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

공학박사학위논문

경쟁 시장에서의 적정 주파수제어예비력 용량 결정 방안 연구

A Novel Approach to Determining Reserve Capacity Requirement for Frequency Control in a Competitive Market Environment

2014 年 2月

서울대학교 대학원

전기•정보 공학부

김 선 교

경쟁 시장에서의
적정 주파수제어예비력
용량 결정 방안 연구

A Novel Approach to Determining Reserve Capacity Requirement for Frequency Control in a Competitive Market Environment

지도교수 윤 용 태
이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2014년 2월
서울대학교 대학원
전기•정보 공학부
김 선 교
2014년 2월

김선교의 공학박사 학위논문을 인준함

위 원 장 _____ (인)
부 위 원 장 _____ (인)
위 원 _____ (인)
위 원 _____ (인)
위 원 _____ (인)

초록

예비력(reserve)은 전력계통의 안정성과 신뢰도 유지를 위해 필수적인 공급 자원이다. 예측수요의 오차, 발전기의 불시고장 등으로 전력수급의 균형을 유지하지 못할 경우를 대비하기 위해서는 적절한 예비력 용량을 확보하는 것이 매우 중요하다. 예비력은 그 목적에 따라 설비예비력, 공급예비력, 그리고 주파수제어예비력(frequency control reserve)으로 분류된다. 설비예비력과 공급예비력은 중장기 전원계획 수립에 사용되며, 주파수제어예비력은 단기운영에서 예상하지 못한 전력수급 상황에 대처하기 위해 보유하는 예비력을 뜻한다. 우리나라에서는 주파수제어예비력을 운영예비력(operating reserve)으로 정의하여 사용한다. 그러나 국가별로 운영예비력에 대한 정의가 상이하기 때문에, 본 논문에서는 좀 더 포괄적 의미로서 주파수제어예비력을 사용하여 실시간의 불확실성에 대응하는 예비력을 표현한다.

전력시스템에서 주파수제어예비력은 전력계통의 주파수를 제어하고 시스템을 안정적으로 운영하기 위해 필수적이다. 여기서 중요한 것은 이러한 예비력 용량을 얼마만큼 보유하고 있을지를 결정하는 데 있다. 전력계통의 운용측면에서 응답특성이 빠른 고가의 예비력을 많이 확보할수록 전기품질과 공급신뢰도를 향상시킬 수 있으나, 경제적인 측면에서 비효율

적일 수 있다. 반대로 주파수제어예비력의 용량을 적게 결정한다면, 사고의 발생과 수요변동이 낮을 때에는 경제적일 수 있으나, 부하차단(load shedding) 혹은 공급지장의 발생으로 전기품질저하와 공급신뢰도 하락과 경제적 손실이 발생할 수 있다.

현재 대부분의 국가에서는 주파수제어예비력의 필요용량을 계통상에 발생할 수 있는 사고의 최대크기를 고려하여, 발전기의 최대용량 혹은 수요의 특정 비율로 결정해오고 있다. 이러한 방법을 결정론적(deterministic) 방법이라 하는데, 전력 계통 고유의 확률적 특성과 부하의 변동성을 반영하지 못하기 때문에 계통의 신뢰도와 경제적 측면에서 매우 비효율적이다. 많은 선행 연구에서는 결정론적 방법의 한계를 극복하기 위해서, 전력계통의 확률적 특성을 반영하여 예비력 용량을 결정하는 확률론적(probabilistic) 방법을 통해 최적 용량을 결정하는 방법을 제시해오고 있다.

그러나 대부분의 선행 연구에서의 확률론적 방법은 주파수제어예비력의 전체용량의 크기를 확률론적으로 계산되는 공급지장비용을 고려해 결정하며 1차 예비력, 2차 예비력, 3차 예비력 각각의 필요용량을 결정하는 방법을 제시하지 않는다. 일부 연구에서는 각 예비력 용량을 수급불균형의 크기에 따라 할당하는 방식으로 결정하지만, 각 예비력 간의 기능적, 경제적 상호관계가 고려되지 않는다.

본 논문에서는 실시간 수급균형을 유지하는데 활용되는 주파수제어예비력을 포함한 수급조정자원(balancing resource)의 기능적, 경제적 상호

관계를 고려하여 각 예비력과 직접부하제어(direct load control, DLC)의 필요용량을 결정하는 방법을 제시한다. 특히 일반적으로 예비력 필요용량을 결정하는 문제는 단일단계(one stage) 문제의 형태로 일정한 용량이 그 결과로써 산출되어왔다. 본 논문에서는 예비력 용량결정 문제를 예비력 간 상호관계를 반영하여 수학적으로 다중단계(multi stage)의 형태로 정식화하였다. 또한 수급 불균형의 크기와 각 예비력 가격을 고려한 상태에 따라 예비력 필요용량을 가변적으로 결정하는 방법을 제안하였다. 특히, 본 논문에서 제안한 방법은 단일단계에 문제로 국한되었던 예비력 용량결정 문제를 다중단계의 문제로 최초로 제안하는 새로운 접근방법이라는 데에 의의를 지닌다.

이를 위해 본 논문에서는 2차, 3차 예비력, DLC, 그리고 부하차단의 상호관계를 설명하고, 각 자원이 가지는 상호관계를 수학적으로 정식화하였다. 그리고 제안한 수급조정자원들의 상호관계를 반영하여 각 수급조정자원의 필요용량을 결정하는 방법을 수학적으로 정식화하여, 가변(adaptive) 예비력 필요용량 결정 방법을 동적 프로그래밍(dynamic programming)을 통해 제시하였다.

사례 연구에서는 우선 수급불균형의 크기를 임의보행, 평균회귀, 점프확산으로 모델링하여 수급불균형모델에 따라 최적 용량이 다르게 결정되는 것을 확인하였다. 그리고 제안한 동적계획법을 통한 예비력 필요용량 결정방법이 각 수급상황과 시장상황을 반영하여 예비력 용량을 가변적

으로 결정하면서 전체 예비력 운영비용을 최소화시킬 수 있음을 보였다. 또한 수급모델의 적절한 선택의 중요성을 확인하기 위해, 앞서 3가지로 생성한 각각의 수급모델에서 결정한 용량결정 결과를 다른 수급모델에 적용하였을 때 비효율적이라는 것을 확인하였다. 마지막 사례연구에서는 논문에서 제시한 예비력 간 상호관계를 고려하여, 빠른 응답 특성의 ESS가 3차 예비력으로서 더 높은 가치를 가질 수 있음을 보였다.

주요어 : 주파수제어예비력, 수급 조정 자원, 예비력시장, 예비력 간 상호 관계, 다중단계, 동적계획법

학 번 : 2006-21158

목 차

초록 i

목차 v

그림 목차 viii

표 목차 ix

기호 및 약어 xii

제 1 장 서론 1

1.1 연구의 배경 및 목적 1

1.2 논문의 개요 및 구성 5

제 2 장 이론적 배경 7

2.1 개요 7

2.2 주파수제어예비력 정의 및 분류 9

2.2.1 해외의 주파수제어예비력 정의 및 분류 체계 9

2.2.2 국내의 예비력 정의 및 분류 체계 13

2.3 주파수 제어와 예비력 16

2.3.1 개요 16

2.3.2 1차 제어 16

2.3.3 2차 제어 23

2.3.4 3차 제어 26
2.3.5 주파수 제어 체계 28
2.4 전력시장 구조와 예비력 시장 31
2.4.1 개요 31
2.4.2 시점에 따른 시장의 분류 32
2.5 9.15 정전사태와 예비력 운영 39

제 3 장 예비력 필요 용량 결정 문제 42
3.1 결정론적 예비력 필요용량 결정 방법 42
3.2 확률론적 예비력 필요용량 결정 방법 47

제 4 장 예비력 간의 상호관계를 고려한 필요용량 결정 53
4.1 예비력 시장과 가격 모형 54
4.2 예비력 간의 상호관계를 고려한 실시간 수급균형 57
4.2.1 논문의 가정 57
4.2.2 실시간 수급 균형과 예비력 상호관계에 따른 실행 59
4.3 예비력 간의 상호관계를 고려한 예비력 필요 용량 결정 62

제 5 장 예비력 필요용량 결정 방법 모델링 65
5.1 동적계획법 65
5.2 동적 계획법을 통한 예비력 필요 용량 결정 69

제 6 장 사례 연구 72

6.1 수급 불균형 모형 72

6.1.1 임의보행 모델 74

6.1.2 평균회귀 모델 75

6.1.3 점프확산 모델 77

6.1.4 수급불균형 모델의 단계 및 상태 정의 78

6.2 예비력 간 상관관계를 고려한 최적용량 결정 80

6.2.1 사례연구 개요 80

6.2.2 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 1: 임의보행 81

6.2.1 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 2: 평균회귀 86

6.2.4 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 3: 점프확산 91

6.3 용량결정 문제에서의 수급불균형 모델 선택 96

6.3.1 임의보행 모형의 검증 96

6.3.2 평균회귀 모형의 검증 98

6.3.3 점프확산 모형의 검증 99

6.4 예비력 간 상호관계에 따른 3차 예비력으로써 ESS의 가치 101

6.4.1 사례연구 개요 101

6.4.2 사례연구와 결과해석 104

제 7 장 결론 106

참고문헌 109

그림 목차

그림 2.1 북미의 운영예비력의 기준 10
그림 2.2 주파수제어예비력의 분류 체계 비교 12
그림 2.3 국내 예비력 분류 항목 및 정의 13
그림 2.4 2개의 속도조정률에 따른 1차 제어의 특성 19
그림 2.5 2 개의 속도조정률에 따른 1차 제어의 특성 21
그림 2.6 주파수 변동에 의한 발전과 수요의 특성 22
그림 2.7 주파수 제어체계(framework) 28
그림 2.8 순차적(sequential) 주파수 제어 실행 29
그림 2.9 시간흐름에 따른 전력시장의 분류 32
그림 2.10 하루 전 시장에서의 시간흐름에 따른 참여자별 역할..... 35
그림 2.11 2011년 9월 15일 순환정전 시 주파수 상황 39
그림 2.12 9월 15일 계통운영 관점에서의 2가지 상황 40
그림 6.1 임의보행의 예 75
그림 6.2 평균회귀의 예 76
그림 6.3 점프확산의 예 78
그림 6.4 수급불균형 모델에서의 상태 및 단계 79
그림 6.5 3차 제어의 활성화 시간 101
그림 6.6 3차 제어의 활성화 시간과 2차 제어의 용량의 관계 102

표 목차

표 2.1 북미 NERC의 운영예비력 기준..... 11

표 2.2 유럽 ENTSO-E의 주파수제어예비력 기준..... 12

표 2.3 9.15 이전 국내 운영예비력 기준..... 14

표 2.4 9.15 이후 국내 운영예비력 기준..... 14

표 3.1 국가 별 예비력 필요 용량 기준(2008년 기준)..... 46

표 6.1 예비력 가격 기준 입력 값 80

표 6.2 수급불균형 생성 기준 입력 값..... 80

표 6.3 임의보행 천이확률(stage 1 ⇒ stage 2) 81

표 6.4 임의보행 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3) 81

표 6.5 임의보행 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4) 82

표 6.6 임의보행 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5) 82

표 6.7 단계 1에서의 예비력 용량 결정(임의보행) 83

표 6.8 단계 2에서의 예비력 용량 결정(임의보행) 83

표 6.9 단계 3에서의 예비력 용량 결정(임의보행) 84

표 6.10 단계 4에서의 예비력 용량 결정(임의보행)..... 85

표 6.11 평균회귀 천이확률(stage 1 ⇒ stage 2) 86

표 6.12 평균회귀 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3) 86

표 6.13 평균회귀 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4) 87
표 6.14 평균회귀 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5) 87
표 6.15 단계 1에서의 예비력 용량 결정(평균회귀) 88
표 6.16 단계 2에서의 예비력 용량 결정(평균회귀) 88
표 6.17 단계 3에서의 예비력 용량 결정(평균회귀) 89
표 6.18 단계 4에서의 예비력 용량 결정(평균회귀) 90
표 6.19 점프확산 천이확률(stage 1 ⇒ stage 2) 91
표 6.20 점프확산 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3) 91
표 6.21 점프확산 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4) 92
표 6.22 점프확산 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5) 92
표 6.23 단계 1에서의 예비력 용량 결정(점프확산) 93
표 6.24 단계 2에서의 예비력 용량 결정(점프확산) 93
표 6.25 단계 3에서의 예비력 용량 결정(점프확산) 94
표 6.26 단계 4에서의 예비력 용량 결정(점프확산) 95
표 6.27 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(임의보행) 96
표 6.28 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(임의보행) 97
표 6.29 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(임의보행) 97
표 6.30 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(평균회귀) 98
표 6.31 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(평균회귀) 98
표 6.32 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(평균회귀) 98

표 6.33 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(점프확산) 99

표 6.34 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(점프확산) 99

표 6.35 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(점프확산) 100

표 6.36 2차 예비력 용량 입찰 예시 104

표 6.37 활성화 시간에 전력저장장치의 가치-1 104

표 6.38 활성화 시간에 전력저장장치의 가치-2 105

기호 및 약어

T_e : 터빈-발전기의 전기적 토크

T_m : 터빈의 기계적 토크

f_{ss} : 1차 제어 이후 준정상상태 주파수

R : 발전기 수하특성(Droop Characteristic)

f_{NL} : 최소 부하 주파수(No Load Frequency)

f_{FL} : 최대 부하 주파수(Full Load Frequency)

f_{ref} : 기준 주파수(Nominal Frequency)

D : Damping 계수

β : 전력-주파수 특성정수

sr_i^t : 시간 t에서 발전기 i의 순동예비력 입찰가능량

$P_i^{\max}$: 발전기 i의 최대발전가능용량

P_{ei}^t : 발전기 i의 공급계획량

P_e^t ; 전체 에너지 공급계획량

u_i^t : 발전기 i의 기동정지 지표($i=0$, 정지; $i=1$, 기동)

sr_d^t : 시간 t에서 순동예비력 필요용량

P_g^t : 시간 t에서 공급용량

P_d^t : 시간 t에서 시스템 수요량

Pr_Y : 공급(P_g)가 수요(P_d)보다 부족하거나 같은 확률

UC_{risk} : 기동정지계획 위험도(Unit Commitment Risk)

Pr_X : X[MW] 이상의 부하차단이 발생할 누적확률

m_i^t : 발전기 i의 공급가능여부를 나타내는 지표.($m_i=0$:공급중지, $m_i=1$:공급)

σ_j : 발전기 1기 탈락 시 부하차단 지표 ($\sigma_j=0$: 부하차단 없음, $\sigma_j=1$: 부하차단 발생)

σ_{jk} : 발전기 2기 탈락 시 부하차단 지표 ($\sigma_{jk}=0$: 부하차단 없음, $\sigma_{jk}=1$: 부하차단 발생)

