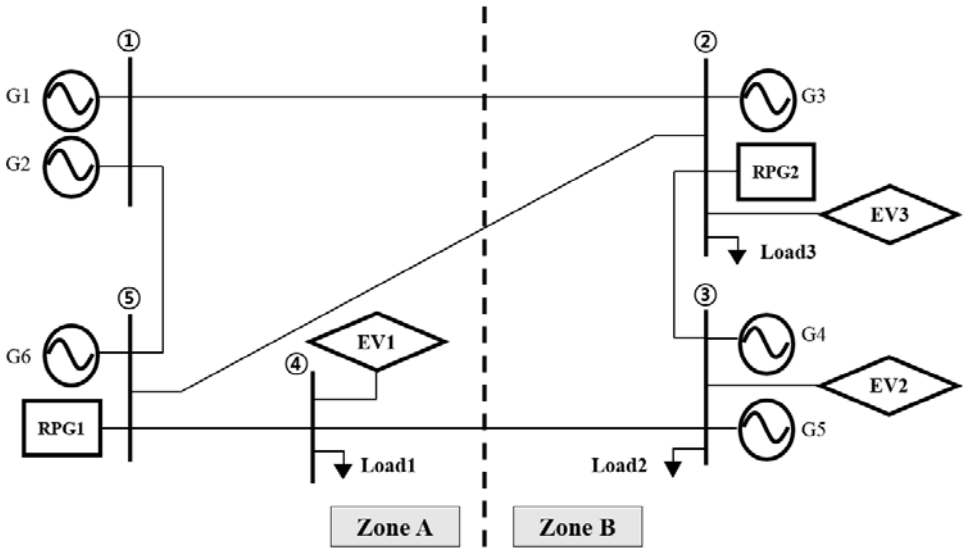


그림 6-3 전기차를 포함한 수정된 PJM 5-모선 계통도

앞서 보인 그림 6-1의 수정된 PJM 5-모선 계통에 전기차를 추가한 계통도이다. 전기차는 기존의 부하가 위치한 모선에 같이 위치한다고 가정했다. 더불어 전기차는 집단(fleet)단위로 묶어서 이에 따른 출력값 등을 산정한다. 전기차는 구역 A에 한 개의 집단이 있으며 구역 B에 두 개의 집단이 존재하며 이들은 서로 이동이 가능하다. 전기차의 상태에 따라 배터리에서 활용할 수 있는 에너지가 다르므로 앞서 서술한 방법과 같이 전기차의 상태를 나누어 마르코프 체인으로 모델링한다. 위와 같은 계통도에서 전기차의 위치를 바탕으로 이들이 취할 수 있는 상태를 마르코프 체인으로 모델링하면 다음 그림 6-4과 같다.

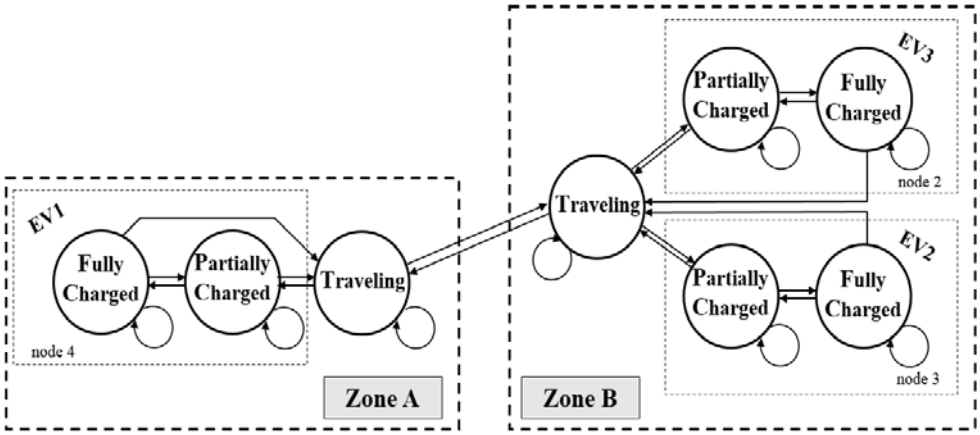


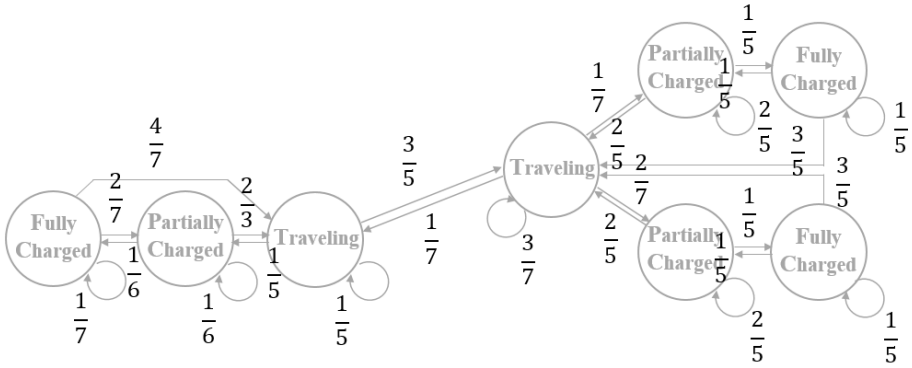
그림 6-4 사례연구 대상 계통의 전기차 마르코프 체인 모델

전기차가 나타낼 수 있는 모든 상태와 이를 간의 천이 관계를 나타냈다. 각각의 구역에는 운행 상태를 나타내는 Traveling state가 한 개씩 존재하도록 모델링을 했다. 같은 구역이라면 지리적으로도 근접하기 때문에 구역 B에 위치한 EV fleet2나 EV fleet3는 구역 안에서 운행하는 경우는 같은 운행 상태로 가정한다. 따라서 전기차가 이동하는 예를 들면, 노드 3에서 출발하는 EV fleet2의 전기차가 같은 구역 안의 노드 2로 가려면 운행 상태를 최소 한번만 거치면 되지만, 다른 구역에 있는 노드 4로 이동하려면 최소 두 번 이상의 운행 상태를 거쳐야만 도달할 수 있도록 모델링했다.

개별 전기차의 배터리 용량은 25 kWh로 가정했다. 또한 전기차의 총 대수는 1500대로 예측했으며 전기차가 위치하는 노드에 각각 균일하게 500대씩 분포한다고 가정했다. 여기서 전기차 대수의 예측은 전기차의 보급률이 1%일 때의 예측값을 나타낸다. 기존에 실제로 존재하는 계

통의 총 발전설비 대비 전기차 예상대수를 사례연구에 비례하도록 적용시켜 사례연구 대상 계통의 전기차 대수를 예측한다. 전기차의 상태는 단기 발전계획의 시간단위마다, 상태간의 상태천이 확률(transition probability)에 따라 변화한다고 가정하여 시간의 흐름에 따른 전기차 상태의 변화를 살펴본다. 아래의 그림들은 주어진 상태천이 확률에서 시간의 흐름에 따라 각각의 상태에 존재하는 전기차의 대수를 나타낸다. 이는 운행 중인 자동차가 많은 시간대인 출퇴근 시간대(c)와 주차 중인 자동차가 많은 보통 시간대(d)로 나누어 살펴봤다. 시간대 (c)와 (d)에 따라 총 전기차의 대수는 동일하게 설정했지만 시간에 따른 자동차의 운행특성을 고려하여 각각의 상태에 존재하는 전기차의 대수를 다르게 적용했으며 상태천이 확률 또한 상이하게 설정했다. 출퇴근 시간대(c)에는 운행 중인 전기차가 다수 존재하므로 운행상태에 전기차가 많이 존재하도록 초기값을 설정했으며 또한 운행상태로 천이하는 확률을 상대적으로 더 높게 설정했다. 반면, 보통 시간대(d)에는 주차 중인 자동차의 대수가 많으므로 이를 반영하여 초기값을 설정했고 상태천이 확률도 이를 반영했다. 아래의 **그림 6-5, 6-6**는 이를 반영한 상태천이 확률과 시간에 따른 자동차 대수의 변화를 나타낸다.

본 논문에서는 계통과 전기차간의 연결하는 설비가 충분하다고 가정했기 때문에 주차중인 자동차는 모두 계통에 접속(plugged)되어 있다.

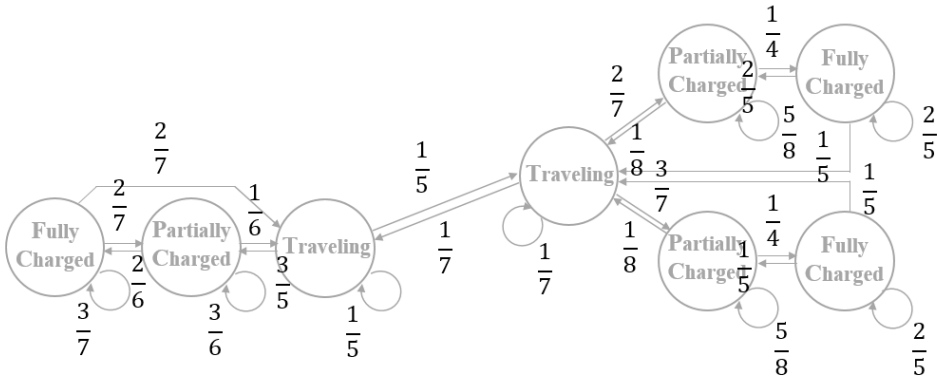


T1	50	150	300
T2	32	99	281
T3	21	82	228
T4	17	65	203

650
613
635
642

120	30
147	30
152	35
159	38
160	40
258	40
286	60
308	69

그림 6-5 상태천이확률과 시간 별 전기차 대수 – 출퇴근 시간(c)



T1	50	400	50
T2	155	244	105
T3	148	229	126
T4	140	232	129

100
143
166
172

470	30
334	130
302	136
291	130
350	50
282	108
281	114
292	116

그림 6-6 상태천이확률과 시간 별 전기차 대수 – 보통 시간(d)

출퇴근 시간(c) 사례의 경우는 운행중인 전기차의 대수가 주차 중인 대수보다 꾸준히 더 많게 유지되었으며 보통 시간(d)에는 운행중인 전기차 보다 주차하여 계통과 연결된 전기차가 훨씬 많음을 알 수 있다.

본 논문에서는 전기차를 충분히 활용할 수 있고 일반적인 전기차의 형태를 보이는 보통 시간(d)을 대상으로 사례연구를 더욱 확장한다. 사례연구는 해당 시간대의 전기차의 상태와 대수 결과를 적용하여 이들에서부터 확보할 수 있는 용량을 산정을 한다. 계통 운영자가 활용할 수 있는 전기차의 상태는 계통과 연결되어 있는 경우이다. 계통과 연결되어 있는 상태는 완전 충전상태(fully charged state), 부분 충전상태(partially charged state)이며 이러한 상태일 때 전기차는 충전과 방전 및 증발 용량 자원으로 활용이 가능하다. 출퇴근 시간(c)과 보통 시간(d)의 상태천이 확률을 활용하여 산정한 전기차 각각의 위치 별 대수를 나타내면 다음 **그림 6-7, 그림 6-8**과 같다.

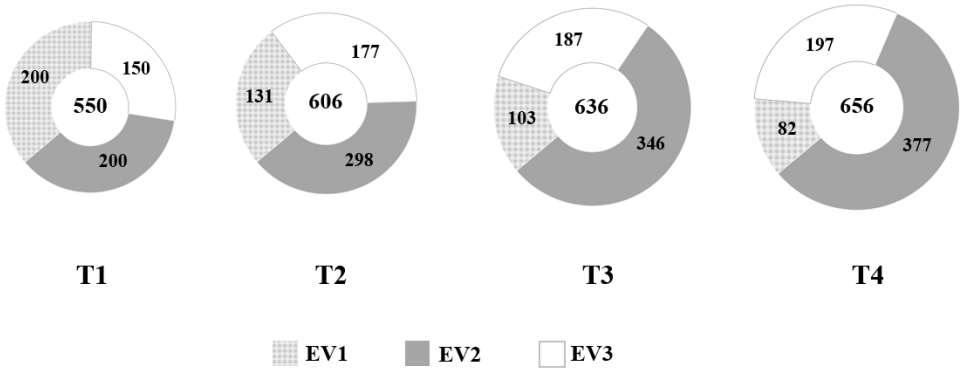


그림 6-7 시간 별 활용가능 전기차 대수 – 출퇴근 시간(c)

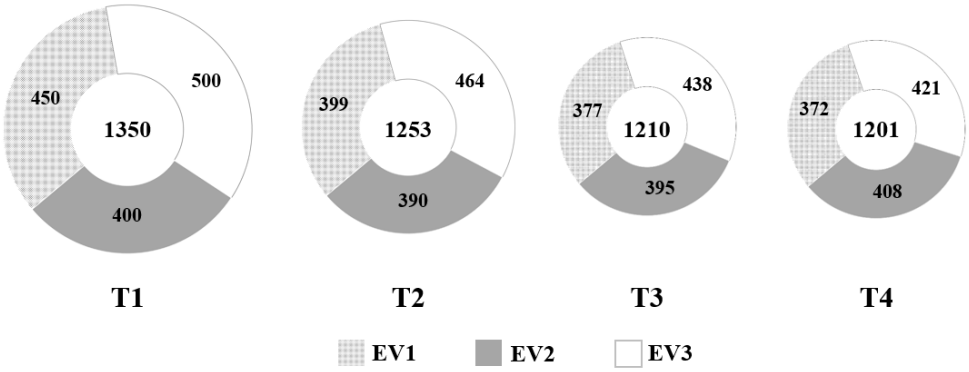


그림 6-8 시간 별 활용가능 전기차 대수 – 보통 시간(d)

이와 같이 시간에 따른 전기차의 위치상태를 바탕으로 전기차를 통해 계통에서 활용가능 한 용량을 최종적으로 산출한다. 활용가능 한 용량을 산정함에 있어서 필요로 하는 방전 계수(η^+)와 충전 계수(η^-)는 각각 $\eta^+ = 0.95$, $\eta^- = 0.98$로 설정하여 충방전 시 발생할 수 있는 손실을 고려했다. 또한 급전을 시작하는 시간에 전기차에 충전되어 있는 에너지의 평균 ε_{ini}는 0.7로 가정하고 마지막 급전시간에 전기차 에너지의 평균 ε_{ini}는 0.8로 가정하여 급전기간 동안 오히려 전기차를 충전하는 결과를 유도함으로써 소유주의 이용도를 해치지 않는 범위에서 이용할 수 있도록 설정했다. 이러한 조건에 따른 결과는 다음 **그림 6-9, 그림 6-10**과 같다.

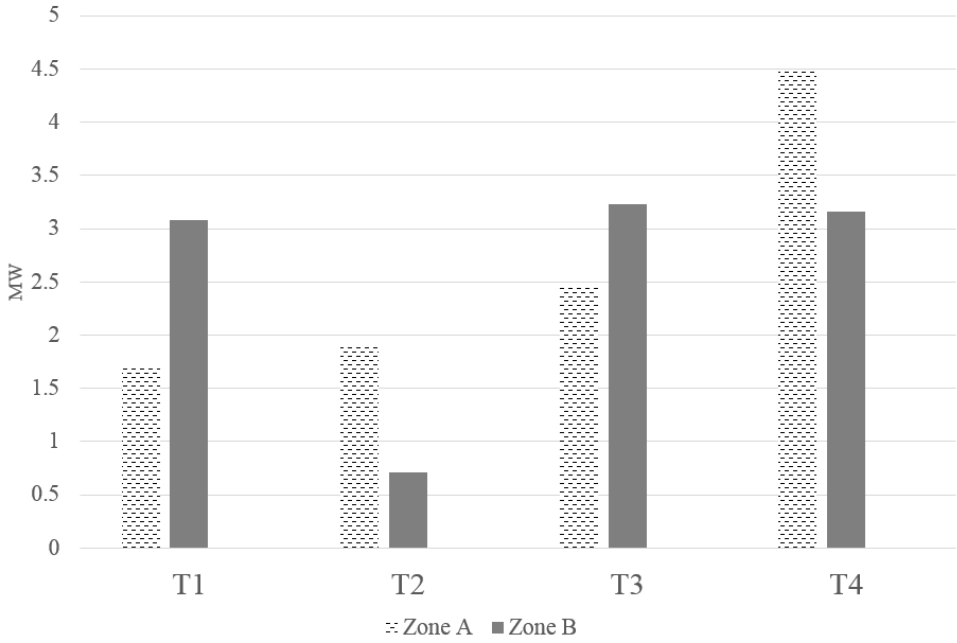


그림 6-9 시간 별 활용가능 전기차 용량 – 출퇴근 시간(c)