P_{ej} : 발전기 j탈락으로 발생하는 공급지장 에너지량

sr_j : 발전기 j탈락으로 발생하는 순동예비력량

$\Gamma(sr_d)$: 순동예비력량이 sr_d일 때의 사회적 비용

$\Pi(sr_d)$: 순동예비력량이 sr_d일 때의 에너지 및 순동예비력 공급비용

$E(sr_d)$: 순동예비력량이 sr_d일 때의 공급지장비용 기댓값

P_r^t : 시간 t에서 수급 불균형의 크기

rl_l^t : 시간 t에서 각 수급조정자원 l의 상태($\forall l=2,3,4,5$: 2: 2차예비력, 3: 3차 예비력, 4: DLC, 5: 부하차단)

r'^t_l : 시간 t에서 수급조정자원 l의 실행량($\forall l=2,3,4,5$)

n_l^t : 예비력 자원 l의 실행상수

x_k : 시간 k에서의 상태

u_k : 제어 변수

w_k : 확률 변수

μ : 정책(policy)

f_k : 단계 k에서 발생하는 비용

V_k : 최적 기대 비용

AS : 계통운영보조서비스 (Ancillary Service)

SO : 계통운영자(System Operator)

DLC : 직접부하제어(Direct Load Control)

ESS : 전력저장장치(Energy Storage System)

NERC : North American Electric Reliability Corporation

ENTSO-E : European Network of Transmission System Operators for Electricity

UCTE : Union For The Co-ordination of the Transmission of Electricity

FERC : Federal Energy Regulatory Commission

EMS : 계통운영시스템(Energy Management System)

AGC : 자동발전제어(Automatic Generation Control)

ACE : 지역제어오차(Area Control Error)

ED : 급전계획(Economic Dispatch)

LOLP : 공급지장확률(Loss of Load Probability)

EENS : 공급지장전력량 기대치(Expected Energy Not Supplied)

VOLL : 공급지장비용(Value of Lost Load)

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전력산업은 전통적으로 정부의 규제를 받는 수직 통합 형태의 독점 기업이 운영하는 것이 보편적이었다. 그러나 1980년대 이후 영국과 미국 등을 필두로 하여 세계 많은 국가들은 전력산업에 경쟁을 도입하여 자유화(liberalization), 탈규제화(deregulation)와 구조개편(restructuring)을 추진해왔다[1-4]. 이러한 큰 변화 과정의 중요한 결과 중 하나는 과거 수직통합구조의 단일 기업에서 공급하던 발전, 송전, 계통운영보조서비스(ancillary service, AS) 등이 전력시장에서 상품(commodity)으로 거래되기 시작했다는 점이다. 특히 계통운영보조서비스는 새롭게 상품으로서 인식되었지만, 사실은 전력시스템이 형성되어 전기를 제공한 이래 100여 년 전부터 존재해왔다. 단지 과거 수직통합 회사의 일상적인 운전 중 당연한 부분으로 간주되어 상업적 측면은 중요하게 인식되지 못해왔을 뿐이다. 계통운영보조서비스는 전력시장 개설이후 내부적 기능에서 분리되어 상품으로 표출되었기 때문에, 과거보다 더 높은 주목을 받기 시작했다[5-8]. 또한 최근 이상기후의 발생빈도 및 영향력 증가와 신재생에너지의 계통연계 확대로 수요 및 공급의 불확실성이 더욱 커졌기 때문에, 계통운영보조

서비스의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

계통운영자(system operator, SO)는 항시 유효전력의 수요와 공급의 균형을 유지하여야할 책임이 있으며, 이 때 필요한 계통운영보조서비스는 주파수제어보조서비스(frequency control ancillary service)이다. 전력계통에 발전력과 부하의 양이 일치하지 않으면 주파수의 변화가 나타나 계통의 안정성과 전기품질에 악영향을 미친다. 이러한 현상을 방지하기 위해 시시각각 발생하는 수요와 공급의 불일치를 해소시키는 보조서비스가 필요하며, 이는 예비력, DLC, 부하차단으로 구성된 수급조정자원을 통해 이루어진다.

예비력은 예상치 못한 공급차질과 수요증가에 대응하기 위해 필요한 공급가능 자원을 의미하며, 기본적으로 사고(event)와 정상상황(non-event)의 목적기준으로 분류된다. 사고는 전력계통에 연결된 발전기 등의 부속품의 예상치 못한 고장을 의미하며, 정상상황은 실시간 수요의 변동에 따라 공급을 조정하는 사고가 발생하지 않은 상황을 뜻한다[7-13]. 그러나 최근 불확실성의 증가는 정상상황에서도 사고기준의 예비력을 필요로 하는 큰 폭의 수급 불균형을 야기하기도 하였다. 가장 대표적인 예는 2011년 9월 15일 국내에서 발생한 순환정전이며, 사고발생 없이 이상기온으로 급증한 수요를 공급 능력이 감당하지 못해 발생하였다. 따라서 높아진 변동성에 대응하기 위해서는 예비력 용량을 사고의 기준이 아닌 변동성과 불확실성을 고려하여 결정할 필요가 있다.

경쟁시장 환경에서 SO는 이러한 예비력의 분류기준에 따라 각각의 주파수제어예비력 필요용량을 결정해왔다. 일반적으로 예비력 필요용량은 과거 수직통합 구조 하에서부터 현재에 이르기까지 계통에 발생할 수 있는 가장 큰 사고의 크기를 기준으로 결정된다. 이 방법을 결정론적 방법이라 하며, 적용과 이해가 쉽다는 장점을 가진다. 그러나 결정론적 방법은 전력시스템과 수요의 확률적 특성을 반영한다는 한계를 지닌다. 또한 예비력과 공급지장 사이의 경제적 특성을 고려하지 못하였기 때문에 경제적으로 비효율적일 수 있다. 이러한 결정론적 방법의 한계를 극복하기 위해, 많은 연구들에서는 확률론적 방법을 통한 예비력 필요용량 결정 방법을 제시해왔다[5],[8-10],[14-43]. 확률론적 방법은 전력수요 및 전력계통의 확률적 특성을 반영하여 정의된 평가기준에 따라 예비력 필요용량을 결정한다. 이 방법은 계통의 불확실성과 경제성을 고려하여 예비력 용량을 결정한다는 장점을 가진다.

그러나 선행연구들은 대부분 주파수제어예비력의 전체용량을 공급지장비용과 예비력공급비용을 비교하여 결정하는 데 그쳤다. 다시 말해, 세부 예비력(1차, 2차, 3차 예비력)의 필요용량을 각각 결정하는 방법은 제시하지 않는다. 일부 선행연구에서는 세부 예비력 용량을 실시간 수요를 확률적으로 전개하여, 각 예비력용량의 할당하는 방식으로 결정하는 방법을 제시하였지만 예비력 간의 기능적, 경제적 상호관계는 고려하지는 않았다.

본 논문에서는 예비력을 포함한 수급조정자원의 필요용량을 각 자원

간의 기능적, 경제적 상호관계를 고려하여 결정하는 방법을 제안한다. 이를 위해 주파수 기준에 따른 예비력 분류체계를 설명하고, 예비력간의 상호관계를 고려한 수급균형을 수학적으로 정식화하였다. 그리고 수급불균형의 상황과 경제적 상황의 변화에 따라 예비력 용량을 가변적으로 결정하는 예비력 용량 결정 방법을 동적계획법으로 모델링하여 제안하였다. 본 논문이 제시한 방법은 일반적으로 단일단계 형태로서 운영 이전에 예비력 필요용량을 결정했던 문제를 실시간에 가깝게 결정하는 문제로 전환시켜, 다중단계의 형태로 제안하였다는 데 의의가 있다.

과거 전력계통에서는 전력수요가 비탄력적이며 예비력 공급자원의 융통능력이 부족하기 때문에 예비력 용량결정은 사전에 결정될 필요가 있었다. 그러나 미래 스마트그리드 체계 하에서는 실시간 정보가 공유되며, 예비력 가용자원에 신재생에너지, 전력저장장치(energy storage system, ESS), 수요자원 등이 포함되어 응동능력이 향상될 것이기 때문에, 실제 운영상황에 따라 예비력 필요용량을 결정하는 것이 가능케 된다. 본 논문에서는 이러한 상황을 고려하여 예비력 필요용량을 실시간과 가까운 시점에서 결정할 수 있다면, 단일단계보다는 다중단계의 용량결정 방법이 더 효율적일 수 있다는 사실을 보인다.

1.2 논문의 개요 및 구성

본 논문에서는 주파수제어예비력을 주파수 제어기준에 따라 분류하고 각 예비력간의 상호관계를 수학적으로 정식화하여, 이러한 상호관계를 고려한 예비력 필요용량 결정방법을 다중단계 문제로 동적계획법으로 모델링하였다.

제 1장에서는 논문의 연구 배경과 필요성, 그리고 연구구성에 대해 설명한다.

제 2장에서는 논문을 이해하는데 필요한 이론적 배경을 설명한다. 북미와 유럽, 그리고 국내에서의 예비력 정의 체계와 기능적 특성, 그리고 관련된 전력시장에 대해 설명한다. 또한 9.15 정전사태를 분석하여 예비력 운영에 대한 시사점을 도출한다.

제 3장에서는 예비력 용량결정 문제에 대해 논한다. 실제계통의 사례와 선행연구 분석을 통해, 결정론적 결정 방법과 확률론적 결정 방법을 수학적으로 정리하여 설명한다.

제 4장에서는 예비력간의 기능적, 경제적 상호관계를 고려한 필요용량 결정 방법을 제시한다. 우선 논문에서 고려하는 경쟁시장과 입찰가격을 수학적으로 정식화한다. 그리고 예비력간의 상호관계를 통한 실시간 수급균형을 수학적으로 정식화하여 설명한다.

제 5장에서는 동적 계획법을 통한 예비력 용량 결정 방법을 수학적으

로 정식화한다. 이를 위해 우선 동적계획법에 대해서 살펴본다. 그리고 경제적 상황과 수급 불균형상황에 대응하는 가변적 필요용량결정 방법을 동적 계획법을 통해 모델링한다.

제 6장에서는 본 논문에서 제안하는 모델에 대한 사례연구를 제시한다. 3가지 수학적 수급불일치 모형에 제안한 용량 결정 방법을 적용하여, 예비력 간 관계에 따라 비용 최적화를 이루며 최적용량이 결정되는 것을 보인다. 또한 고려한 수급 불균형 모형과 실제 모형과의 차이에 따라 평균 예비력 운영비용이 어떻게 변화하는지를 보임으로써, 수급 불균형 모형의 적절한 선택의 중요성을 검증한다. 마지막 사례연구로서 예비력 간 상호관계를 고려하였을 때, ESS와 같은 빠른 응동능력을 가진 자원이 3차 예비력 자원으로써 가지는 가치를 제안한다.

제 7장에서는 본 논문의 결론으로 연구 결과를 정리한다.

제 2 장 이론적 배경

제 2장에서는 논문의 전체 주제에 대한 이론적 배경으로서 예비력의 정의와 분류, 예비력과 관련된 전력시장에 대해 설명한다. 그리고 9.15 순환정전 사태를 분석하여 예비력 운영에 대한 시사점을 도출하였다.

2.1 개요

전력시장 개설 후, SO는 실시간 수급 균형에 책임을 진다. 이를 위해 SO는 에너지 시장(energy market)에서 에너지의 급전계획(economic dispatch, ED)을 결정하여 하루 동안의 공급계획을 세운다. 이 때 에너지 공급계획은 15분, 30분, 또는 1시간 단위로 이루어지며, 발전기 출력 배분은 다음 출력이 결정될 때까지 예측 불가능한 변화가 발생하지 않는다는 가정 하에서 이루어진다. 그러나 실시간에서의 불확실성은 수급 균형의 변동을 야기할 수 있다. 이 때 수급 균형을 유지하기 위한 별도의 서비스 체제를 주파수제어서비스라고 하며, 이를 위한 주요 공급자원을 예비력이라고 한다. 북미에서는 실시간 수급변동에 대응한다는 의미에서 운영 예비력이라는 용어를 보통 최상위 개념으로 사용하며, 유럽 지역에서는 주파수를 안정하게 유지한다는 의미에서 주파수제어예비력을 최상위 개념으

로 사용한다. 그러나 운영 예비력은 종종 계통에 병입된 발전기가 공급하는 순동 예비력(spinning reserve)로 사용되거나 포함하는 범주의 의미가 국가에 따라 상이하다[8-13],[23],[38]. 따라서 명확한 이해를 위해 본 논문에서는 주파수 제어에 필요한 모든 자원으로써 1차 예비력(primary control reserve), 2차 예비력(secondary control reserve), 3차 예비력(tertiary control reserve), DLC, 부하차단을 수급조정 자원으로 하며, 수급균형 자원의 일부로서 주파수 제어에 참여하는 예비력(1차 예비력, 2차 예비력, 3차 예비력)을 주파수제어예비력으로 부르겠다.

예비력을 지칭하고, 구분하는 용어는 국가 및 SO에 따라 다양하다. 우리나라의 예비력을 정의하고 구분하는 기준은 북미 전력계통 신뢰도 관리기구(North American Electric Reliability Corporation, NERC)의 기준과 유사하지만 예비력을 설명하는 용어와 기준은 북미에서도 제어지역에 따라 상이하다[11-13]. 따라서 본 논문에서는 의미를 명확하게 전달하기 위해, 주파수제어기준에 따라 예비력을 분류한 유럽송전망운영자(European Network of Transmission System Operators for Electricity, ENTSO-E)의 과거 형태이자 현재 주요 협의체인 송전조정연합(Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity, UCTE)의 용어를 기준으로 사용하였다.

2.2 주파수제어예비력 정의 및 분류

2.2.1 해외의 주파수제어예비력 정의 및 분류 체계

예비력의 정의하고 분류하는 체계가 국가별로 상이하기 때문에 주요한 예비력 운영 기준에 따라 비교하고, 체계화 시키는 것은 매우 중요하다. 본 절에서는 기본적으로 북미의 주요 기준, 유럽의 주요 기준에 따라 주파수 제어 예비력을 분류하여 설명한다.

북미의 운영 예비력 체계는 그림 2.1과 같이 정리할 수 있다[38]. 앞 절에서 언급했던 것처럼, 북미에서는 운영예비력을 실시간 계통에서 운영하는 예비력의 포괄적 개념으로 사용한다. 그러나 미국의 PJM과 CAISO는 운영 예비력을 1차 제어에 따른 발전기 조속기 동작을 제외한 예비력으로 사용하기 때문에, 용어의 사용이 어느 기준을 따른 것인지 확인하는 것은 매우 중요하다[11-13].