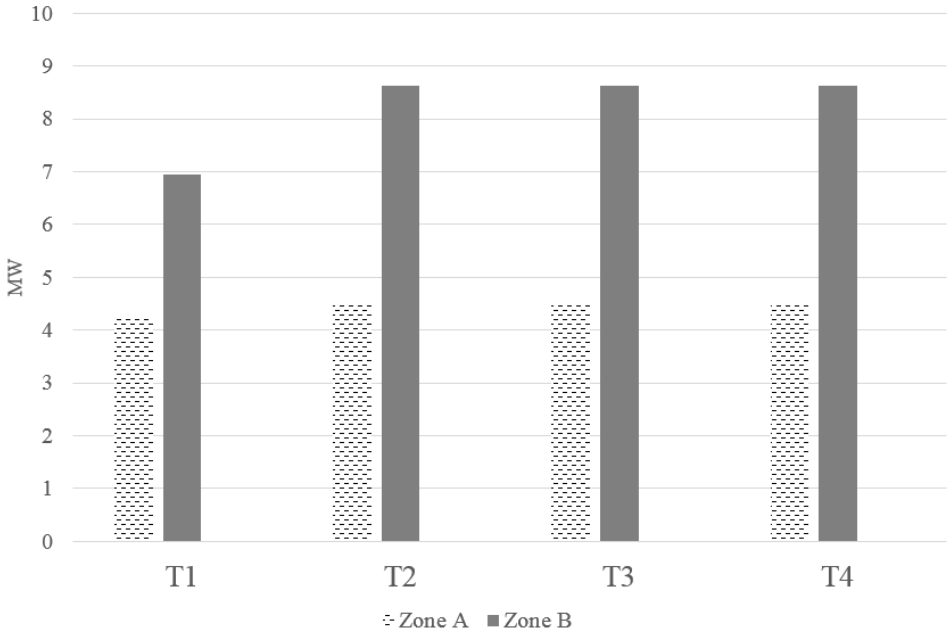


그림 6-10 시간 별 활용가능 전기차 용량 – 보통 시간(d)

시간 별 활용 가능 방전용량을 살펴보면, T1에서 EV fleet 1의 주차 대수는 EV fleet2의 주차대수 보다 적지만 전기차가 담당하는 증발 용량(EVRU)은 EV fleet 1에서 더 많이 확보할 수 있다. EV fleet 2의 주차 대수가 상대적으로 EV fleet 1 보다 더 많더라도, 각 전기차의 충전상태를 고려하면 EV fleet 1을 통하여 확보할 수 있는 용량이 더 크다. 한편 T2-T4에서는 시간에 따라 전기차의 주차 대수의 변화는 있지만 활용 가능 용량이 방전한계에 도달했기 때문에 일정한 값을 나타낸다. 이와 같이 일정한 값은 전기차가 계통에 제공할 수 있는 최대값이므로 계통운영자는 T2, T3, T4에서 전기차가 제공할 수 있는 최대용량을 계통운영에 활용 가능하다.

제 3 절 단기 발전계획 수행 결과

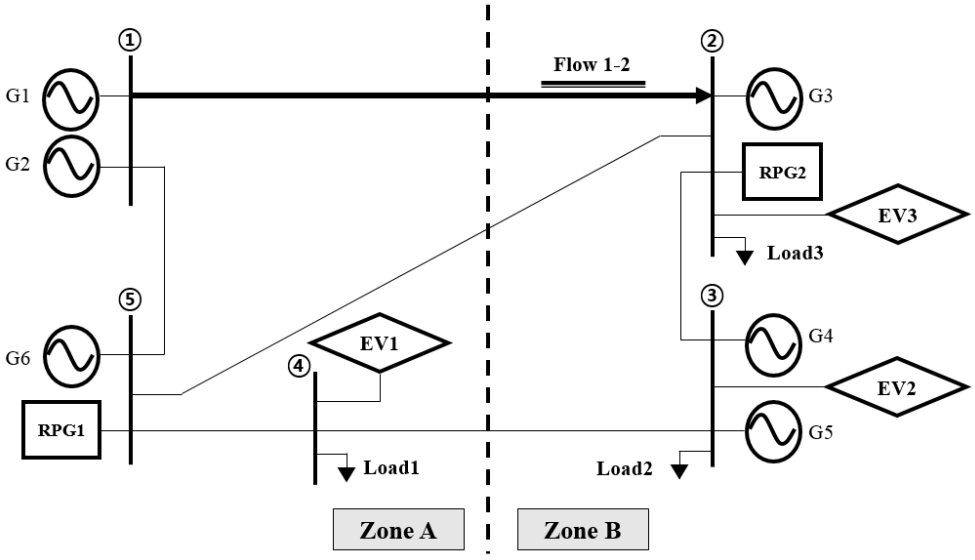


그림 6-11 사례연구를 수행한 수정된 PJM 5-모선 계통도

사례연구를 수행한 계통은 2개의 구역(zone)과 5개의 모선(bus)으로 구성된다. 이와 같은 대상계통에서, 구역 A와 구역 B 간의 전력의 흐름은 노드 1과 노드 2를 연결하는 송전선에서 가장 활발하게 일어나며 이러한 전력은 노드 1에서 노드 2의 방향으로 흐른다. 따라서 송전선 "1-2"에 흐르는 송전용량의 한계를 구역 별 에너지와 증감발 용량을 고려하여 단기 발전계획을 세우는 다양한 사례연구들을 진행했다.

송전선 "1-2"의 송전용량의 한계는 60MW이고, 각 노드 별로 송전선 "1-2" 흐르는 전력량을 산정하기 위한 감도(sensitivity)는 아래의 **표 6-6**와 같으며 통합 감도(aggregated sensitivities)는 다음과 같다. $H_{1-2,a,t}^{FRU} = H_{1-2,a,t}^{FRD} = H_{1-2,a,t}^{EVRU} = 0.4846$ 이며, $H_{1-2,b,t}^{FRU} = H_{1-2,b,t}^{FRD} = H_{1-2,b,t}^{EVRU} = -0.0463$ 이다.

표 6-6 노드 별 감도

	$H_{1-2,1,t}$	$H_{1-2,2,t}$	$H_{1-2,3,t}$	$H_{1-2,4,t}$	$H_{1-2,5,t}$
Sensitivity	0.6	-0.08	-0.04	0.12	0.3

아래에 진행되는 본 논문의 모든 사례연구는 증감발 용량의 효과에 집중하기 위하여 예비력 상품(regulating reserve, contingency reserve 등)은 고려하지 않았으며 오직 에너지와 증감발 용량만을 포함하여 수행했다. 증감발 용량을 제공한 자원의 offering prices 또는 availability는 제외했다. 단기 발전계획은 단일 단위 급전(single interval dispatch) 모

델에서 더욱 개선시킨 시결합 다중 단위 급전(multiple interval time-coupled dispatch model) 모델을 적용했다. 네 개의 연속된 시간 간격에 대하여 수행했고 각각의 시간 간격은 5분이다.

전기차는 계통에 전력을 공급할 수 있으며 계통을 통해서만 충전한다고 가정했다. 또한 전기차는 증감발 용량의 감발 용량 자원으로는 활용하지 않고 증발 용량 자원으로만 활용한다고 가정하여 아래의 사례연구들을 진행했다.

6.3.1 송전제약에 따른 영향

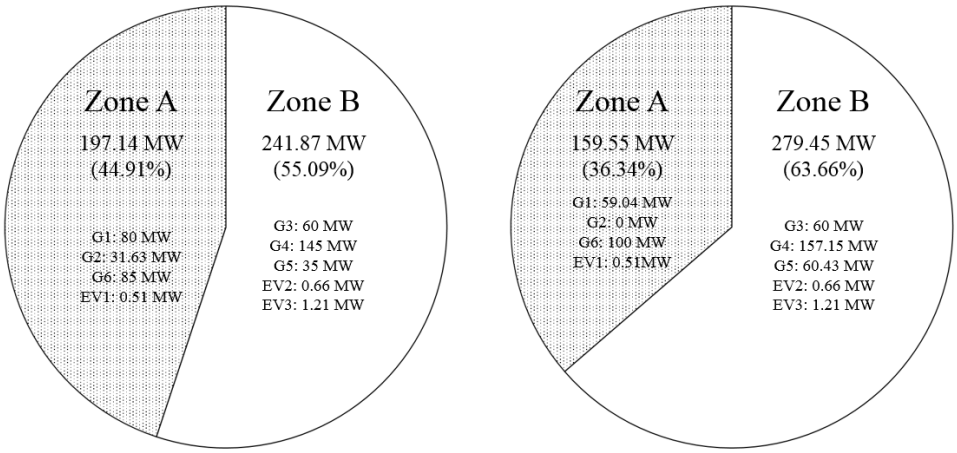
송전선 "1-2"의 송전제약을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 급전 결과를 비교한다. 기존의 일반 발전기들과 새롭게 포함시킨 전기차를 통하여 에너지와 증감발 필요 용량을 확보한다.