북미 운영예비력 기준에서 가장 주목해야할 부분은 운영예비력을 목적기준에 따라 사고와 비사고로 분류한 것이다. 비사고 범주(category)는 정상 상태(normal operation)에서 지속적으로 발생하는 수요의 변동과 예측된 수요의 증가량에 대응하는 예비력이 포함된다. 조정예비력(regulating reserve)는 정의상 계통운영보조서비스의 신호에 따라 자동적으로 작동하는 자동발전제어(automatic generation control, AGC)를 통해

제어되는 예비력을 의미한다. 여기서 비사고 범주에는 1차 제어에 해당되는 부분이 제외되어 있는데, 그 이유는 미국의 경우 계통의 크기가 크기 때문에 발전기 탈락 등의 사고가 발생하지 않으면 1차 제어의 불감대(dead band)를 벗어나지 않다는 의미를 내포하고 있다. 부하추종(load following)은 예측한 20분 정도 이상 장주기 변동을 대응하는 예비력으로써 정의된다.

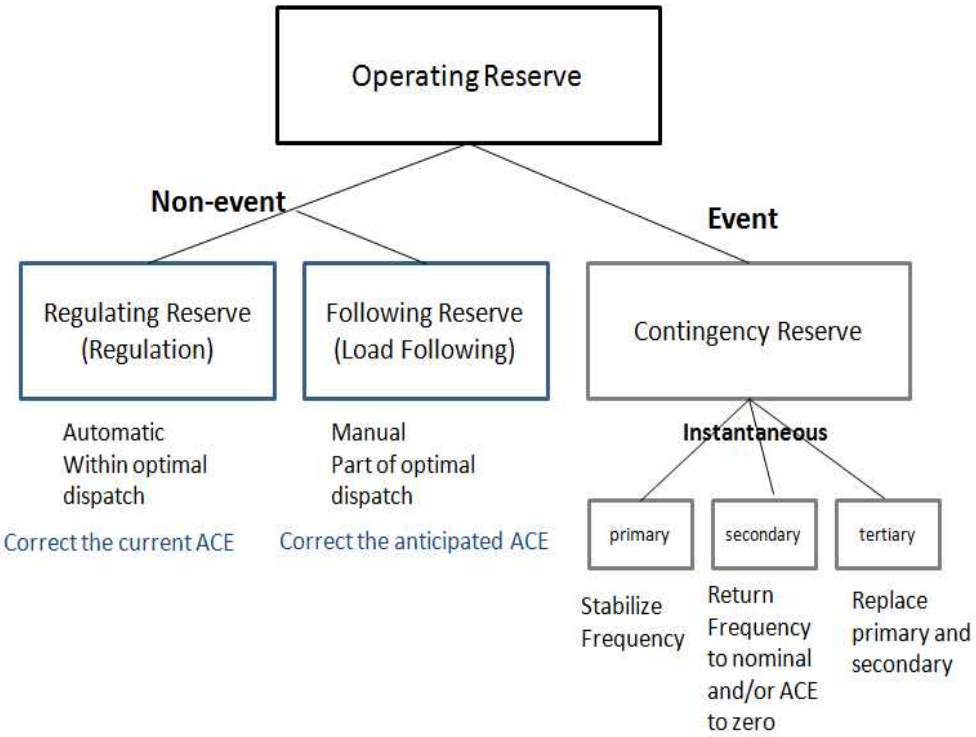

그림 2.1 북미의 운영예비력의 기준

사고항목의 예비력은 상정고장이 발생하였을 때 대응하는 예비력을 정의한 것이다. 상정고장이 발생 시 주파수의 하락에 대한 발전기 및 부하의 자동적 대응으로서 1차 제어가 시작되며, 2차 제어는 1차 제어 종

료 후 남아있는 준정상상태 주파수를 본래 정상 주파수로 돌리기 위해서 작동된다. 그리고 3차 제어는 보통 발전기 탈락 등의 대형 사고가 발생하면 그 용량만큼 복구 시켜주기 위해 실행된다.

표 2.1 북미 NERC의 운영예비력 기준

목적 기준	역 할	
정상운전 유지	조정예비력 (Regulating Reserve)	- 자동발전제어(AGC) - 규정된 범위 내에서 계통 주파수 유지
	부하추종 (Load Following)	- 20분 내외의 장주기 변동 및 큰 부하 변동 대응
상정고장 대응	주파수응답예비력 (Frequency Responsive Reserve)	- G/F(Governor Free) 운전에 의한 제어실시 - 계통외란 발생 시 대응 주파수 이탈 방지
	순동예비력 (Spinning Reserve)	- 순동 상태에서 상정사고 이후 계통 주파수를 복구시키기 위한 역할
	비순동예비력 (Non-Spinning Reserve)	- 비순동 상태에서 상정사고 이후 계통 주파수를 복구시키기 위한 역할
	대체예비력 (Supplemental Reserve)	- 대규모 상정사고에 대응 - 순동 및 비순동 예비력에 대한 후비 (Back-up) 예비력

유럽의 ENTSO-E에서는 예비력을 각 제어동작을 담당하는 공급자원으로 정의한다. 이에 따라 주파수제어예비력을 주파수 제어기준으로 1차 제어 예비력, 2차 제어 예비력, 그리고 3차 제어 예비력으로 구분한다.

표 2.2 유럽 ENTSO-E의 주파수제어예비력 기준

제어 기준	역 할	
주파수 제어 기준	1차 제어 예비력 (primary control reserve)	- G/F 운전에 의한 제어실시 - 미소수요변동 - 계통외란 발생 시 주파수 이탈 방지
	2차 제어 예비력 (secondary control reserve)	- 주파수 편차에 대한 실시간 AGC - 상정사고 시 정상 주파수 회복
	3차 제어 예비력 (tertiary control reserve)	- 일간수요예측 오차에 대한 급전조정 - 상정사고 시 정상 주파수 회복 - 후속사고 대비를 위한 2차 제어예비력 추가 확보

NERC, ENTSO-E, 그리고 우리나라의 주파수제어예비력 분류체계를 비교하여, 유사점을 중심으로 대응시키면 다음 그림 2.2와 같이 정리할 수 있다.

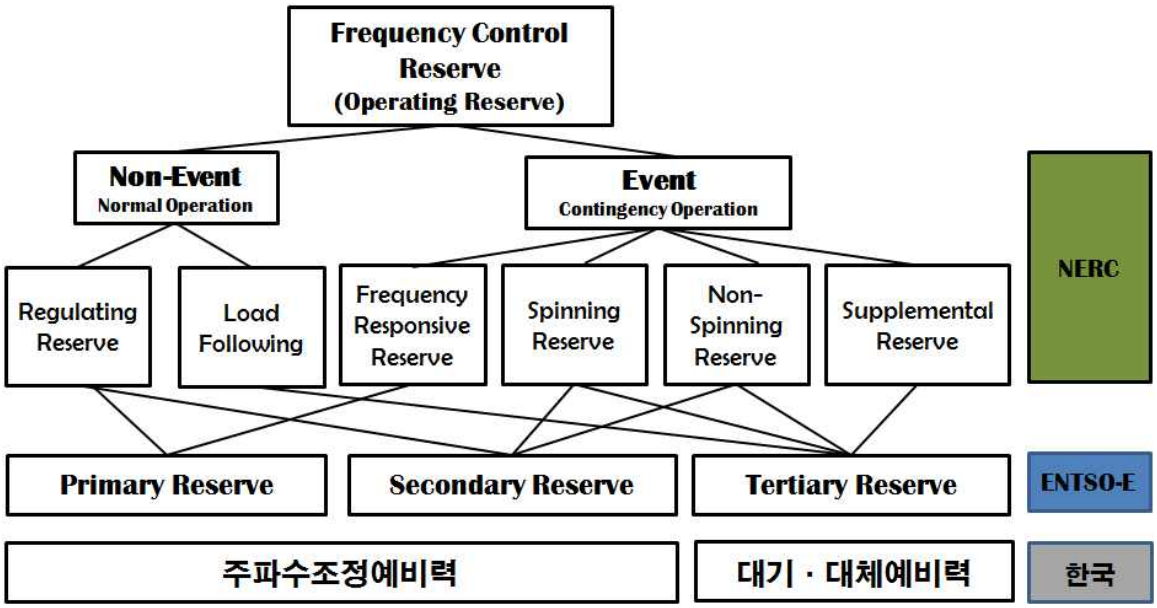

그림 2.2 주파수제어예비력의 분류 체계 비교

2.2.2 국내의 예비력 정의 및 분류 체계

국내 예비력 분류체계 및 운영예비력 기준은 2001년 전력시장 개설과 함께 그림 2.3과 같이 정의되었다. 우리나라에서는 주파수제어예비력을 운영예비력이라 정의한다[46-48].

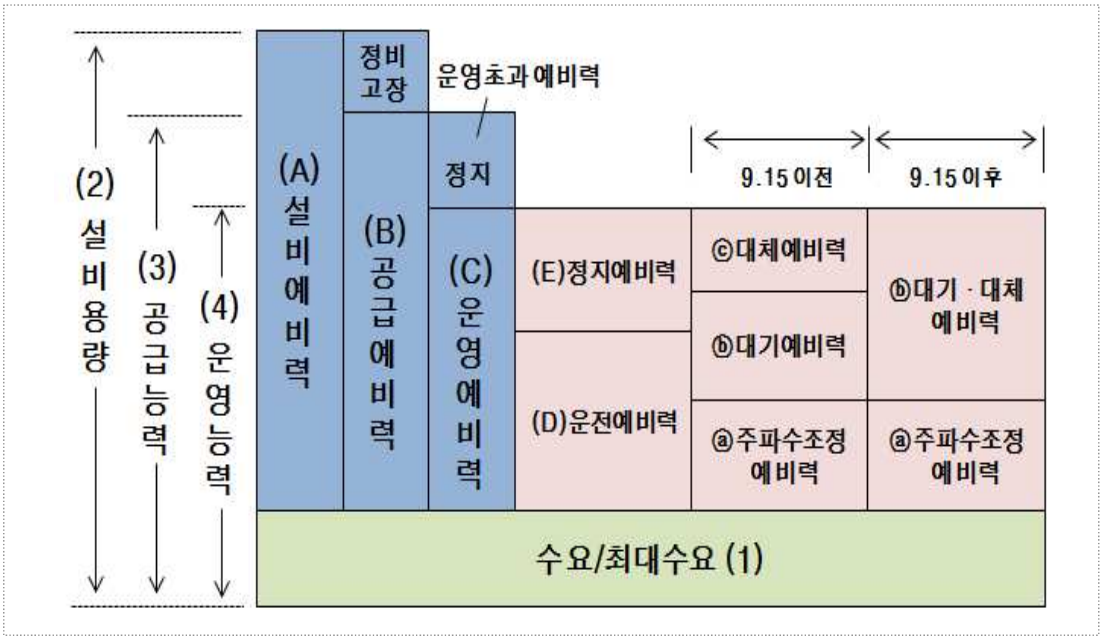

그림 2.3 국내 예비력 분류 항목 및 정의

2001년 운영예비력 기준이 정의된 이후, 2011년 9.15 순환정전이 발생하기 전까지 그 형태의 변화는 없었다. 9.15 순환정전 사고 이전의 운영예비력 기준에 따른 각 예비력의 정의는 다음의 표 2.3과 같다.

표 2.3 9.15 이전 국내 운영 예비력 기준

예비력	구성 및 목적
주파수조정 예비력	• **순시**에 자동으로 응동하여 미소 수요변화 대응 • G/F, AGC로 구성
대기예비력	• 수요예측오차와 발전설비 불시정지에 대응 • 운전상태(**10분** 이내), 정지상태(**20분** 이내)로 구분
대체예비력	• 대단위 고장(발전소 및 송전선 고장정지)에 대비 • **120분** 이내 이용 가능한 예비력

9.15 순환정전 사고 이후, 예비력의 속응성을 강화시키는 방향으로 운영예비력의 기준이 변화하였다. 전체 용량은 4000MW로 유지한 채, 첨두부하가 높은 기간 동안에 응답속도가 빠른 예비력의 비중을 증가시켰다. 응답속도가 빠른 예비력의 비용이 높기 때문에, 기준개편이후 비용효율성 문제와 함께 과다예비력에 대한 의문이 제기되고 있다.

표 2.4 9.15 이후 국내 운영 예비력 기준

예비력	구성 및 목적
주파수조정 예비력	• 이전과 변동사항 없음
대기·대체 예비력	• 발전설비 불시정지 및 수요예측 오차, 발전소 및 송전 설비 고장정지 등에 대비 • (**동·하계 전력수급대책기간**): **20분** 이내 이용가능 • (**이외 기간**): **120분** 이내 이용가능

9.15 순환정전 이후 개편된 현재 운영예비력 기준은 NERC의 목적기준과 ENTSO-E의 제어기준을 혼합한 형태를 보인다. 결과적으로 국내

운영예비력 기준은 더욱 불명확해졌고, 정의와 실제 역할이 정확히 일치하지 않는 문제를 가지고 있다. 가령, 주파수조정예비력은 1차 예비력과 2차 예비력을 통합한 개념이지만 실제 역할은 각각 주파수 이탈방지, 주파수 회복으로 상이하다. 또한 대기·대체 예비력은 규정상 큰 폭의 수요변동 시 활용도 포함되지만, 거의 상정고장 상황에서만 적용되고 있는 실정이다. 따라서 현행 운영예비력 기준은 비효율적인 예비력 실행을 야기할 수 있기 때문에, 의미와 실제적 사용이 일치하는 방향으로 개편되어야한다.

2.3 주파수 제어와 예비력

2.3.1 개요

전력 시스템에서 실시간 운영의 목적은 주파수와 전압을 적정 범위 내에 유지하며, 변동하는 부하에 전력을 공급하는 것이다. 본 절에서는 주파수를 안정적으로 유지시키는 제어체계와 그 특성을 설명한다.

주파수 제어에 대한 기본적인 제어체계(framework)는 과거 수직통합 구조에서 만들어졌다. 시장 구조하의 주파수 제어체계는 국가마다의 시간, 기술적 기준에 차이가 있지만 과거의 구조와 비슷하게 유지해오고 있다. 주파수 제어 체계는 기본적으로 1차 제어, 2차 제어로 구성되어왔는데, 경쟁시장 체계에서는 3차 제어가 추가되어 3 단계로 이루어져있다 [44],[49-52].

2.3.2 1차 제어

1차 제어는 수 초 단위의 터빈-조속기 작동을 의미하며, 제어의 목적은 동기화 지역(synchronous area) 내에서 수요와 공급을 일치시키는 것이다. 또한 발전기 탈락이나 수요의 급변 등의 수급상의 큰 변동이 발생했을 때 주파수의 급락을 방지하는 역할을 한다. 즉, 전력계통에 외란, 예측오차에 의해 수급 균형이 무너졌을 때 1차 제어는 필요한 제어를 즉시

자동적으로 시작한다. 따라서 1차 제어에 참여하는 공급자원은 빠른 출력의 조정을 위해 급전되어 활성화 상태에 있어야한다. 1차 제어는 주파수 추종 운전(governor free), 조속기-터빈 제어(governor-turbine control), 그리고 주파수 응답(frequency response)로 불리기도 한다[52-54].