표 6-7 송전제약 적용에 따른 급전 결과

		Network constraint not considered (e)-1 Operating cost: **$10,150**				Network constraint considered (e)-2 Operating cost: **$10,929**			
(MW)		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
G1	Energy	67.55	80	80	80	54.51	59.52	59.04	58.86
	FRU	0	0	0	0	1.365	0	0	0
	FRD	0	0	12	0	0	0	10.67	0
G2	Energy	5	16.5	31.63	41.42	5	0	0	0
	FRU	0	0	12	9	0	0	0	2.378
	FRD	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	Energy	60	60	60	60	60	60	60	60

	FRU	0	0	0	0	0	0	0	0
	FRD	10	10	0	0	0	10	0	0
G4	Energy	155	150	145	140	156.06	160	159.26	155.64
	FRU	5	0	0	10	3.94	0	0	4.36
	FRD	10	10	0	0	0	10	0	0
G5	Energy	45	40	35	30	51.98	56.98	57.58	56.92
	FRU	10	10	0	10	10	10	10	10
	FRD	10	10	0	0	0	10	0	0
G6	Energy	95	90	85	80	100	100	100	100
	FRU	5	0	0	0	0	0	0	0
	FRD	10	10	0	0	10	10	0	0
EV1	Energy	0.52	-0.53	0.51	-0.52	0.52	-0.53	0.51	-0.52
	EVRU	1	0	0	0	0	0	0	0
EV2	Energy	0.68	-0.69	0.66	-0.7	0.68	-0.69	0.66	-0.67
	EVRU	0	0	0	0	2.8	5.00	3.65	4.98
EV3	Energy	1.25	-1.28	1.21	-1.24	1.25	-1.28	1.21	-1.24
	EVRU	0	0	0	0	2.22	5.59	3.1	5.55

위의 **표** 6-7는 송전한계를 고려하지 않는 사례 (e)-1과 송전한계를 고려한 사례 (e)-2의 결과를 나타냈다. 먼저 사례 (e)-1과 사례 (e)-2에서 급전된 발전력을 비교하여 나타내면 다음 **그림** 6-12과 같다.



(e)-1 (e)-2

그림 6-12 T3에서 구역 별 발전량 변화

사례 (e)-1과 같이 송전용량을 고려하지 않는 경우에는 전체 발전력의 증감에 따라 구역 A의 발전기들의 출력은 제한 없이 변화한다. 하지만 사례 (e)-2과 같이 송전용량을 고려한 결과를 살펴보면 송전선의 용량 한계 때문에 구역 A의 발전기들은 일정수준이상으로 출력 할 수 없다. **그림 6-12**에서 보이듯이 T3에서, 구역 A의 발전원들이 담당하는 발전력의 비율은 비교해보면 사례 (e)-1에서는 44.91% 이지만 (e)-2에서는 36.34% 이다. 송전한계를 고려하지 않으면 구역 A에서 많이 발전하더라도 물리적인 송전제약 때문에 구역 B로 흐를 수 있는 전력량의 한계가 있음을 의미한다. 이러한 경우에는 구역 A의 발전력이 낭비되거나 구역 B의 전력이 부족한 결과가 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 계통운영을 위해서는 송전한계를 고려한 급전계획을 수행해야 하며 이를 통해 실제적으로 활용가능 한 결과를 도출할 수 있다.

한편, 사례 (e)-2에서는 사례 (e)-1보다 계통 운영비용이 증가함을 알 수 있다. 하지만 이러한 수치는 실제적이지 않다. G1은 비교적 싼 발전기이기 때문에 (e)-1의 T2–T4까지 최대값으로 할당된다. 반면, (e)-2의 결과는 송전제약의 영향 때문에 G1 발전기는 최대용량을 발전할 수 없음을 나타낸다.

전기차의 급전 결과를 살펴보면 사례 (e)-1에서는 전기차의 충전량을 증발 용량으로 거의 사용하지 않았지만 (e)-2에서는 전기차의 증발 용량 사용량 EVRU가 적극적으로 사용됐음을 확인할 수 있다. 물론 사례 (e)-1도 전기차를 증발 용량으로 활용을 할 수 있는 상태지만 일반 발전기가 증발 용량을 모두 담당하기 때문에 전기차는 증발 용량 자원으로 참여하지 않는다. 하지만 사례 (e)-2처럼 제약조건을 고려하면 계통 운영자는 구역 B에 있는 EV2와 EV3를 통하여 증발 용량을 확보해야 한다. 이러한 결과를 통해서 증발 용량을 산정할 때도 반드시 송전한계를 고려하여야만 실제적으로 활용 가능한 결과가 도출되고 또한 전기차의 활용성도 증가한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 맥락에서 본 논문의 이후 사례연구들은 모두 송전한계를 고려한 결과임을 미리 밝힌다. 물론 사례연구들에서는 전기차가 송전한계에 미치는 긍정적인 영향을 부각시켜 서술하였지만, 전기차 자체가 부하의 역할 또한 수행하기 때문에 전기차 증가에 따라 송전혼잡을 가중 시키는 상황이 발생하여 반대로 계통운영의 어려움을 발생시키는 상황이 존재할 수 있음을 함께 밝힌다.

6.3.2 재생 발전원의 변동성에 따른 영향

이후 사례연구의 대조군 되는 기본사례이다. **표** 6-8의 순부하와 재생 발전기 출력값을 적용한다. 사례 (f)를 다른 사례들과 비교할 수 있는 기준 사례로 삼는다. 사례 (g)는 (f)와 비교하여 상대적으로 재생 발전원 출력의 변동성이 큰 사례를 나타낸다. 이들을 통하여 재생 에너지원의 변동성에 따른 급전 결과의 변화를 살펴본다. 전기차를 증발 용량 자원으로 활용하지 않았을 경우와 증발 용량 자원으로 활용한 경우의 결과를 비교한다. 이 때, 전기차로부터 충전과 방전을 할 수 있는 용량은 미리 계산한 **그림** 6-8의 값을 적용한다. 또한 송전제약을 모든 사례에서 고려했으며 이에 대한 결과는 **표** 6-9와 같다.

표 6-8 부하와 재생 발전기 출력값

		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Load (MW)		498	504	513	501	507	510
Renewable output (MW)	Low variability (f)	68	70	74	72	68	64
	High variability (g)	68	76	70	71	66	60

표 6-9 재생 발전원의 출력 변동성이 낮은 경우 급전 결과

		EV, no utilization for FRU (f)-1 Operating cost: **$10,995**				EV, utilization for FRU (f)-2 Operating cost: **$10,929**			
		Cost saving: $66 (0.6%)							
(MW)		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
G1	Energy	51.6	59.49	59.04	54.81	54.51	59.52	59.04	58.86

	FRU	5.32	0	0	0	1.365	0	0	0
	FRD	0	0	10.67	0	0	0	10.67	0
G2	Energy	5	0	0	0	5	0	0	0
	FRU	0	0	0.931	7.27	0	0	0	2.378
	FRD	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	Energy	60	60	60	60	60	60	60	60
	FRU	0	0	0	0	0	0	0	0
	FRD	0	10	0	0	0	10	0	0
G4	Energy	155	160	155	150	156.06	160	159.26	155.64
	FRU	5	0	0	10	3.94	0	0	4.36
	FRD	0	10	0	0	0	10	0	0
G5	Energy	55	57.98	62.56	66.64	51.98	56.98	57.58	56.92
	FRU	10	10	7.74	10	10	10	10	10
	FRD	0	10	0	0	0	10	0	0
G6	Energy	100	100	100	100	100	100	100	100
	FRU	0	0	0	0	0	0	0	0
	FRD	10	10	0	0	10	10	0	0
EV1	Energy	0.52	-0.53	0.51	-0.52	0.52	-0.53	0.51	-0.52
	EVRU	x	x	x	x	0	0	0	0
EV2	Energy	1.09	-1.12	0.66	-0.68	0.68	-0.69	0.66	-0.67
	EVRU	x	x	x	x	2.8	5.00	3.65	4.98
EV3	Energy	1.79	-1.82	1.22	-1.25	1.25	-1.28	1.21	-1.24
	EVRU	x	x	x	x	2.22	5.59	3.1	5.55

전기차를 증발 용량 자원으로 활용함에 따라 계통 운영비용이 감소했다. 이는, 기존의 발전기가 담당했던 증발 용량을 전기차가 대체함에 따른 결과이다. 비교적 저렴한 G1은 우수한 증감발 능력을 가진다. 표 6-9의 사례 (f)-1 결과를 보면 계통에 필요한 증감발 의무용량을 만족시키기 위하여 발전기 G1은 에너지뿐만 아니라 증발 용량 자원으로 할당된다. 하지만 사례 (f)-2에서처럼 전기차를 증발 용량 자원으로 활용

하면 T1부터 T4까지 EV2 fleet과 EV3 fleet이 증발 용량 자원으로 할당된다. 따라서 증발 용량으로 할당됐던 G1의 발전량을 에너지로 사용할 수 있게 됨에 따라 상대적으로 비싼 G5의 발전량이 줄어들기 때문에 계통 운영비용이 감소한다.