조속기에서는 회전자(rotor)의 속도변화를 입력받아 전기적 전력과 기계적 전력의 균형을 다시 맞추기 위해, 밸브를 조정하는 피드백 동작을 수행한다. 그러나 발전기는 주파수에 대한 민감도로 인하여 수하(droop) 특성이 발생하기 때문에, 주파수를 완전하게 회복시키지 못한다. 터빈-조속기 제어 작용은 터빈-발전기에는 회전하는 관성에 운동에너지가 저장되어, 계통 부하가 순간적으로 급증하면 저장되어있던 운동에너지가 방출되는 것을 의미한다. 이 때, 터빈-발전기들의 전기적인 토크(T_e)가 증가한 부하에 응하기 위해 증가하고, 이 때 터빈의 기계적 토크(T_m)는 일정하게 유지된다. 기계적 토크보다 전기적 토크보다 크게 되면 스윙 방정식(swing equation)에 따라 터빈-발전기는 감속을 하게 되고, 운동 에너지가 방출되기 때문에 회전자 속도가 감소하게 된다. 다시 말해, 수요가 공급보다 크다면 저장된 운동에너지가 방출하여 결과적으로 주파수는 떨어져 시스템 주파수가 감소하게 된다. 만약 반대로 공급이 수요보다 더 많게 된다면 반대로 시스템 주파수는 증가한다[51-54]. 이를 수식으로 정식화 하면 식 (2.1)과 같다.

$$\Delta P_m = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R}\Delta f_{ss} \tag{2.1}$$

여기에서 Δf_{ss}는 주파수의 변화, ΔP_m는 터빈의 기계적 출력량의 변화량, 그리고 ΔP_{ref}는 유효전력 기준 값의 변화량을 의미한다. R은 제어상수 혹은 속도조정률이라 불린다. 즉, R 값은 조속기의 수하 특성을 나타낸다. 발전기의 수하특성은 해당 계수인 R에 의해서 결정되는데 다음 (2.2)로 표현할 수 있다[54].

$$R = \frac{Percent\ speed\ \text{or}\ frequency\ change}{Percent\ power\ output\ change} = \left(\frac{f_{NL} - f_{FL}}{f_{ref}}\right) \tag{2.2}$$

식 (2.2)에서 f_{NL}은 최소 부하 주파수(no load frequency)를 의미하고, f_{FL}은 최대 부하 주파수(full load frequency)를 의미한다. 즉, 기준 출력에 대해서 발전기에 부하를 연결하지 않았을 때와 발전기의 최대 용량만큼 부하를 연결하였을 때의 차이를 비율로 나타내면 R값을 계산할 수 있게 되는 것이다. R값의 절대 값이 작을수록 변동에 대한 부하분담을 더 많이 한다[51].

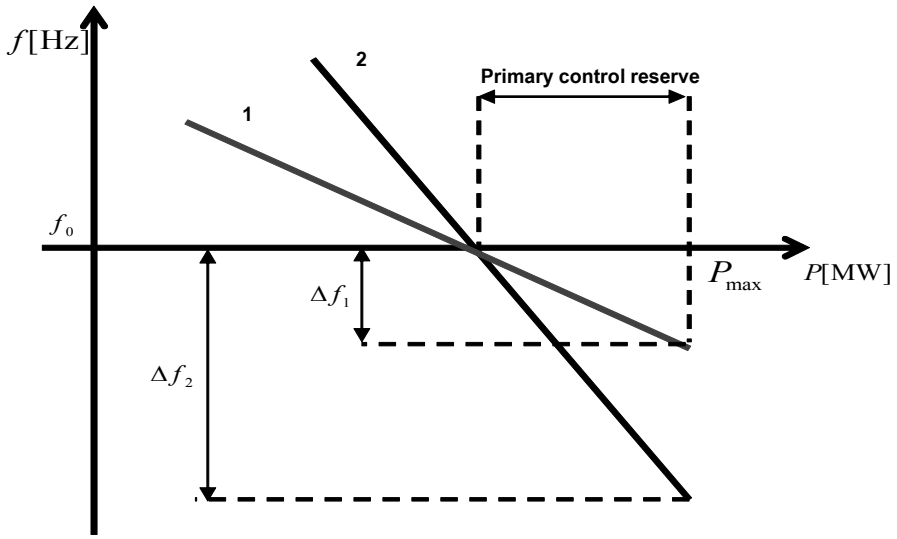

그림 2.4 2개의 속도조정률에 따른 1차 제어의 특성

1차 제어에 참여하는 발전기의 기여도는 발전기의 속도조정률과 1차 제어예비력 용량에 달려있다. 그림 2.4는 속도조정률이 다른 두 개의 발전기의 제어용량과 주파수 하락의 관계를 설명하고 있다. 1차 제어에 참여하는 발전기용량이 동일할 때, 모든 예비력 용량이 투입되어야 한다면 주파수 하락 폭은 2의 경우가 1의 경우보다 더 크다[44],[51].

다수의 발전기가 연계되어 있을 경우에서의 운전특성은 연계된 발전기의 합으로 부하에 증가에 대응한다. 충분한 1차 제어의 용량은 주파수 하락을 제약한다.

$$\Delta P_T = \sum_{k=1}^{M} \Delta P_{mk} = \sum_{k=1}^{M} \Delta P_{refk} - \sum_{k=1}^{M} (\frac{1}{R_k}) \Delta f_{ss} \qquad (2.3)$$

ΔP_T는 터빈의 기계적 출력의 총 변화량을 의미하며, 여러 수하특성을 가진 M 기의 발전기가 포함된 제어계통의 지역 주파수 특성은 (2.3)식의 마지막 항으로 나타난다[53].

요컨대 부하가 변동할 때 계통 주파수는 가속 혹은 감속하게 되고, 1차 제어를 통해 과도상태를 지나 결과적으로 새로운 주파수에서 안정된 상태가 된다. 그 값이 초기의 설정 값과 다르기 때문에 준정상상태(quasi-steady state)의 값이라 한다. 1차 제어는 수급변동에 민감하게 반응하여, 우선적으로 안정화시키지만 계통 주파수가 준정상상태(f_{ss})에 머물기 때문에 추가적인 제어가 필요하다[22],[51-54].

$$f_{ss} = f_{ref} + \Delta f_{ss} \tag{2.4}$$

한편, 1차 제어는 모든 주파수 변화에 응동하는 것은 아니다. 불감대로 부르는 주파수 대역 내의 미세한 변동에 대해서는 1차 제어는 응답하지 않는다. 보통 SO는 계통에 1차 제어에 참여하는 발전기가 응답하는 주파수 변동 기준을 200[mHz] 이하로 설정하여, 해당 기준이상의 변동에 대해서는 1차 제어에 참여하는 모든 발전기가 적절한 응답을 할 수 있도록 한다[44]. 미국의 경우 계통의 규모가 크기 때문에 수요의 불확실성에 의한 변동은 대부분 불감대 안의 주파수 변동을 야기하기 때문에, 발전기 탈락 등의 상정 고장의 발생이 아닌 경우 1차 제어가 작동하지 않는다고 보는 견해도 있다.

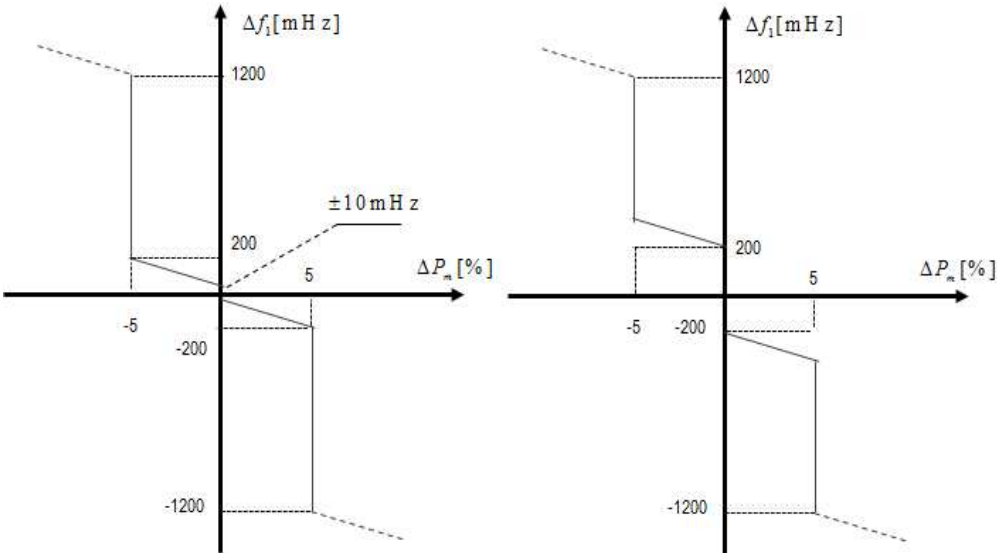

그림 2.5 2 개의 속도조정률에 따른 1차 제어의 특성[51]

한편, 전체공급과 수요가 일치하지 않으면, 부하 자체에서 주파수 변동을 억제하려는 성질을 나타낸다. 이를 수요의 Damping 현상이라 하는데, 동기 모터(Synchronous motor)와 같은 주파수 변화에 민감한 부하들이 주파수 변동에 따라서 그 부하의 크기 역시 변하는 것을 의미한다. 주파수 변화에 따른 부하의 변화는 Damping 계수(D)로 나타난다. 즉 수요가 변화하면(ΔP_L)하면, 발전기의 조속기를 통한 출력변화(ΔP_G)와 수요의 Damping 현상에 따른 변화(ΔP_D)로 대응한다. 여기서 ΔP_L과 ΔP_D 및 ΔP_G의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta P_L = \Delta P_G - \Delta P_D = \left(-\frac{1}{R} - D\right)\Delta f_{ss} = -\beta \Delta f_{ss} \tag{2.5}$$

위의 식에서 β는 발전기의 수하특성과 수요의 Damping 특성을 모두 고려한 시스템의 주파수 민감도를 의미하며, 전력-주파수 특성정수(계통 특성 정수)라 한다.

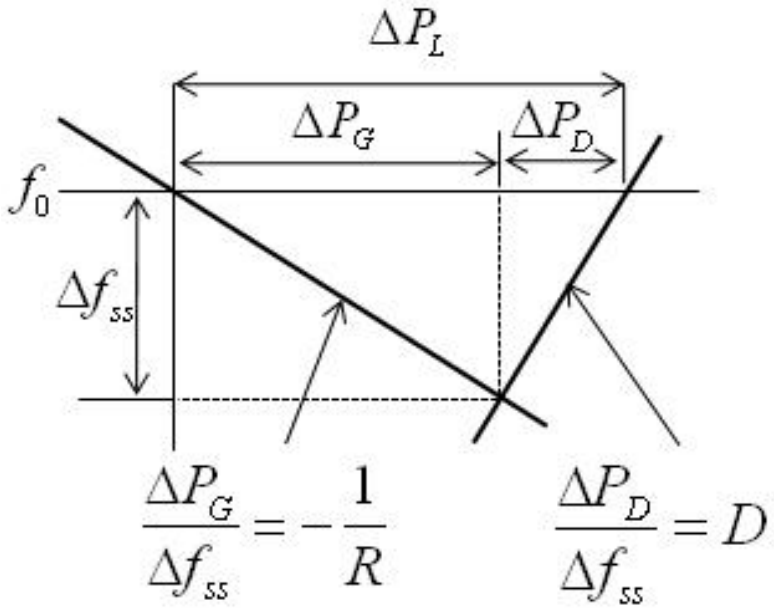

그림 2.6 주파수 변동에 의한 발전과 수요의 특성[54]

2.3.3 2차 제어

2차 제어는 1차 제어에 비해 상대적으로 느리며(수십 초~수 분) 중앙 집중적(centralized) 제어방식으로 처리되는 특성을 지니고 있다. 보통 주파수에 대한 제어는 1차와 2차가 모두 관여한다. 다만, 주파수 편차가 발생하면 1차 제어는 즉각적으로 반응하지만 2차 제어는 계통의 중심에 위치한 계통운영시스템(energy management system, EMS)의 신호주기(2초~4초)에 맞추어 반응한다. 즉, 1차 제어가 분산된 개별 발전기 및 발전소를 통해 이루어지는 것에 반해, 2차 제어는 중앙 통제소(central regulator)를 통해 실현된다[50-54].

앞선 1차 제어는 새로운 안정 상태로 복귀시켜주지만, 시스템 주파수는 정상 상태 오차 Δf_{ss}만큼 변화한 비정상(off-normal) 주파수 상태로 머물러 있다. 비정상 주파수는 전력 시스템 운영과 신뢰도에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 큰 주파수 변동은 전기 기기에 손상을 줄 수 있으며, 효율성도 떨어뜨린다. 게다가 송전선로 과부하를 야기하며, 계통 보호에도 악영향을 미칠 수 있다. 그렇기 때문에 2단계는 주파수 변화(Δf_{ss})를 제거하는 것을 주요한 목표 중 하나로 하며, 부하-주파수 제어(load frequency control, LFC) 혹은 자동발전제어(automatic generation control, AGC)으로 불린다. 그러나 좀 더 정확히 기술하면, 자동발전제어가 좀 더 포괄적인 의미를 지녔으며 부하-주파수 제어는 자동발전제어의 주요한 기능 중 하나이다[11], [51].

대규모 전력계통에서는 각 제어 지역(control area)이 연결선(tie-line)으로 서로 연계된 인근 제어 지역과 서로 계획된 양의 전력을 교환(interchange)하기도 한다. 또 다른 2차 제어의 목표는 교환하는 전력량을 계획 값으로 유지시키는 것이다. SO는 중앙 통제소를 통해 1~5초 내의 지연(delay)을 유지하면서 연결선의 전력 교환량을 측정(measurement)한다. 따라서 2차 제어는 1)중앙 제어 체계, 2)연계 계통의 전력 교환량 측정, 3)주파수 변화 측정, 4)2차 제어에 참여하는 발전기의 송전선로 상태와 제어신호로 구성되어 있다.

2차에 제어에 의해서 회복되는 발전량은 지역제어오차(ACE, area control error)으로 표현된다[53].

$$\begin{aligned} ACE &= (P_{tie} - P_{tie,sched}) - \beta \Delta f_{ss} \\ &= \Delta P_{tie} - \beta \Delta f_{ss} \end{aligned} \tag{2.6}$$

여기서, ΔP_{tie}는 연계선 전력 교환량의 변화량이며, Δf_{ss}는 제어지역상의 주파수 값의 변화량으로 기준 주파수 f_0와의 차이 값이다. 그러나 본 논문에서는 단일 계통만을 고려하였기 때문에 전력 교환량은 고려하지 않는다.

$$ACE = -\beta \Delta f_{ss} \tag{2.7}$$

이 때, 각 제어지역을 책임지는 SO의 2차 제어에 따른 출력 기준 값의 변화량 ΔP_{ref}은 식 2.5을 적분한 수식으로 표현된다.

$$\Delta P_{ref} = -K\int ACEdt = \Delta P_L \tag{2.8}$$

여기서 K는 적분기 이득이며, (−)부호는 해당 지역에서 나가는 순 연계선 전력조류 혹은 주파수에 대한 역반응(opposing response)이기 때문에 ACE가 부호와 반대로 지역 발전량을 증감발해야 한다는 것을 의미한다. 제어 지역에서 수급 불균형이 발생하면, 계통 내의 모든 터빈-발전기 설비의 출력 기준이 다시 설정된 후 새로운 정상 상태에서 운영이 가능해진다. 이 때 ACE의 값은 0이며, 2차 제어가 해당 불균형에 대해서 적절하게 대응했음을 의미한다[51-54].

2.3.4 3차 제어

만약 자동 제어(1차·2차 제어)가 불충분한 경우에는 3차 제어가 실행된다. SO가 계통 상황을 판단하여 수동적으로(manually) 3차 제어의 실행 여부를 결정한다. 3차 제어의 실행 용량은 2차 예비력의 잔여용량, 수급 불균형 상황, 그리고 사고의 크기 등에 따라 결정된다[44],[51].

기준 실행기간(time scale)은 제어 예비력 중 보통 가장 길며, 그 기간은 5분에서 1시간까지로 다양하다. 일부 국가에서는 예비력의 응답시간, 실행가능시간에 따라 3차 예비력을 세분화시키기도 한다. 예를 들어, 프랑스는 3차 예비력을 응답시간 기준에 따라 1)빠른 3차 예비력(tertiary fast reserve:15분) 2)빠른 추가 3차 예비력(tertiary fast supplement reserve) 3)지연 예비력(postponed reserve)로 세분화하여 분류하고 있다. 그러나 일반적으로 2차 제어가 응답 시간과 실행완료 시간이 명확하게 정의되어있는 것에 비해, 3차 제어는 그 기준들이 계통의 상황에 따라 다양하게 정의된다[11-13].

3차 예비력의 목적은 다음의 3가지로 정리할 수 있다[51].

1) 1차 제어에 참여하고 있는 발전기의 순동 예비력을 적정량으로 유지시킨다.

2) 2차 제어에 참여하고 있는 발전기의 최적급전(optimal dispatch)을

유지시킨다.

3) 주어진 주기 내에 2차 제어 전력 대역폭(bandwidth)을 회복시킨다.

여기서 3차 제어의 주된 목적은 마지막으로 언급한 2차 제어 용량을 회복시켜주는 것이다. 3차 예비력은 실행 특성에 따라 2가지로 구분된다.

1) 상황에 따른 수동적 제어: SO가 필요하다고 판단할 때, 실행되는 3차 제어를 의미한다.

2) 예측에 따른 계획적 제어: 사전에 정의된 시간 기준(15분 또는 30분)과 특정시간에 실행이 계획된 3차 제어를 의미한다.

3차 제어 역시 2차 제어와 같이 중앙 집중적 방식으로 SO가 실행여부를 결정한다. 1차 제어가 즉각적으로 계통의 수급상황에 반응하여 주파수의 탈락을 막는 것이라면, 2차 제어와 3차 제어는 실행시간에 차이는 있지만 계통을 원래의 상황으로 되돌리는 것이 목적이라는 점에서 공통점을 가진다. 3차 제어는 개별 터빈-발전기의 기준점(set point)을 조정하는 것을 통해 이루어진다. 일부에서는 3차 제어를 5분, 15분, 혹은 30분 단위의 경제급전의 재조정으로 취급하는 경우도 있지만 SO가 상황에 따라 실행을 결정하는 제어로 보는 것이 좀 더 일반적이다[49-52].

2.3.5 주파수 제어 체계

앞서 설명했던 3가지 제어단계는 전력계통의 주파수를 유지하는 기본적인 제어구조이다. 각 제어의 입력 값과 출력 값은 다음 그림2.7으로 설명할 수 있다.

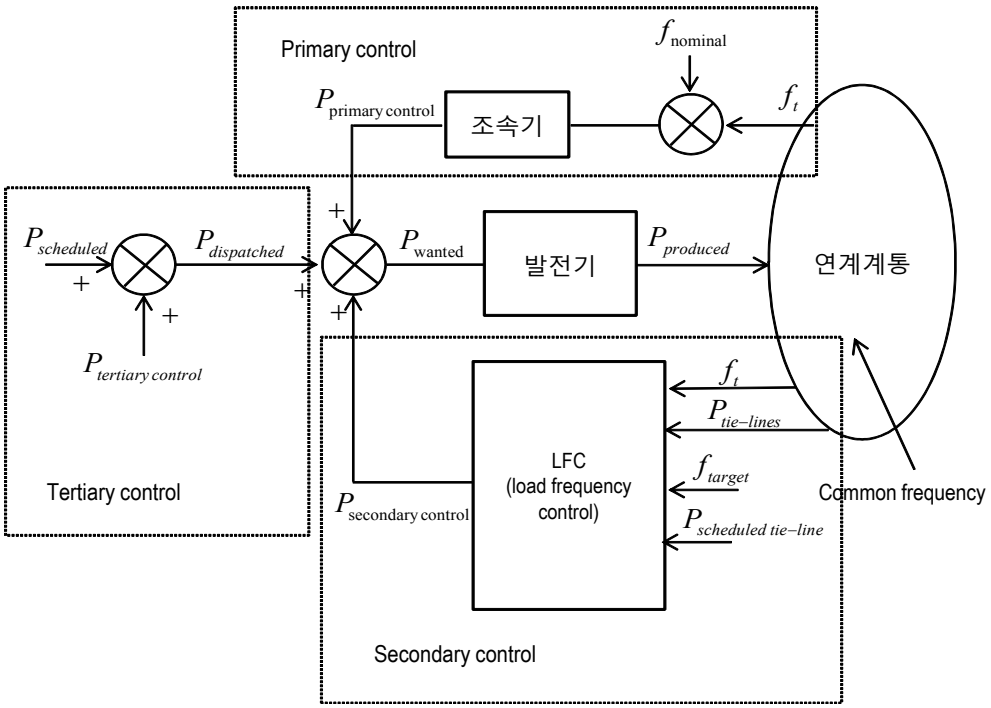

그림 2.7 주파수 제어체계(framework)[8]

1차 제어는 주파수 음영 영역을 넘어서는 주파수 변동에 대해 발전기들이 자동적으로 반응하는 것을 의미하는데, 대규모 계통에서는 확연한 사고가 발생하지 않으면 음영 영역을 넘지 않는 주파수 변동이 발생하기 때문에, 이 변동 값은 계통운영시스템의 신호주기마다 계통을 감시하는 2

차 제어에 따라 완화되어진다. 그러나 전력계통에 발전기 탈락 등의 외란이 발생하여 모든 제어가 필요해질 경우, 주파수 제어는 순차적으로 작동되며 다음 그림과 같이 표현된다[44],[50].

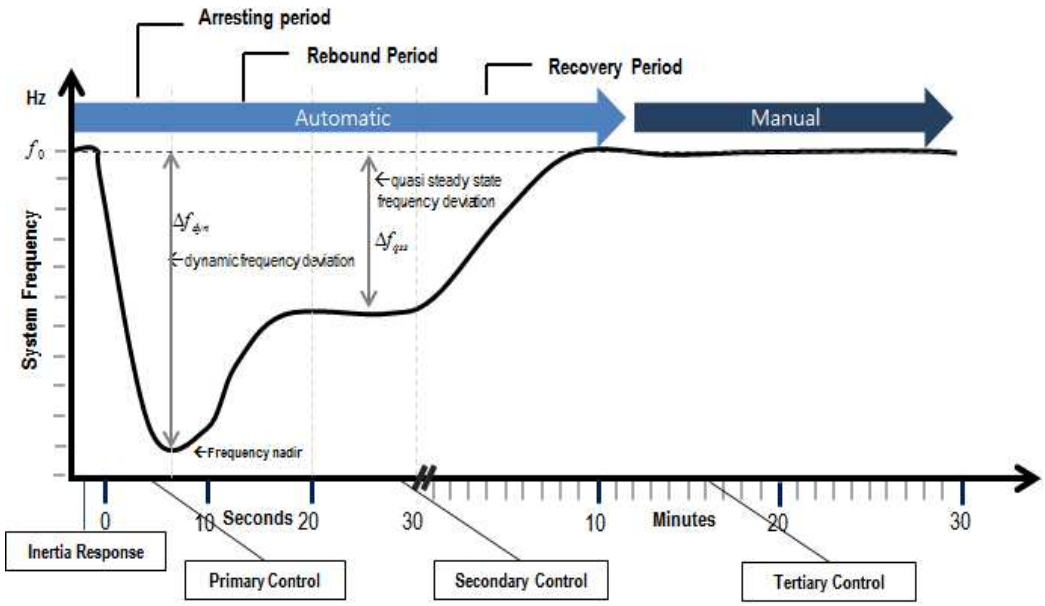

그림 2.8 순차적(sequential) 주파수 제어 실행

주파수의 이탈과 함께, 회전자에 저장되어 있던 운동에너지가 즉각적으로 방출되며 1차 제어가 응답특성에 따라 주파수 탈락을 방지하여 새로운 안정적인 값으로 균형을 이룬다. 2차 제어는 기본적으로 1차 제어의 소모 용량을 복구시키며, 이에 따라 2차 제어 가능용량이 소모되면 SO는 3차 제어를 실행시켜 2차 제어 용량을 회복시킨다. 이를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

○ 1차 제어: 주파수 변화의 방향과 반대의 예비력 실행을 실시하는 지역(local) 자동 제어

○ 2차 제어: 기준 주파수 회복과 기준 연계계통 융통량 유지가 목적인 중앙 집중화된 자동 제어

○ 3차 제어: 2차 예비력의 회복, 송전선로 혼잡 해소 등을 목적으로 하는 수동적인 제어

2.4 전력시장 구조와 예비력 시장

2.4.1 개요

전력시스템의 기본구조(단일계통·연계계통)가 국가별로 상이하고 이해관계자(stakeholder) 간의 협의사항과 발전자원의 구성비 및 지리적 특성이 다양하기 때문에, 전력시장 구조(architecture)는 표준(standard)이 존재하지 않고 각 국가 및 계통 운영 협의체별 특수성을 반영하여 개별적으로 발전해왔다. 북미의 경우, 2002년 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)가 예비력 시장이 포함된 표준 시장 설계(standard market design, SMD)안을 발표하였으나 2005년 7월 표준 시장 설계 심의를 중단하였다. 그 이유는 북미 내에서도 제어지역 간 계통의 상황과 특징이 상이하기 때문이다[55].

전력시장 구조는 다른 상품시장과 비교할 때 복잡한 특성을 지니고 있다. 주된 이유는 항상 전력의 수요와 공급이 일치해야한다는 기본적 특성에서 비롯된다. 따라서 전력시장에서는 상시 수급의 일치라는 목표를 유지하기 위해 다양한 서비스를 제공해야하는데, 이러한 서비스들이 시장의 재화로서 거래된다. 전력시장은 기본적으로 각각의 재화 기준의 하위시장(sub-market)들로 구성된다[1],[2]. 또한, 각 서비스가 거래되고 실행되는 시점(time)에 따라 시장을 정의할 수도 있다[55-58]. 본 절에서는 논

문에서 고려하는 전력시장 구조를 정의하고 설명하고자 한다. 또한 예비력에 좀 더 중점을 두어서 해당 시장에서의 가격·용량 결정과 입찰·정산(settlement process)에 대해서도 설명하겠다.

2.4.2 시점에 따른 시장의 분류

SO는 전력의 공급과 소비가 항상 평형을 유지할 수 있도록 시시각각으로 변화하는 전력수요, 공급변동, 기타 변수에 따라 발전기의 출력, 송전선로의 흐름을 조정하고 주파수 및 전압 등을 일정 범위 내에서 제어한다. 따라서 SO는 1)수요를 예측하고, 2)필요한 예비력 용량을 결정하며, 3)경쟁시장을 통해 에너지와 예비력 공급계획을 결정하고, 4)실시간 운영 시 필요한 제어동작을 통해 에너지 및 예비력을 실행시킨다. SO가 고려해야하는 시간흐름에 따른 전력시장의 분류는 다음 그림 2.9와 같다[58],[59].

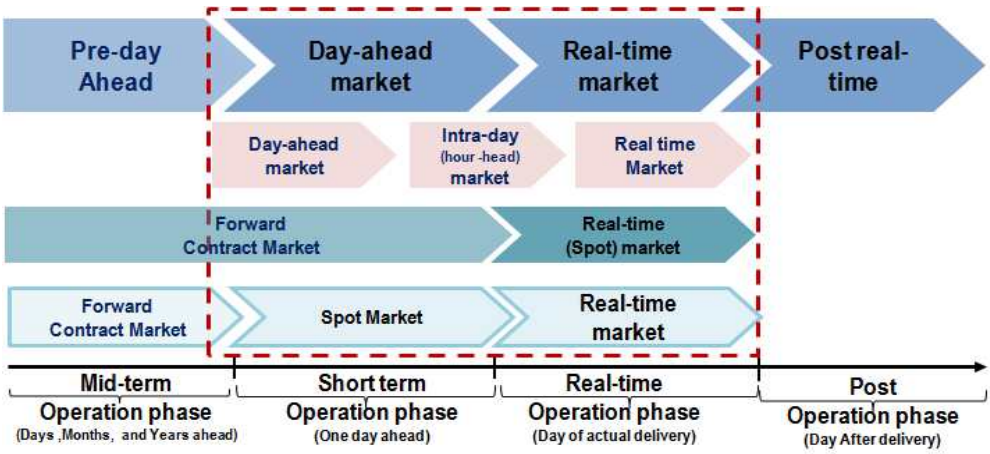

그림 2.9 시간흐름에 따른 전력시장의 분류

우선 전력시장은 시간의 순서에 따라 수일 전(pre-day ahead), 하루 전(day ahead), 실시간(real time), 실시간 이후(post real-time)으로 구성된다. 수일 전은 수일 전(days-ahead), 수개월 전(months-ahead), 그리고 수년 전(years ahead)에서의 전력공급 계획 시점으로 구분된다. 하루 전은 운영일의 공급계획이 수립하는 시점이며, 실시간은 실제 계통운전 시 공급과 소비가 이루어지는 시점을 말한다. 그리고 실시간 이후는 SO가 실시간에 이루어졌던 수급상황 검토와 예비력 공급의 보상이 이루어지는 시점을 의미한다.