사례 (g)를 수행한 결과는 다음과 같다. 사례 (g)는 (f)와 입력조건을 비교했을 때 일반부하는 같지만 재생 발전원의 출력의 변화가 증가한 상황이다. 재생 발전원의 출력 변동성이 증가함에 따라 부하와 재생 발전원의 연산 결과인 순부하의 변동성이 증가하고 결과적으로 계통의 증감발 의무용량 또한 증가한다. 이러한 상황에서 전기차를 증발 용량 자원으로 활용하지 않는 사례 (g)-1와 전기차를 증발 용량 자원으로 활용하는 사례 (g)-2에 대하여 단기급전을 수행했다. 결과는 표 6-10과 같다.

표 6-10 재생 발전원의 출력 변동성이 높은 경우 급전 결과

		EV, no utilization for FRU (g)-1 Operating cost: **$11,081**				EV, utilization for FRU (g)-2 Operating cost: **$10,942**			
		Cost saving: $138 (1.25%)							
(MW)		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
EV1	Energy	1.49	-1.52	0.53	-0.54	1.49	-1.52	1.44	-1.47
	EVRU	x	x	x	x	0	0	0	0
EV2	Energy	1.8	-1.84	0.74	-0.75	1.31	-1.34	1.27	-1.3
	EVRU	x	x	x	x	2.16	5.65	3.04	5.61
EV3	Energy	1.79	-1.82	1.73	-1.77	1.79	-1.82	1.73	-1.77
	EVRU	x	x	x	x	1.69	6.13	2.58	6.08

사례 (g)-1의 결과를 살펴보면, T1의 L3에서 부하차단(load shedding)이 0.403MW만큼 발생한다. 계통에 연계되어있는 일반 발전기의 조합만으로는 재생 발전원의 출력 변동성이 증가함에 따라 증가된 증감발 의무용량을 충족 할 수 없기 때문에 부하차단이 발생했다. 하지만 사례 (g)-2는 전기차를 증발 용량 자원으로 활용했기 때문에 증가된 증감발 의무용량도 충족 시킬 수 있다. 사례 (g)-2에서는 전기차를 증발 용량 자원으로 활용함에 따라 부하차단이 발생하지 않는다. 그 결과 운영비용은 (g)-1과 비교하여 1.25% 감소했다.

표 6-11 재생 발전원의 출력 변동성이 높은 경우 전기차 활용 결과

(MWh)	T1	T2	T3	T4
EV2	0.18	0.471	0.253	0.468
EV3	0.141	0.511	0.215	0.507

위의 **표 6-11**는 재생 발전원의 변동성이 큰 경우 전기차가 활용되는 에너지의 크기를 나타냈다. 본 논문에서는 25kWh 배터리를 가지는 전기차 1500대를 가정했는데, 이들의 배터리 총 용량은 37.5MWh 이다. 이와 비교하여 시간 간격에 따라 쓰이는 전기차 배터리의 에너지량은 평균 0.686MWh이며 이는 총 배터리 용량의 1.83% 정도이다. 전기차의 총 용량에 대비하여 증감발 용량으로 활용하는 배터리는 매우 작기 때문에 소유주의 활용도를 크게 해치지 않음을 다시 한번 확인할 수 있으며 또한 배터리의 수명에 미치는 영향이 크지 않음을 유추할 수 있다. 더불

어 이와 같이 미미한 정도의 사용량임에도 불구하고 계통의 부하 차단을 방지할 수 있는 효과가 있음을 보였다.

6.3.3 전기차의 보급률 변화에 따른 영향

전기차의 보급률이 증가함에 따라 발생하는 변화를 분석한다. 기존 사례 (f)-2는 EV 보급률 1% 일 때, 전기차를 증발 용량 자원으로 활용하는 경우를 의미한다. 여기에서 전기차의 보급률이 2% 일 때의 경우가 (h)-1, 보급률이 3%일 때 (h)-2이다.

표 6-12 전기차의 보급률에 따른 급전 결과

EV penetration rate	Operating cost	Load shedding
1% (f)-2	$10,929	x
2% (h)-1	$10,941	x
3% (h)-2	$11,118	T2, L3 1.76 MW

보급률이 1%일 경우 전기차의 대수는 1500대로 가정했으므로 보급률이 1%씩 늘어갈 때 마다 전기차는 1500대씩 증가한다. 전기차가 증가하면 전기차에서 발생하는 충전부하 또한 증가하기 때문에 결국 계통의 총 부하의 크기가 증가한다. 한편, 사례연구의 가정에 따라 네 단위 시간 동안 전기차 배터리의 10%를 충전해야 한다. 따라서 전기차의 보급률이 1% 증가할 때마다 추가로 필요로 하는 충전량은 11.25MWh 이다.

사례연구 (h)-1의 결과를 보면, (f)-2와 비교하여 운영비용이 약간 증가한 것을 확인할 수 있다. 전기차의 보급률이 1% 증가함에 따라 추가로 충전에 필요한 에너지량은 11.25MWh이고, G1부터 G6의 평균 offer price는 약 $16.3/MWh이다. 증가한 전기차의 충전량을 일반 발전기의 평균가로 제공한다는 가정하에 증가하는 충전 비용은 약 $180 이상이다. 하지만 실제로 증가한 운영비용은 이보다 훨씬 적다. 늘어난 전기차가 증발 용량 자원으로 활용되기 때문이다. 증감발 용량으로 활용할 수 있는 전기차가 증가함에 따라 증감발 능력이 우수하고 상대적으로 저렴한 발전기(e.g. G1)의 증감발 용량 담당 의무가 줄어들게 된다. 따라서 저렴한 발전기가 담당하던 증감발 용량을 에너지로 활용하면 비싼 발전기의 에너지 사용을 줄일 수 있고 결과적으로 총 계통 운영비용이 감소한다.

한편 사례 (h)-2의 운영비용은 (f)-2와 비교했을 때 상당히 많이 증가한 것을 알 수 있다. 충전부하가 많이 늘어난 효과도 있지만, T2의 L3에서 부하차단이 발생했기 때문이다. 전기차의 보급률이 3% 이상이 되면 전기차의 충전부하를 포함한 전체 부하는 계통이 감당할 수 있는 범위를 벗어나기 때문에 필연적으로 부하차단이 발생한다.

제 7 장 결론 및 제언

재생 에너지의 확산에 따른 증감발 용량의 필요성 증대와 더불어 친환경적인 전기차의 보급 가속화에 기인하여 본 논문의 연구를 진행했다. 재생 에너지 증가는 순부하의 변동성 및 불확실성을 가중시키고 안정적인 계통운영을 위하여 증감발 용량의 필요성을 유발한다. 현재 증감발 용량을 제공할 수 있는 자원은 기존의 발전기들만 참여자격을 가지고 있지만 재생 에너지원이 증가할수록 기존 자원들이 차지하는 비율이 점차 줄어들게 된다. 따라서 증감발 용량이 더욱 요구됨에도 불구하고 이를 제공할 수 있는 자원의 부족 현상이 발생하게 되고 이에 따라 기존의 자원 이외의 자원으로 증감발 용량을 제공할 수 있는 방안의 연구는 타당성을 지닌다.

본 논문에서는 기존의 증감발 용량 산정 방안의 개선을 통하여 새로운 자원의 투입을 배제하고 계통의 안정성을 증진 시킬 수 있는 방안을 제안했다. 먼저, 급전을 고려하는 시간단위를 증가시켜 이후의 급격한 순부하의 변화에 대처할 수 있도록 제안했다. 기존의 급전 모델은 해당 급전 시간에 요구되는 에너지와 증감발 용량만을 확보하여 수급균형을 유지했지만 해당 급전 시간 이후의 여러 단위시간까지 순부하를 예측하여 이에 대처할 수 있도록 급전을 수행하는 다중 단위 급전을 제안하고

활용했다. 더불어 증감발 용량을 산정하는데 요구되는 불확실성을 산출하는 방안을 개선시켜 검증했다. 기존에는 모든 시간대에 동일한 불확실성 값을 적용하여 증감발 용량을 산출했지만, 본 논문에서는 해당시간에 예측되는 부하와 재생 에너지의 설비용량, 출력 예측값을 통하여 불확실성을 산정했다. 각각에 적용되는 계수의 값을 선정하여 예측오차의 분포를 생성하고 일정 신뢰도 수준을 만족하는 값을 도출하여 이들을 증감발 용량의 불확실성 값으로 산출했다. 이와 같이 예측오차를 고려하여 불확실성을 도출한 방법을 적용하면 기존 방법 대비 계통의 운영비용을 절감할 수 있음을 확인하였다. 일련의 과정에서 부하와 재생 에너지에 적용하는 계수에 따라 최종적으로 얻어내는 불확실성의 값이 변화하고 이에 따라 운영비용도 변동할 수 있다. 따라서 적절한 계수 선정이 요구된다. 제안한 방법의 검증수단으로 계통 운영비용만을 비교하였는데 만일 몬테카를로 기법 등을 적용하여 다양한 시나리오를 고려한다면 계통의 신뢰도 측면에서도 제안한 방법의 긍정적인 영향을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 전기차의 활용 기법 또한 제안했다. 전기차를 증감발 용량으로 활용하는 방안에 대해서는 전문가의 다양한 의견이 존재한다. 먼저 전기차를 기존 부하 예측분포에 전기차의 예측분포를 결합하여 실시간 수요반응(DR; demand response)으로 활용하는 방안이 있다. 이와 같이 전기차의 전기수요 특성에 집중하여 일반 부하와 함께 결합할 수 있다면 실시간 수요반응 등과 같이 기존에 존재하는 방안에 추가하여 활용할 수 있어 비교적 간단화 할 수 있다는 점에서 장점을 가진다. 하지

만 실시간 수요반응을 증감발 용량으로 활용하기에는 다음과 한계가 존재한다. 일반적으로 실시간 수요반응은 경제성 수요반응과 신뢰성 수요반응으로 나뉜다. 경제성 수요반응은 시간대별 가격 신호를 바탕으로 전기요금이 비싼 시간대에서 저렴한 시간대로 부하를 이동시키는 것을 목적으로 하며, 실시간 수요반응의 참여자로 하여금 경제적 이윤을 제공하며 이루어진다. 하지만 현재 증감발 용량은 이를 위한 가격 신호가 존재하지 않기 때문에 증감발 용량으로 경제성 수요반응을 활용하기에는 한계가 있을 것으로 판단했다. 또한 신뢰성 수요반응은 가동 시간 및 가동 횟수를 제한하여 사전에 계약하기 때문에 급전시간의 단위로 가동여부를 자주 변환하는 증감발 용량으로 활용하기 부적합하다고 판단했다. 더욱이 현재 일반적인 수요반응에서는 필요 시 수요를 감축하는 것에 집중되어 있으며 수요를 증가를 시키는 방안은 활성화 되어있지 않다. 따라서 증감발 용량의 감발 용량으로 활용하는 것에도 한계가 존재하기 때문에 전기차를 단독적인 증감발 용량의 자원으로 활용하였으며 이를 모델링하여 적용했다. 전기차는 구역이 구분되어 있는 계통에서 전기차의 위치와 충전상태를 나누어 각각의 상태에 해당하는 전기차의 대수를 산정했다. 전기차의 상태를 마르코프 체인으로 모델링하여 상태의 변화를 확률적으로 산출하는 과정을 제시했다. 산출 대상으로 삼는 시간대에 따라 전기차의 활용가능 정도가 달라지기 때문에 시간대를 나누어 전기차의 대수 변화를 확인했다. 출퇴근 시간대처럼 운행하고 있는 전기차가 많은 시간대와, 반대로 전기차가 운행을 많이 하지 않는 보통 시간대로 나누어 전

기차의 대수 변화를 수치적으로 제시했다. 계통과 연결되어있는 전기차의 대수와 이들의 충전상태를 기반으로 계통에서 사용이 가능한 전기차의 용량을 산정하기 위하여 다양한 제약조건을 대입하고 실제적으로 활용가능 한 전기차의 정도를 도출했다.

위의 과정들을 종합하여 진행한 사례연구는 크게 세 가지이다. 첫 번째는 송전한계의 유무에 따른 단기 발전계획이다. 재생 에너지의 증가에 따라 계통에서 확보해야 하는 증감발 필요 용량이 점차 확대됨으로써 증감발 용량이 송전선의 조류에 미치는 영향을 간과할 수 없다. 따라서 송전용량의 제약을 구역 간을 연결하는 주요 송전선에 대입하여 살펴봤으며 이를 통해 증감발 용량을 포함한 단기 발전계획에서 송전한계 고려의 필요성을 도출했다. 두 번째와 세 번째 사례연구는 전기차 쓰임에 집중하여 분석했다. 기본적으로 송전한계를 고려하여 사례연구를 진행한 결과 전기차를 단기 발전계획에서 증감발 용량으로 활용함에 따라 기본적으로 계통 운영비용이 줄어드는 효과가 있음을 확인했으며 특히 재생에너지의 변동성이 큰 경우 더욱 전기차의 증감발 용량 활용이 효과적임을 입증했다. 더욱이 전기차 보급률 증가에 따른 충전부하의 증가는 계통의 운영비용을 상승시키지만 증감발 용량 자원으로 전기차를 활용함으로써 운영비용의 증가분을 어느 정도 상쇄 할 수 있음을 도출했다. 견해에 따라 사례연구에서 제시한 전기차 이용률을 통해 전기차의 활용성 측면에 대한 의문이 생길 수 있다. 하지만 사례연구의 결과는 급전 단위인 5분간의 전기차 배터리 이용률을 나타낸 것이며 해당 환경하의 단편적

인 결과임을 밝힌다. 또한 증감발 용량 이외의 이용방안으로 활용 시에는 증감발 용량으로 활용하는 전기차 배터리의 이용률 보다 증가 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 사례연구의 결과를 바탕으로 전기차 활용을 최소로 하며 전력계통의 운영에 기여할 수 있는 방안을 제시하였으며 전기차 활용방안의 다양성을 부여한다는 측면에서 기여하는 바가 있다.

본 연구에서 제안한 증감발 용량으로써 전기차 활용가능성과 증감발 필요용량 산정방안을 개선시킨 방안은 예비력을 포함하지 않고 검증하였다. 예비력을 포함하더라도 전체적인 맥락에서 큰 변화는 없을 것으로 판단되지만, 본 논문의 부록에서 제시한 것과 같이 에너지와 증감발 용량 이외에 다양한 예비력 상품들을 포함하면 사고상황을 가정하여 이를 고려한 발전계획을 수립할 수 있으며 이에 따른 더욱 실제적인 결과가 도출될 것으로 기대한다.

본 연구에서는 전기차를 계통운영에 활용함에 있어서 계통 운영자의 지령에 따라 명확히 응동하도록 설정하였으며 이러한 가정에는 다소 한계가 있음을 시인한다. 하지만 전기차를 활용하는 다양한 방안과 특히 증감발 용량으로의 활용에 관하여 새롭게 제안한 연구로써 이를 바탕으로 전기차가 제공하는 증감발 용량에 따른 요금제 설계 등에 관한 연구로 확장하여 더욱 정교화 시킬 수 있을 것으로 가늠한다. 또한 증감발 용량의 보상비용을 별도로 산정하지는 않았지만 적절한 증감발 용량의 가격을 산정하는 연구로 확장시킨다면 증감발 용량 자원들에게 적절한 보상에 따른 적극적인 참여를 유도할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] NERC. *Reliability issues white paper: Accommodating high levels of variable generation.* April 2008.

[2] Holttinen, H.; Meibom, P.; Orths, A.; etc. Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration. *Wind Energy* 2011, *14,* 179–192.

[3] Eftekharnejad, S.; Vittal, V.; Heydt, G.T.; Keel, B.; Loehr, J. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, *28*, 893–901.

[4] Gul T.; Stenzel T. *Variability of wind power and other renewables: management options and strategies;* International Energy Agency: Paris, France, 2005.

[5] Kunz, H.; Hagens, N.J.; Balogh, S.B. The Influence of Output Variability from Renewable Electricity Generation on Net Energy Calculations. *Energies* 2014, *7*, 150–172.

[6] Banakar, H.; Luo, C.; Ooi, B.T. Impacts of wind power minute-to-minute variations on power system operation. *IEEE Trans. Power Syst.* 2008, *23*, 150–160.