한편, 하루 전시장과 실시간 시장사이에 일간(intra day)시장이 존재하는 경우가 있다(스페인, 헝가리, 독일, 프랑스, PJM 등). 일간시장은 한시간 전(hour ahead) 시장(CAISO, NYISO 등)과 기능상으로 유사하며, 세부기준에 차이가 있을 뿐이다. 일간 시장, 즉 한시간 전 시장은 하루 전시장과 실시간 시장의 차이를 줄여주는 역할을 담당하고 있다[56-58]. 그림 2.9에서 점선으로 표시한 영역은 본 논문에서 다루고자 하는 예비력 운영과 밀접한 시장을 의미한다.

선도계약 시장(forward contract market), 현물시장(spot market), 실시간 시장(real time)의 구분을 거래시점에 따라 명칭을 지정한 것이다. 다만 위의 명칭과 분류는 주로 유럽에서 사용하는 용어이며, 현물은 에너지를 의미한다. 따라서 에너지가 거래되는 시장을 하루 전 현물시장(day ahead spot market), 실시간 현물시장(real time spot market)으로 구분한

다. 반면, 미국에서는 시간기준으로 선도계약시장과 현물시장을 구분한다. 즉 하루 전 시장 역시 선도계약 시장의 범주에 포함되며, 현물시장은 실시간시장과 동일하게 취급된다.

2.4.2.1 하루 전 시장(Day ahead market)

하루 전 시장은 시장 참여자(공급자, 소비자)가 운영일(D day) 하루 전에(D-1 day)에 에너지, 예비력을 매매하는 계획단계의 시장을 의미한다. 입찰은 단순입찰과 복합입찰로 구분할 수 있는데, 단순입찰은 입찰에 제약조건을 고려하지 않는 것이고 복합입찰은 최소발전량, 계획정지, 증감률 등을 입찰조건에 포함시킬 수 있는 것을 의미한다. 하루 전 시장에서는 에너지와 운영예비력을 종합적으로 최적화하여 공급비용이 최소화되도록 한다.

하루 전 시장에서 SO는 예측한 에너지 수요와 기준 예비력 필요 용량을 충족시키기 위해, 안전도 제약 발전기 기동정지계획(security constrained unit commitment, SCUC)와 안전도 제약 경제급전(security constrained economic dispatch, SCED)을 통해 다음 날의 에너지 공급 계획과 예비력 용량 확보 계획을 결정한다. 이 때, 안전도 제약 경제급전의 입력 값은 1)수요 입찰(demand bid), 2)허용된 송전선로 탈락(approved transmission outage), 3)전력융통 계획(interchange schedule) 등이 있다.

그리고 결과 값은 1) 참여자별 공급계획(e.g 30분 또는 1시간 단위기준), 2)참여자별 예비력 할당용량, 3)각 상품에 대한 가격 등으로 구성된다.

보통 전 일, 정해진 시간(e.g 0:00 ~ 11:00)에 우선적으로 입찰(resource offers, resource parameters, physical schedules, demand bids)을 종료한 후, SO는 다음 날(D day) 1 시간(혹은 30분) 기준의 에너지와 예비력 시장을 운영 계획을 안전도 제약 발전기 기동정지계획과 안전도 제약 경제급전을 통해 결정하고 가격을 발표하고, 정산한다. 아래 그림 2.10은 미국 MISO(Midcontinent Independent System Operator)의 하루 전 시장에서의 시각별 SO, 공급자, 소비자의 함수를 설명하고 있다[59].

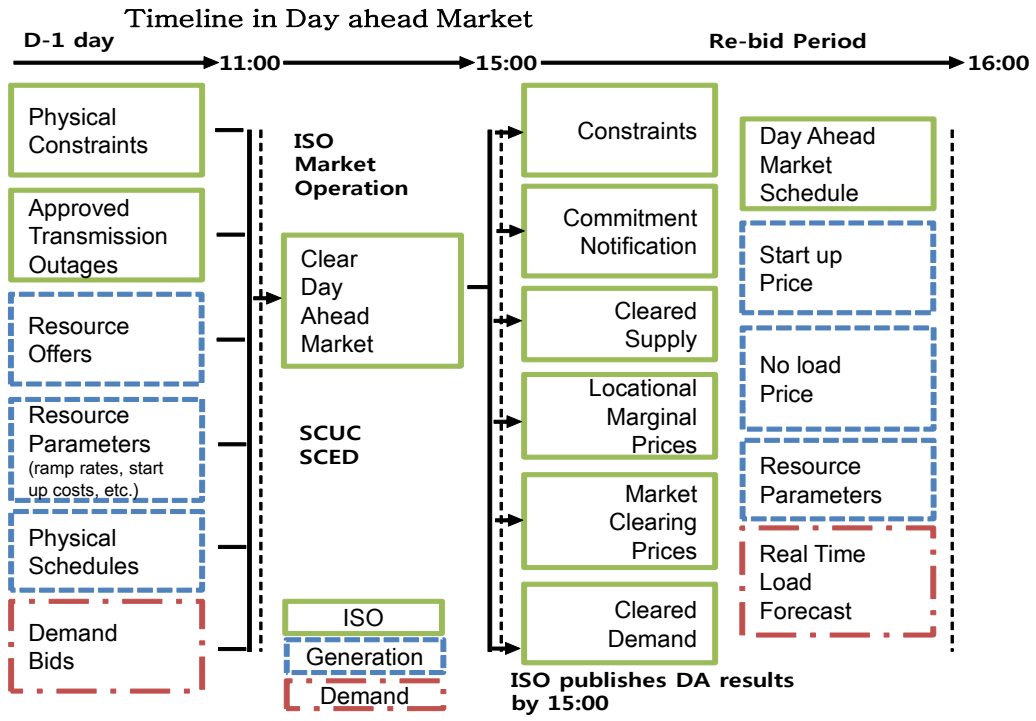

그림 2.10 하루 전 시장에서의 시간흐름에 따른 참여자별 역할

2.4.2.2 일간 시장(Intra day market)

일간 시장은 하루 전 시장이 정산된 이후 혹은 거래 당일에 형성되는 시장이며, 각 국가마다 시장의 개설시간, 종료시간, 개설횟수 등이 다양하게 나타난다. 뿐만 아니라 해당 시장의 기준을 전력산업 환경의 변화에 따라 변화시키거나 실시간 시장에 통합시키는 연구 및 정책이 제안되고 있는 실정이다[58-60].

SO 혹은 시장운영자(market operator, MO)는 일간 시장에서의 공급자의 전력판매 및 소비자의 구매입찰을 통하여 하루 전시장에서 결정된 급전계획이 운영당일에 조정이 필요할 경우를 대비하여 일간 시장을 운영한다. 하루 전시장과 마찬가지로 운영일의 시간대별 공급계획과 가격을 결정하여 최종발전계획을 발표한다.

전력시장 자유화와 신재생에너지의 계통 연계 확대 이전에는, 전일 시장에서의 발전계획은 새로운 정보가 갱신되면 새롭게 그 계획을 조정해야 한다. 여기서 새로운 정보는 발전기의 정전, 수요 예측에서의 변화에 국한되었다. 그러나 전력시장 자유화, 불확실성이 높은 전원의 증가, 그리고 이상기온에 따른 수급불안정성 증가는 처음의 하루 전 시장에서의 정보를 다양하게 만들고, 그 정확성을 낮추고 있다. 이에 따라 일간시장의 중요성 역시 커지고 있는 실정이다. 일간시장은 보통 하루 전 시장이 정산된 이후, 운영 전 일에서 시작되어 당일의 실시간 급전의 직전까지 진행된다.

일간시장에서 낙찰된 공급자원은 5분(혹은 15분)마다의 실시간 경제급전에 활용되는 발전자원으로 활용되며, 일부 연구에서는 일간시장에서의 자원을 예비력 자원 중 3차 제어 예비력 자원과 동일하게 취급하는 경우가 있다[54]. 본 논문에서는 일간시장에서의 조정이 실행 시점이 결정되어 있다는 있다는 점에서 3차 제어와 차이를 가지지만 그 역할이 유사하기 때문에, 일간시장을 고려하지 않고 예비력 시장의 운용으로 실시간 계통의 모든 수급불균형을 해소시킨다고 가정하였다.

2.4.2.3 실시간 조정 시장(Real time balancing market)

실시간 시장에서는 계획된 에너지와 상황에 따라 예비력이 실행된다. 실시간 조정 시장은 계통의 수급균형과 관련된 모든 운영결정이 이루어지는 시장을 의미한다. SO는 발전계획이 종료하여 이에 따른 에너지 공급계획이 시간별 결정되었을 때, 지역 내의 송전혼잡(congestion)을 처리하고 하루 전시장에서 미리 계획된 예비력 자원을 실행하여 수급불균형을 해소시킨다[23],[56].

만약 전력 네트워크가 유럽처럼 여러 연계지역과 연결되어 있는 경우에는 동기화된 큰 범위 내에 여러 개의 지역(region)이 있으며, 그 지역 내에 다수의 구역(area)이 구성된다. 실시간 조정 시장에서는 우선 구역별로 적정 예비력을 구매하며, 송전망을 통해 각 구역 간 융통 전력량을 결

정하여 전체 지역의 균형을 유지한다[8].[51].

일간시장이 활성화되어있는 MISO에서는 실시간 시장을 실시간 에너지시장과 실시간 예비력시장으로 구별하여, 일간시장에서 확정된 자원을 가지고 5분마다 경제급전을 통해 에너지 사용량을 조정하고 그 외의 불균형 상황에 대해서는 예비력 실행을 통해 수급 균형을 유지한다[52],[61].

그러나 실시간 조정시장에서 일반적으로 가장 주요한 취급되는 수급 조정 자원은 예비력 자원이다. 앞서 설명한 것처럼 실시간 상황에서 수급 불균형이 발생하면 즉각적으로 1차 제어가 실행되며, 계통운영시스템의 주기(PJM: 2초, 우리나라:4초)에 따라 2차 제어가 자동적으로 주파수의 균형을 유지하기 위한 수급 조절을 실시한다. 그리고 3차 제어는 시장에 따라 5분 단위의 실시간 안전도 제약급전으로 실행되거나 필요에 따라 SO의 판단으로 실행 시점이 결정된다.

2.5 9.15 정전사태와 예비력 운영

2011년 9월 15일 전력 사용량이 급증하자 단전 조치가 실행되어 전국적인 대정전사태가 발생했다. 당일 전력거래소는 오전 10시 30분 경 예상 수요의 증가를 감지하고, 예비 전력 생산을 위한 발전기의 추가기동을 시작하고, 자율절전 및 부하제어를 통해 수요를 떨어뜨려 수급의 안정성을 유지하려고 하였다. 그리고 오후 2시 50분 경 부하감소가 있었으며 예비력 부족 상황이 완화될 것이라는 예측도 있었지만 결국 수요를 감당하지 못하고 오후 3시 10분부터 순환단전을 개시하여 전국적인 순환정전이 발생했다.

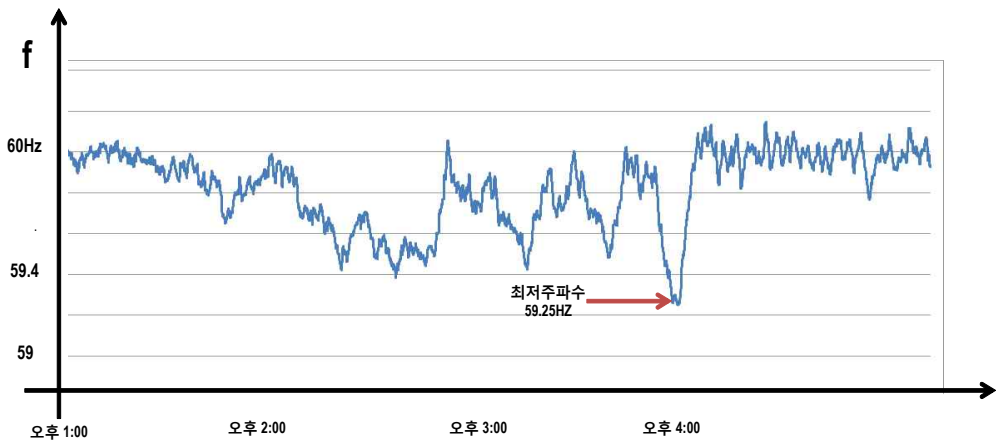

그림 2.11 2011년 9월 15일 순환정전 시 주파수 상황

순환 정전의 주요 원인은 전력 수요의 예측 실패, 예비력 계획 및 운영의 미흡함이었으며, 이 정전사태 이후로 예비력의 중요성과 함께 높은 이목이 집중되기 시작하였다. 예비력의 일간 계획과 운영의 관점에서 관련 상황을 바라본다면, 다음의 2가지로 나누어 생각해볼 수가 있다.

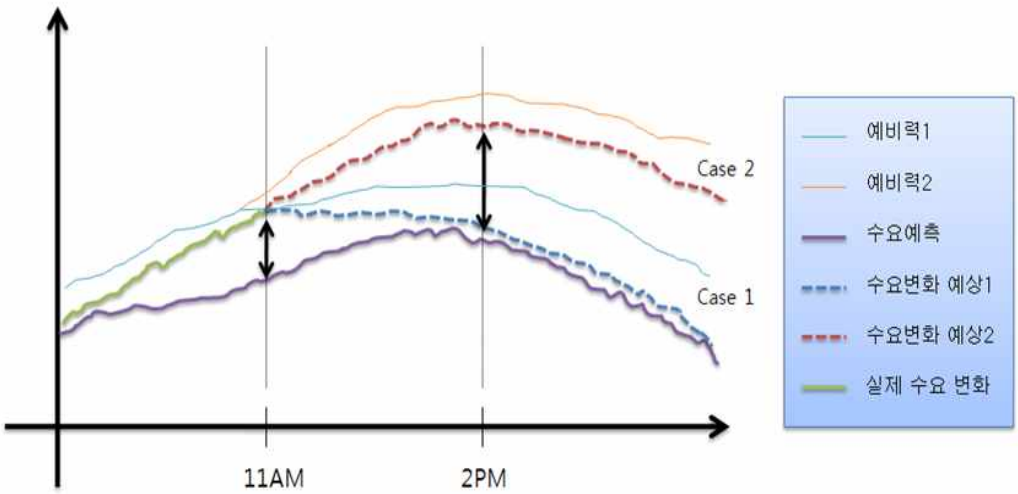

그림 2.12 9월 15일 계통운영 관점에서의 2가지 상황

앞서 사건의 기록에서 유추해볼 수 있듯이, SO는 오전 10시경 당초 예측했던 수요보다 실제 수요가 더 높았지만 그 추세가 Case 1이 될지 아니면 Case 2가 될지를 사전에 판단하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 SO가 오전 10시의 수요상황이 일시적인 것으로 판단하였지만 실제 수요가 9월15일 상황처럼 Case 2의 수요가 되었다고 해서, 상황적 판단이 잘못된 것이라고 보기는 어렵다고 볼 수 있다.