[7] Makarov, Y.V.; Loutan, C.; Ma, J.; De Mello, P. Operational impacts of wind generation on California power systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 2009, *24*, 1039–1050.

[8] Kassakian, J. G.; Schmalensee, R.; Desgroseilliers, G.; Heidel, T. D.; etc. *The future of the electric grid,* MIT 2011.

[9] Lannoye, E.; Flynn, D.; O'Malley, M. Evaluation of power system flexibility. *IEEE Trans. Power Syst.* 2012, *27*, 922–931.

[10] Kirby, B.; Beuning, S. J.; Connolly, K.; Dangelmaier, L.; Rosso, A. D.; etc. *Operating practices, procedures, and tools,* NERC 2011.

[11] EnerNex. *NSP wind integration study prepared for Xcel Energy.* August 2014.

[12] Wu, C.; Hug, G.; Kar, S. Risk-limiting economic dispatch for electricity markets with flexible ramping products. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, *31*, 1990-2003.

[13] Wang, B.; Hobbs, B.F. Real-time markets for flexiramp: A stochastic unit commitment-based analysis. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, *31*, 846-860.

[14] Wang, C.; Luh, P.B.S.; Navid, N. Ramp requirement design for reliable and efficient integration of renewable energy. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, *32*, 562-571.

[15] Navid, N.; Rosenwald, G. Market solutions for managing ramp flexibility with high penetration of renewable resource. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2012, *3*, 784-790.

[16] Xu, L.; Tretheway, D. *Flexible ramping products: Revised draft final proposal,* CAISO 2014.

[17] Navid, N. Ramp capability product design for MISO markets. MISO 2013.

[18] MISO. Ramp Management. Available online: https://www.misoenergy.org/WhatWeDo/MarketEnhancements/Pages/RampManagement.aspx (accessed on 27 September 2017).

[19] Tang, D.; Wang, P. Nodal Impact Assessment and Alleviation of Moving Electric Vehicle Loads: From Traffic Flow to Power Flow. *IEEE Trans. Power Sys.* 2016, *31*, 4231-4242.

[20] Chen, R.; Wang, J.; Botterud, A.; Sun, H. Wind power providing flexible ramp product. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, *32*, 2049-2061.

[21] Cui, M.; Zhang, J.; Wu, H.; Hodge, B. M.; Ke, D.; Sun, Y. Wind power ramping product for increasing power system flexibility. In Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, USA, May 2016.

[22] Zhang, B.; Kezunovic, M. Impact on power system flexibility by electric vehicle participation in ramp market. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, *7*, 1285–1294.

[23] Gottwalt, S.; Schuller, A.; Flath, C.; Schmeck, H.; Weinhardt, C. Assessing load flexibility in smart grids: Electric vehicles for renewable energy integration. In Power and Energy Society General Meeting (PES), Vancouver, BC, Canada, July 2013.

[24] Kempton, W.; Tomić, J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. J. Power Sources 2005, 144, 280–294.

[25] White, C.D.; Zhang, K.M. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction. *J. Power Sources* 2011, *196*, 3972–3980.

[26] Pavić, I.; Capuder, T.; Kuzle, I. Value of flexible electric vehicles in providing spinning reserve services. *Appl. Energy* 2015, *157*, 60–74.

[27] Ortega-Vazquez, M.A.; Bouffard, F.; Silva, V. Electric vehicle aggregator/system operator coordination for charging scheduling and services procurement. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, *28*, 1806–1815.

[28] Tomić, J.; Kempton, W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. J. Power Sources 2007, 168, 459–468.

[29] Khodayar, M.E.; Wu, L.; Li, Z. Electric vehicle mobility in transmission-constrained hourly power generation scheduling. *IEEE Trans. Smart Grid* 2013, *4*, 779-788.

[30] Sun, Y.; Zhong, J.; Li, Z.; Tian, W.; Shahidehpour, M. Stochastic scheduling of battery-based energy storage transportation system with the penetration of wind power. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2017, *8*, 135-144.

[31] Chen, Y.; Gribik, P.; Gardner, J. Incorporating post zonal reserve deployment transmission constraints into energy and ancillary service co-optimization. *IEEE Trans. Power Syst.* 2014, *29*, 537-549.

[32] Zheng, T.; Litvinov, E. Contingency-based zonal reserve modeling and pricing in a co-optimized energy and reserve market. *IEEE Trans. Power Syst.* 2008, *23*, 277-286.

[33] Chatterjee, D.; Hansen, C.; Howard, J.; Larson, K.; Li, S.; Merring, B.; Trotter, K.; Wang, C.; Fogarty, J. Ramp capability integration technical work. MISO 2016.

[34] California Public Utilities Commission. Available online: http://www.cpuc.ca.gov/

[35] 전력거래소. *해외 전력시장 동향: CAISO.* 2015. 12.

[36] NREL. *Technical report: Operating reserves and variable generation,* August 2011.

[37] Milligan, M.; Kirby, B. Analysis of sub-hourly ramping impacts of wind energy and balancing area size. In Proceedings of the American Wind Energy Association Windpower 2008, Houston, TX, USA, June 2008.

[38] Wang, Q.; Hodge, B. M. Enhancing power system operational flexibility with flexible ramping products: A review. *IEEE Trans. Ind. Informat.* 2017, *13,* 1652–1664.

[39] 전력거래소. *CBP 체제에서의 계통운영보조서비스시장 도입에 관한 연구.* 2016. 03.

[40] 권헌규. 계통 유연성을 고려한 개선된 증감발 용량모델과 단기 발전계획에 적용; 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문. 2017. 08.

[41] Gross, G.; Galiana, F. D. Short-term load forecasting. *Proc. IEEE* 1987, *75,* 1558–1573.

[42] Bouffard, F.; Faliana F. D. Stochastic security for operations planning with significant wind power generation. *IEEE Trans. Power Syst.* 2008, *23,* 306–316.

[43] International Energy Agency. *Global EV Outlook: Two million and counting.* 2017.

[44] 교통안전공단. 자동차 주행거리 통계. Available online: http://www.ts2020.kr/

[45] Omar, N.; Monem, M. A.; Firouz, Y.; etc. Lithium iron phosphate based battery-assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Appl. Energy* 2014, *113,* 1575–1585.

[46] Arias, N. B.; Tabares, A.; Franco, J. F.; Lavorato, M.; Romero, R. Robust Joint Expansion Planning of Electrical Distribution Systems and EV Charging Stations. *IEEE Trans. Sustain.* Energy 2017, *PP,* 1–11.

[47] Gerlough, D.L.; Schuhl, A. *Use of Poisson distribution in highway traffic;* Eno Foundation for Highwat Traffic Control: Westport, CT, USA, 1955.

[48] Guo, J.; Zhang, Y.; Chen, X.; Yousefi, S.; Guo, C.; Wang, Y. Spatial stochastic vehicle traffic modeling for VANETs. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2017, *PP,* 1−10.

부 록

부록 1 예비력을 포함한 단기 발전계획 정식화

부록 1.1 목적함수

$$Min\sum_{t=t_0}^{t_s}(CG_t + CEV_t + CLS_t) \tag{A1}$$

$$CG_t = \sum_{i\in I}\begin{bmatrix} C_i^{energy}\left(p_{i,t}\right) + C_i^{FRU}\left(FRU_{i,t}\right) \\ +C_i^{FRD}\left(FRD_{i,t}\right) + \sum_{w\in W} C_i^{w}\left(r_{i,t}^{w}\right) \end{bmatrix} \tag{A2}$$

$$CEV_t = \sum_{x\in X}\begin{bmatrix} C_x^{dis}\left(pev_{x,t}^{dis}\right) - C_x^{cha}\left(pev_{x,t}^{cha}\right) \\ +C_x^{EVRU}\left(EVRU_{x,t}\right) + C_x^{EVRD}\left(EVRD_{x,t}\right) \end{bmatrix} \tag{A3}$$

$$CLS_t = VOLL \times \sum_{n\in N} LS_{n,t} \tag{A4}$$

부록 1.2 제약조건

- 발전기 출력제약

$$\forall t, \forall i : p_{i,t} + \sum_{w\in W} r_{i,t}^{w} + FRU_{i,t} \le p_i^{\max} - \phi_{i,t}\left(p_{i,t}^{\max} - p_{i,t}^{reg,\max}\right) \tag{A5}$$

$$\forall t, \forall i : p_{i,t} - r_{i,t}^{reg} - FRD_{i,t} \ge p_{i,t}^{\min} - \phi_{i,t}\left(p_{i,t}^{\min} - p_{i,t}^{reg,\min}\right) \tag{A6}$$

- 계통 예비력제약

$$\forall t : \sum_{z \in Z} r_{z,t}^{reg} \geq R_{system,t}^{reg} \tag{A7}$$

$$\forall t : \sum_{z \in Z} \left\{ r_{z,t}^{reg} + r_{z,t}^{spin} \right\} \geq R_{system,t}^{reg} + R_{system,t}^{spin} \tag{A8}$$

$$\forall t : \sum_{z \in Z} \left\{ \sum_{w \in W} r_{z,t}^{w} \right\} \geq \sum_{w \in W} R_{system,t}^{w} \tag{A9}$$

- 구역 별 예비력제약

$$\forall t, \forall z : \sum_{i \in I, z} r_{i,t}^{reg} \geq r_{z,t}^{reg} \tag{A10}$$

$$\forall t, \forall z : \sum_{i \in I, z} \left\{ r_{i,t}^{reg} + r_{i,t}^{spin} \right\} \geq r_{z,t}^{reg} + r_{z,t}^{spin} \tag{A11}$$

$$\forall t, \forall z : \sum_{i \in I, z} \left\{ \sum_{w \in W} r_{i,t}^{w} \right\} \geq \sum_{w \in W} r_{z,t}^{w} \tag{A12}$$

- 예비력 증가와 증발용량/감발용량의 송전제약

$$\forall t, \forall l : \begin{bmatrix} F_{l,t}\left(\mathbf{P_t}, \mathbf{EV_t}, \mathbf{D_t}\right) + \sum_{z \in Z} \left\{ r_{z,t}^{reg} \cdot H_{l,z,t}^{reg} \right\} \\ + \sum_{z \in Z} \left\{ FRU_{i,z,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRU} \right\} - \sum_{z \in Z} \left\{ FRD_{z,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRD} \right\} \\ + \sum_{x \in X, z} \left\{ EVRU_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRU} \right\} - \sum_{x \in X, z} \left\{ EVRD_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRD} \right\} \\ - H_{l,LC,t} \cdot R_{Mar}^{reg} \end{bmatrix} \leq F_{l,t}^{N.\max} \tag{A13}$$

- 예비력 감소와 증발용량/감발용량의 송전제약

$$\forall t, \forall l: \begin{bmatrix} F_{l,t}\left(\mathbf{P_t}, \mathbf{EV_t}, \mathbf{D_t}\right) - \sum_{z \in Z}\left\{r_{z,t}^{reg} \cdot H_{l,z,t}^{reg}\right\} \\ + \sum_{z \in Z}\left\{FRU_{z,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRU}\right\} - \sum_{z \in Z}\left\{FRD_{z,t} \cdot H_{l,z,t}^{FRD}\right\} \\ + \sum_{x \in X, z}\left\{EVRU_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRU}\right\} - \sum_{x \in X, z}\left\{EVRD_{x,t} \cdot H_{l,z,t}^{EVRD}\right\} \\ + H_{l,LC,t} \cdot R_{Mar}^{reg} \end{bmatrix} \le F_{l,t}^{N.\max} \quad \text{(A14)}$$

- 사고 시 송전제약

$$\forall t, \forall l: \begin{bmatrix} F_{l,t}\left(\mathbf{P_t}, \mathbf{EV_t}, \mathbf{D_t}\right) - Q_{z,t} \cdot H_{l,z,t}^{C} \\ + D_{z,t}^{spin} \cdot \sum_{z' \in Z}\left\{r_{z',t}^{spin} \cdot H_{i,z',t}^{spin}\right\} \\ + D_{z,t}^{supp} \cdot \sum_{z' \in Z}\left\{r_{z',t}^{supp} \cdot H_{i,z',t}^{supp}\right\} \end{bmatrix} \le F_{l,t}^{C.limit} \quad \text{(A15)}$$

부록 2 기호 및 약어

Indices and Sets

i, I	Index and set for units
z, Z	Index and set for zones
n, N	Index and set for nodes
x, X	Index and set for EV fleets
l	Index for transmission constraints
S	Set for EV state categories $\{pc, fc, pl\}$
U	Set for ramping product categories $\{FRU, FRD, EVRU, EVRD\}$

Parameters

m_S	Mean value of EV states s
σ_S	Standard deviation of EV states s
P_S	Probability of EV states s

$r^{\max,dis}$	Maximum EV discharging rate
$r^{\max,cha}$	Maximum EV charging rate
$VOLL$	Value of lost load
$P_i^{\max}$	Upper limit for the power output of unit i
$P_i^{\min}$	Lower limit for the power output of unit i
RC_i	Ramp capability of unit i
$R_{system,t}^{RU}$	System ramping up requirement at time t
$R_{system,t}^{RD}$	System ramping down requirement at time t
$rp_{n,t}$	Renewable power output of node n at time t
$d_{n,t}$	Demand of node n at time t
$\mathbf{RP_t}$	Vector of renewable power at time t
$\mathbf{D_t}$	Vector of demand at time t
$H_{l,n,t}$	Sensitivity to transmission constraint l of node n at time t
$H_{l,z,t}^{U}$	Aggregated sensitivity for ramping product U to transmission constraint l of zone z at time t
$F_{l,t}^{limit}$	Flow limit for transmission constraint l at time t

Variables

EVE^{dis}	Aggregated energy capacity of EV for discharging
EVE^{cha}	Aggregated energy capacity of EV for charging
EVP^{dis}	Aggregated power of EV for charging
EVP^{cha}	Aggregated power of EV for discharging
$pev_{x,t}^{dis}$	EV discharging power of fleet x at time t
$pev_{x,t}^{cha}$	EV charging power of fleet x at time t
$p_{i,t}$	Power output of unit i at time t
$nl_{n,t}$	Net load of node n at time t
$FRU_{i,t}$	Ramping up of unit i at time t
$FRD_{i,t}$	Ramping down of unit i at time t
$EVRU_{x,t}$	EV ramping up of fleet x at time t
$EVRD_{x,t}$	EV ramping down of fleet x at time t
CLS_t	Load shedding cost at time t
LS_t	Load shedding volume at time t
$\mathbf{P_t}$	Vector of cleared generator energy at time t
$\mathbf{EV_t}$	Vector of cleared EV energy at time t

Functions

$P_{tr}(\cdot)$	Probability function of the number of traveling EVs
$P_{pa}(\cdot)$	Probability function of the number of parked EVs
$K_E(\cdot)$	Cumulative distribution function of the energy from the parked EV fleet

$CG_i(\cdot)$	Total production cost function of unit i
$C_i^{energy}(\cdot)$	Production cost function of energy of unit i
$C_i^U(\cdot)$	Production cost function of ramping product U of unit i
$CEV_x(\cdot)$	Total EV cost function of fleet x
$C_x^{dis}(\cdot)$	EV discharging cost function of fleet x
$C_x^{cha}(\cdot)$	EV charging cost function of fleet x
$C_x^U(\cdot)$	EV ramping product U cost function of fleet x
$F_{l,t}(\cdot)$	Flow with the transmission constraint l at time t

Abstract

Short-Term Security-Constrained Generation Scheduling Considering Electric Vehicles as Flexible Ramping Product

Dam Kim
Department of Electrical and Computer Engineering
The Graduate School
Seoul National University

A high penetration level of renewable energy in a power system increases variability and uncertainty, which can lead to ramping capability shortage. This makes the stable operation of a power system difficult. However, appropriate management of electric vehicles (EVs) can overcome such difficulties. In this study, EVs were applied as a flexible ramping product (FRP), and a method was developed to increase the system ramping capability. When increasing the FRP to the amount required for the system, the effect on transmission lines cannot be neglected. Thus, the required FRP considering transmission constraints is calculated separately for each zone to secure deliverability. To make adjustment possible, the zonal available capacity is calculated by considering the probabilities of the

location and the plugged and charged states of EVs. Also, the improvement on the methodology of calculating ramping capacity induces efficient operation of power system. In the existing methodology, the uncertainty of ramping capacity has been determined as constant value regardless of time interval. The presented method stochastically estimates the uncertainty of ramping capacity of each dispatch time. The forecasted load and the power output of renewable energy resource are regarded to derive system uncertainty. This study demonstrated that the power system can be operated more adequately through the enhanced measures of procuring ramping capability, and investigates the potential of applying EVs as an FRP. The applicability of EVs as an FRP resource is examined, and the results showed that they can be used at a more significant level considering the transmission constraints.

Keywords : electric vehicle, flexible ramping product, flexibility, short-term operation, transmission constraint, renewable energy
Student Number : 2012-20745