과거 실적데이터, 현재 기온데이터, 현재 기기상태, 그리고 여러 복합

변수에 따라 전력수요를 예측하지만 산업고도화, 기후이상변화, 신재생에너지의 불안정성 등은 전력수요 및 공급의 불확실성을 더욱 증폭시키고 있다. 따라서 앞으로 이런 수요예측의 실패는 빈번하게 발생할 것으로 예견되며, 9.15 순환정전은 추후 반복되어 발생할 수 있는 문제에 대한 전조로 볼 수 있다.

9.15 순환정전이 예비력 분류 및 정의에 주는 주요한 시사점은 발전기 탈락, 송전 혼잡 등 계통의 사고가 발생하지 않더라도 예비력이 사용되고, 부족한 상황이 발생할 수 있다는 사실이다. 또한 9.15 사태는 현행 운영예비력의 기준이 정의와 실제 사용의 불일치 문제가 있으며, 수급불확실성 증가에 따른 사고/비사고의 경계가 소멸된 상황을 수용하지 못한다는 것을 보여준다. 따라서 운영예비력의 기준은 기준과 사용의 불일치 문제를 해소시켜야하며, 사고/비사고 경계기준 소멸 등의 불확실성에 대처할 수 있는 체계로 개편될 필요가 있다. 뿐만 아니라 미래 전력계통에서 신재생에너지, ESS, 수요자원의 예비력 자원으로의 받아들일 수 있는 수용성을 고려해야한다.

본 논문에서는 일반적 기준으로서 주파수제어체계에 따라 주파수제어 예비력의 기준을 따르고, 예비력 간의 기능적 관계에 따라 해당 예비력의 용량을 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

제 3 장 예비력 필요 용량 결정 문제

예비력 용량을 결정하는 문제는 실시간 계통운전에서의 불확실성에 대비하는 공급 가능한 여유 용량의 크기를 결정하는 것을 의미한다. 예비력 용량을 결정하는 방법은 크게 결정론적 방법과 확률론적 방법의 두 가지로 구분된다[9],[14-21]. 일반적으로 장기적 발전용량 확보를 위한 설비투자 결정 시에는 확률적 방법이 사용되며, 단기적 수급 운용단계에서는 결정론적 방법이 적용된다. 그러나 결정론적 방법의 한계를 극복하기 위해, 많은 선행 연구에서는 확률론적 방법을 통한 예비력 필요용량 결정방법을 제시하고 있다.

3.1 결정론적 예비력 필요용량 결정 방법

신뢰성 있는 전력계통 운전을 위해서는 부하차단 등의 전력공급정지를 방지할 수 있는 충분한 예비력이 있어야한다. 결정론적 방법은 계통에 사고가 발생하였을 때 대처할 수 있는 충분한 용량을 예비력의 필요용량으로 결정한다. 과거 계통상에 발생할 수 있는 사고는 수요예측 실패보다 발전기 탈락, 송전선 혼잡 등이 더 큰 요소였다. 그러나 현재 수급의 불확성 증가로 인해 수요예측 실패의 크기 및 빈도수의 증가는 예비력 용

량을 결정하는데 있어 매우 중요한 요소로 여겨지고 있다.

기존의 많은 선행 연구와 실제계통 운영에서는 결정론적 방법을 적용하여 전체 주파수제어예비력 용량 혹은 순동예비력 용량을 결정하였다. 우선 예비력 공급에 참여하는 공급자들의 순동 예비력 공급가능용량은 다음과 같다.

$$sr_i^t = \min\left\{u_i(P_i^{\max} - P_{ei}^t), u_i^t(\tau sr_i^{up})\right\} \tag{3.1}$$

여기서 sr_i^t는 시간 t에서 발전기 i의 순동예비력 입찰가능량, $P_i^{\max}$는 해당 발전기의 최대발전가능용량, P_{ei}^t는 공급계획량, u_i^t는 기동($i=1$)과 정지($i=0$)를 나타내는 지표, τ는 순동예비력 실행 기준시간이다. 이 때, 개별 공급자의 예비력 공급량은 예비력 필요용량보다 크거나 같아야 한다.

$$\sum_{i=1}^{I} sr_i^t \geq sr_d^t \tag{3.2}$$

여기서 I는 예비력 공급에 참여하는 전체 공급자 수, sr_d^t는 이때의 순동예비력 필요용량을 의미한다.

순동예비력 필요용량은 실시간 계통에서 발생할 수 있는 최대 상정사고

의 크기로 정의되며, 이는 다음의 수식으로 정식화할 수 있다 [16],[25],[30],[42].

$$sr_d^t = \max\left\{u_i^t P_i^{\max}\right\} \tag{3.3}$$

$$sr_d^t = \max\left\{u_i^t P_{ei}^t\right\} \tag{3.4}$$

$$sr_d^t = \max\left\{u_i^t P_i^{\max}, \alpha_d P_d^{\max}\right\} \tag{3.5}$$

$$sr_d^t = \max\left\{u_i^t P_i^{\max}\right\} + \beta_d P_d^{\max} \tag{3.6}$$

식 (3.3)은 순동예비력 필요용량을 계통에 연계한 발전기의 최대크기로 정의하였다. 식 (3.4)는 발전계획량이 가장 큰 발전기의 해당 계획량을 순동예비력 필요용량으로 정의하였다. 여기서 P_{ei}^t는 발전기 i의 발전계획량을 뜻한다. 식 (3.5)는 병입된 발전기의 최대크기와 계획기간 내 최대부하의 특정 비율 중 큰 값을 순동예비력의 필요용량으로 정의하였다. 여기서 α_d는 첨두부하의 비중 값이다. 식 (3.6)은 순동예비력 필요용량을 식 (3.5)의 구성요소의 합으로 결정하였다. 여기서 β_d는 기간 내 최대수요의

혼합비중이다. 캐나다의 Yukon 지역에서는 β_d의 값을 0.1로 설정하여 예비력 필요용량을 결정하기도 한다[55].

결정론적 방법은 예비력 필요용량 결정 시, 계통상의 발전기 1기가 갑자기 탈락하였을 때, 부하차단이 발생하지 않는 것을 목적으로 고려한다. 그러나 발전기 탈락확률이 매우 낮거나 소비자의 부하차단에 대한 피해비용이 크지 않을 때, 결정론적 방법으로 예비력 필요용량을 산정하는 것은 경제적으로 비효율적일 수 있다. 한편, 반대의 상황에서는 예비력 부족으로 신뢰도 유지가 위험할 수 있다. 즉, 이러한 결정론적 방법은 계통의 특성, 부하의 변동성과 불확실성, 기기의 설비고장 등의 시스템 고유의 확률적이거나 통계적인 특성을 반영하지 못한다는 근본적인 단점을 가지고 있다[33].

오랫동안 결정론적 방법은 단기적 수급운용을 위한 예비력 필요용량을 결정하는데 사용되어 왔다. 그 이유는 전력계통 운영 시의 계통데이터의 부족, 계산량의 한계, 확률에 대한 불신 등이 있어왔기 때문이다. 많은 한계와 단점에 불구하고 여전히 많은 국가에서는 결정론적 방법을 통해 순동예비력 혹은 2차 예비력 용량을 산정하고 있다[8],[9],[45].

표 3.1을 보면, 많은 국가들이 2차 예비력을 결정하는데 결정론적 방법을 경험적인 데이터를 바탕으로 하여 결정하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 1차 예비력과 3차 예비력에 대해서는 예비력 필요용량자체가 구체적으로 명시되어 있지 않는 경우가 많다. 또한 대부분의 국가에서 2차와 3차 예

비력을 나누는 기준이 불명확하다[36]. 보통 1차 예비력은 발전기의 특성으로 대부분의 계통에서 필요용량보다 충분하게 확보되며, 2차 예비력이 계통사고에 충분히 대응하기 때문에 상대적으로 3차 예비력은 사용빈도가 낮다. 이에 따라 2차 예비력 필요용량이 과도하다는 평가를 받기도 한다. 또한 3차 예비력을 결정하는 기준이 모호하다는 특징이 있다[44-46].

표 3.1 국가 별 예비력 필요 용량 기준(2008년 기준)

계통운영자	국가	운영예비력(주파수제어 예비력)		
		1차 예비력	2차 예비력	3차 예비력
UCTE	유럽	3,000[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max}+150^2}-150$	2차 예비력보다 크거나 동일한 크기
PJM (Western)	미국	시간대에 따라 상이함	$1.5\%P_d^{\max}$	시간대에 따라 상이함
PJM (Southern)	미국	시간대에 따라 상이함	$\max(u_i^t P_i^{\max})$	시간대에 따라 상이함
PJM (Other)	미국	시간대에 따라 상이함	$1.1\%P_d^{\max}$	시간대에 따라 상이함
NGET	영국	250[MW]	2,255[MW]	
ELIA	벨기에	100[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max}+150^2}-150$	발전기:460[MW] 부하: 200[MW]
VDN	독일	기준사고 적용	시간대에 따라 상이함	시간대에 따라 상이함
RTE	프랑스	700[MW]	$\max(500, \sqrt{10P_d^{\max}+150^2}-150)$	시간대에 따라 상이함
TenneT	네덜란드	100[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max}+150^2}-150$	300[MW]
REE	스페인	발전기 설비용량의 1.5%	빠른 부하:$6\sqrt{P_d^{\max}}$ 느린 부하:$3\sqrt{P_d^{\max}}$	최대 발전기 용량 + 예측부하 2%

3.2 확률론적 예비력 필요용량 결정 방법

예비력 필요용량을 결정하는 확률론적 방법은 전력시스템의 기기들의 위험정도를 확률 지표 등으로 표현하여, 예비력 필요용량 결정의 주요 제약조건으로 사용하는 방법을 의미한다. 1930년대 이후부터 계통의 확률론적 특성을 고려하여 계통의 신뢰도를 정의하고, 이에 따라 예비력 필요용량을 결정하는 방식의 필요성은 인지되어왔다. 1963년 최초로 제안된 확률론적 방법은 다음 수식 3.7에 따라 PJM의 예비력 필요용량의 적정성을 평가하였다[33].

$$\Pr_Y = \sum_{Y=0}^{\infty} \Pr(P_g^t \le Y)\Pr(P_d^t = Y) \tag{3.7}$$

여기서 $\Pr_Y$는 공급(P_g^t)가 수요(P_d^t)보다 부족하거나 같은 확률이다. 예비력의 적정성을 평가하는데 있어 공급지장 확률의 개념을 처음으로 도입하였다. 예비력 평가지표를 기동정지계획 위험도(UC_{risk}, unit commitment risk)로 정의하면 다음의 수식 3.8과 같다[41].

$$UC_{risk} = \Pr[\sum_{i=1}^{N}(P_i^t + sr_i^t) \le P_d^t] \tag{3.8}$$

여기서 UC_{risk}는 부하차단이 발생할 확률을 의미한다. 많은 선행연구에서는 실시간 계통에서 예비력 부족으로 공급지장이 발생할 확률을 지수함수를 사용하여 나타낸 후, 이를 예비력 공급의 적정성을 판단하는 함수로 나타냈다[34-39],[41],[42]. 우선 정전이 발생할 확률은 일반적으로 다음가 같이 정식화된다.

$$\Pr_X = a_0 e^{-X/M} \tag{3.9}$$

여기서 $\Pr_X$는 X[MW]이상의 부하차단이 발생할 누적확률을 의미하며, a_0, M는 경험에 의해 산출되는 확률분포 상수이다. 공급지장확률(loss of load probability, LOLP) 함수는 식 (3.9)을 통해 얻어질 수 있다.

$$\ln \Pr_X = \ln a_0 - X/M = A_o - X/M \tag{3.10}$$

$$f(LOLP) = M[\ln a_0 - \ln(LOLP)] \tag{3.11}$$

이 때, 순동예비력의 필요용량의 제약조건을 확률적으로 정의된 공급지장의 크기보다 같거나 커야한다.

$$\sum_{i=1}^{I} sr_i^t \geq f(LOLP_o),\ \forall t = 1,2,...,T \tag{3.12}$$

이러한 접근방법은 예비력 필요용량의 적정여부를 공급지장 확률 또는 함수를 통해 평가한다. 그러나 이러한 지표는 정확히 예비력 필요용량이 얼마만큼 요구되는지를 정량적으로 제시하지는 못한다. 위의 지표들을 기준으로 하여 예비력 필요용량을 최적화시키는 과정은 우선 공급지장 확률을 기동정지계획 문제 내부의 수식으로서 표현될 수 있다.

$$LOLP = \Pr[\sum_{i=1}^{I} m_i^t (P_{ei}^t + sr_i^t) \leq P_d^t] \tag{3.13}$$

수식 (3.13)은 순동예비력과 발전계획량을 고려했을 때의 LOLP를 나타낸다. 여기서 m_i는 발전기 i가 계통상에 연계되었을 때 공급가능여부를 나타내는 지표이다.($m_i = 0$:공급중지, $m_i = 1$:공급) 발전기 1기가 탈락했을 때를 기준으로 했을 때의 부하차단 여부를 판단하는 지표(σ_j)는 다음과 같다[27],[32],[37].

$$\frac{P_d - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} (P_{ei} + sr_i)}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{\max}} \leq \sigma_j \leq 1 + \frac{P_d - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} (P_{ei} + sr_i)}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{\max}} \tag{3.14}$$

식 (3.14)를 발전기 2개가 탈락했을 때로 확장했을 때 수식은 다음과 같다.

$$\frac{P_d - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j,k}}^{n} (P_{ei} + sr_i)}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{\max}} \leq \sigma_{jk} \leq 1 + \frac{P_d - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j,k}}^{n} (P_{ei} + sr_i)}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{\max}} \tag{3.15}$$

기동정지 계획문제로 내제화된 LOLP는 수식 (3.15)를 반영하여 다음의 다항식으로 표현할 수 있다. 이 때 복수의 발전기의 탈락 가능성을 고려하였다.

$$LOLP = \sum_{j=1}^{I} \sigma_j \Pr_j^1 + \sum_{j=1}^{I} \sum_{k>j}^{I} \sigma_{jk} \Pr_{jk}^2 + \ldots \tag{3.16}$$

여기서 $\Pr_j$는 발전기 j가 탈락하였을 때 공급지장이 발생할 확률이다. 공급지장전력량 기대치(expected energy not supplied, EENS)은 수식 (3.17)를 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} EENS &= \sum_{j=1}^{I} \sigma_j \Pr_j^1 (P_{ej} + sr_j - sr_d) \\ &+ \sum_{j=1}^{I} \sum_{k>j}^{I} \sigma_{jk} \Pr_{jk}^2 (P_{ej} + sr_j + P_{ek} + sr_k - sr_d) + \ldots \end{aligned} \tag{3.17}$$

여기서 P_{ej}와 sr_j는 발전기 j의 탈락으로 발생하는 공급지장 에너지와 순동예비력을 의미한다. SO가 목표하는 LOLP 또는 EENS 값을 설정하여 순동예비력 필요용량을 결정한다.

확률론적으로 고려된 지표를 고려하여, 예비력 필요용량은 예비력을 포함한 에너지 공급 비용과 부하차단 시 발생하는 손실비용 기댓값의 합으로 정의되는 사회적 비용을 최소화시키는 목적함수를 통해 최적 값이 결정된다[16-20],[32],[37-43].

$$\min_{sr_d}\left\{\Gamma(sr_d)=\prod(sr_d)+E(sr_d)\right\} \tag{3.18}$$

여기서 $\Gamma(sr_d)$는 사회적비용, $\Pi(sr_d)$는 에너지 및 순동예비력 공급비용, $E(sr_d)$는 부하차단비용 기댓값이다. 우선 에너지 및 순동예비력 공급비용($\Pi(sr_d)$)는 기동정지계획의 문제로서 정식화된다.

$$\Pi(sr_d)=\min\left\{\sum_{i=1}^{I}(\lambda_{P_{ei}}P_i+\lambda_{sri}sr_i)u_i\right\} \tag{3.19}$$

여기서 I는 발전기의 수, $\lambda_{P_{ei}}$는 발전기 i의 P_{ei}[MWh] 에너지 공급에 대한 가격, λ_{sri}는 순동예비력 공급 가격이다. 우선 주어진 발전계획량 P_e

와 예비력 필요용량 sr_d이 주어진 상태에서 기동정지계획이 결정되면, 공급지장비용의 기댓값이 계산된다. 공급지장비용 기댓값은 보통 공급지장비용(value of lost load, VOLL)과 EENS의 곱으로 정의된다.

$$E(sr_d) = VOLL(sr_d) \bullet EENS(sr_d) \tag{3.20}$$

순동예비력의 최적용량은 순동예비력 용량을 추가로 확보할 때 필요한 비용이 공급지장비용의 감소치보다 크거나 같을 조건을 만족할 때까지의 값이다.

$$E(sr_d) - E(sr_d + \Delta sr_d) \geq \Pi(sr_d + \Delta sr_d) - \Pi(sr_d) \tag{3.21}$$

수식 (3.21)은 다음의 미분 형태의 필요조건으로 표현할 수 있다. 이 필요조건이 만족할 때까지 재귀적 방법을 통해 순동예비력 필요용량을 최적화시킨다.

$$\frac{\Delta E(sr_d)}{\Delta sr_d} + \frac{\Delta \Pi(sr_d)}{\Delta sr_d} = 0 \tag{3.22}$$

제 4 장 예비력 간의 상호관계를 고려한 필요용량 결정

앞 장에서 설명한 기존의 예비력 필요용량 결정방법들은 전력시스템의 확률적 특성은 고려했지만 예비력간의 기능적, 경제적 상호관계를 반영하지 못하였다는 한계를 가진다. 또한 선행연구들에서의 기동정지계획을 고려해 확률론적 방법으로 예비력 필요용량을 결정하는 방법은 전체 예비력 필요용량 도는 순동예비력 필요용량만을 결정하였다. 즉, 2차, 3차, DLC 필요용량을 세부적으로 결정하는 방법은 대부분 제시하지 못하고 있으며, 해당 용량을 결정할 때 기능적, 경제적 상호관계를 고려하지 않았다. 그러나 2차 예비력 필요용량과 3차 예비력 에너지 사용량 기댓값은 직접적인 상호관계를 가진다. 따라서 2차 예비력 필요용량의 크기는 3차 예비력과의 상호관계를 고려하여 결정되어야한다. 가령 2차 예비력 용량 가격이 낮고 3차 예비력 에너지 가격이 높은 상태라면, 2차 예비력 필요용량을 크게 산정하는 것이 경제적으로 효율적이다. 또한 이러한 상호관계는 3차와 DLC, DLC와 부하차단 간의 관계에도 동일하게 적용할 수 있다.

본 장에서는 우선 논문에서 고려하는 예비력 시장을 설명하고 2차, 3차 예비력, DLC, 그리고 부하차단이 가지는 기능적 상호관계를 수학적으로 정식화한다.

4.1 예비력 시장과 가격 모형

본 논문에서는 가장 일반적인 형태로 통용되는 제도화된 풀 시장을 고려한다. 풀이란 SO가 중앙 집중적 형태로 공급자와 수요자의 입찰을 모아 처리하는 거래 형태를 의미한다. 예비력 시장에서의 입찰가격은 다른 전력시장 상품과 다르게 2가지로 구성되어 있다. 첫 번째는 예비력의 용량확보 보상에 대한 가격이며, 이를 가능성 가격(availability price) 또는 용량 가격(capacity price)이라고 한다. 용량 가격은 실제 예비력 사용량과 무관하게 지급된다. 다른 예비력 가격은 실제 사용되었을 때 에너지양에 따라 지급되는 가격이며, 이를 사용가격(utilization price) 혹은 에너지 가격(energy price)라고 한다[16],[57].

예비력 용량가격은 보통 하루 전 시장에서 입찰이 낙찰되었을 때 확정되기 때문에 사전 정산(ex-ante settlement)으로 비용이 결정된다. 반면에 예비력 에너지가격은 실제 사용하였을 때 결정되기 때문에 사후 정산(ex-post settlement) 방식으로 비용이 결정된다.

수급불균형이 양(+)인 경우와 음(-)인 경우의 그 원인과 확률분포가 다르기 때문에, 보통 예비력 용량은 각각 따로 결정된다. 용량비용은 실시간 계통 운영 전 각 예비력의 필요용량과 가격의 곱으로 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서 예비력 용량 가격은 간단한 선형함수로 양(+)과 음(-)에 대해서 각각 주어졌다고 가정한다. 그리고 본 논문에서는 용량가격은 2차, 3차, DLC

에 적용되며, 에너지가격은 3차, DLC, 부하차단에 적용되는 것으로 가정했다.

$$C_{rl}(r_{i+}^k, r_{i-}^k) = \lambda_{l+}^k r_{l+}^k + \lambda_{l-}^k r_{l-}^k, \ \forall l = 2,3,4 \tag{4.1}$$

$$\lambda_{l+}^k = a_{l+}^k r_{l+}^k + b_{l+}^k, \ \forall l = 2,3,4 \tag{4.2}$$

$$\lambda_{l-}^k = a_{l-}^k r_{l-}^k + b_{l-}^k, \ \forall l = 2,3,4 \tag{4.3}$$

$C_{rl}(r_{l+}^k, r_{l-}^k)$: 용량결정기간 k에서의 l차 예비력 필요용량 비용

λ_{l+}^k: 용량결정기간 k에서의 양(+)의 l차 예비력 용량 가격

λ_{l-}^k: 용량결정기간 k에서의 음(-)의 l차 예비력 용량 가격

r_{l+}^k: 용량결정기간 k에서의 양(+)의 l차 예비력 필요용량

r_{l-}^k: 용량결정기간 k에서의 음(-)의 l차 예비력 필요용량

l : 제어예비력 표시 지표($l=2$;2차 예비력, $l=3$;3차 예비력, $l=4$;DLC)

a_{l+}^k: 용량결정기간 k에서의 i차 예비력 양(+)의 용량가격 기울기 값

a_{l-}^k: 용량결정기간 k에서의 l차 예비력 음(-)의 용량가격 기울기 값

b_{l+}^k: 용량결정기간 k에서의 l차 예비력 양(+)의 용량가격 y절편 값

b_{l-}^k: 용량결정기간 k에서의 l차 예비력 음(-)의 용량가격 y절편 값

예비력 에너지 비용 역시 용량가격과 유사하다. 다만 실제 사용량에 대해 사후 정산된다는 점에서 차이가 있다. k차 예비력의 기간 k동안에 발생한 에너지 비용은 양(+) 사용량과 음(-) 사용량을 구분되어 계산된다. 여기서 $l=5$는 부하차단을 의미한다.

$$C^{k}_{r'_{l}}(r'_{l+},r'_{l-})=\sum_{t=1}^{T_k}(\lambda^{t}_{l+}r'^{t}_{l+}T_l+\lambda^{t}_{l-}r'^{t}_{l-}T_l),\ \forall l=3,4,5 \tag{4.4}$$

$$\lambda'^{t}_{l+}=a'^{t}_{l+}r'^{t}_{l+}+b'^{t}_{l+},\ \forall l=3,4,5 \tag{4.5}$$

$$\lambda'^{t}_{l-}=a'^{t}_{l-}r'^{t}_{l-}+b'^{t}_{l-},\ \forall l=3,4,5 \tag{4.6}$$

$C^{k}_{r'_{l}}$: 용량결정기간 k동안 발생한 l차 예비력 에너지 사용량 비용

r'^{t}_{l+}: 실시간 t에서의 양(+)의 l차 예비력 사용량

r'^{t}_{l-}: 실시간 t에서의 음(-)의 l차 예비력 사용량

λ'^{t}_{l+}: 실시간 t에서의 양(+)의 l차 예비력 사용 가격

λ'^{t}_{l-}: 실시간 t에서의 음(-)의 l차 예비력 사용 가격

T_l : 예비력 자원 l의 공급유지시간

T_k :고려하는 전체기간

4.2 예비력의 상호관계를 고려한 실시간 수급균형

4.2.1 논문의 가정

본 절에서는 논문에서 가정하는 실시간에서의 수급 상황의 변화에 따라 어떻게 각 예비력이 실행되는지를 설명한다. 우선 각 예비력간의 관계를 설명하기 위해 필요한 몇 가지 가정은 다음과 같다.

1) 1차 예비력은 고려하지 않는다.

2) 하나의 SO가 있는 단일 계통을 고려하였다.

3) 3차 제어의 실행은 2차 예비력 용량이 모두 소진되었을 때이며, 2차 예비력 용량을 기준으로 실행된다. DLC와 부하차단 역시 2차 예비력 용량을 기준으로 실행한다.

4) 각 주파수 제어의 실행지연 시간은 없다

가정 1)은 기능적으로 1차 예비력과 나머지 수급조정자원이 기능적으로 차이가 있기 때문에 논문에서 고려하지 않았다. 가정 2)는 ACE에서 연계선 전력조류를 고려하지 않고 단일 계통에서의 수급불균형에 따른 주파수오차만을 고려한다는 것을 의미한다. 가정 3)은 3차 예비력, DLC, 부하차단 실행 기준에 대한 사항이다. 앞선 2장에서 설명한 것처럼 2차 예

비력 필요용량은 3차 제어, DLC, 부하차단의 실행기준이 된다. 2차 예비력의 잔여용량과 수급불균형의 상태에 따라 3차 예비력의 실행하는 에너지양이 결정되는데, 본 논문에서는 문제의 단순화를 위해 2차 예비력이 모두 소진되었을 때 3차 예비력이 그 용량만큼 실행되어 2차 예비력을 초기의 상태로 회복시키는 것으로 가정하였다. DLC는 2차와 3차 예비력이 모두 포화되었을 때 2차의 회복을 목적으로 실행되며, 부하차단은 2차, 3차 예비력, DLC 자원이 모두 포화되었을 때, 2차 예비력을 다시 완화시켜주는 것을 목적으로 한다. 요컨대, 3차 예비력, DLC, 부하차단의 운영기준은 2차 예비력 용량의 포화여부이며 3차, DLC, 부하차단의 순으로 각 수급조정자원이 실행되어 2차 예비력 포화를 완화시킨다.

4.2.2 실시간 수급 균형과 예비력 상호관계에 따른 실행

본 절에서는 각 수급 상황에 따라 어떤 제어가 어떻게 실행되는지를 수식으로 정식화하겠다.

$$P_d^t = P_e^t + P_r^t \tag{4.7}$$

여기서 P_d^t는 시간 t에서 실제 수요, P_e^t는 에너지공급 계획량, P_r^t는 수급 불균형의 크기이다. 수급 불균형의 크기는 EMS 제어신호 주기마다 ACE를 적분한 값이기 때문에, 각 시점 t에서의 수급 불균형양의 크기는 다음의 적분 식으로 표현할 수 있다. 아래 수식의 K는 적분기이득을 뜻한다.

$$P_r^t = -K\int ACE dt \tag{4.8}$$

여기서 ACE는 2장의 수식 (2.7)에서 정식화되었다.

수급불균형이 발생하면, 각 예비력들은 필요에 따라 실행된다. 이 때 각 예비력 상태는 이전 상태에서 현재 실행된 값을 더한 것이다.

$$rl_l^t = rl_l^{t-1} + r'_l,\ \forall l = 2,3,4,5 \tag{4.9}$$

여기서 rl_l^t은 시간 t에서 각 수급조정자원 l의 상태, 즉, t에서의 각 예비력의 실행 크기를 뜻한다. 그리고 r'^t_l는 t에서의 각 수급조정자원 l의 실행량이다. 현 단계에서 다음 단계까지 수급불균형의 변동은 각 예비력 상태의 변동으로 해소되며, 이는 각 예비력의 실행으로 발생한 수급 불균형을 0으로 만든다는 것을 의미한다.

$$\Delta P_r^t = \sum_{l=2}^{5} \Delta rl_l^t = \sum_{l=2}^{5} \Delta r'^t_l \tag{4.10}$$

본 논문의 가정에 따라 각 예비력의 실행은 2차 예비력 필요용량을 기준으로 실행된다. 또한 각 예비력은 수급 분균형의 변동량에 따라 2차 예비력 필요용량의 정수 배로 실행된다.

$$\Delta P_r^t = r'^t_2 + \sum_{l=2}^{5} n_l^t r_2^t \tag{4.11}$$

여기서 n_l^t는 해당 예비력 자원 l의 실행상수로서 정수 값이다. 식 (4.11)의 마지막 좌변 값을 기준으로 다시 구성하면 다음과 같다.

$$n_l^t = \frac{\Delta P_r^t - \sum_{n=2}^{l} r'^t_n}{r_2^t}, \ \forall l = 2,3,4,5 \tag{4.12}$$

식 (4.12)는 n_l^t의 정의에 따라 정수 값으로 변경되어야한다. 양(+)의 변동과 음(-)의 변동에서 최소실행조건을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_l^t = \begin{cases} \left\lfloor \dfrac{\Delta P_r^t - \sum_{l=2}^{5} r'^t_l}{r_2^t} \right\rfloor & if \quad \dfrac{\Delta P_r^t - \sum_{l=2}^{5} r'^t_l}{r_2^t} > 0 \\ \left\lceil \dfrac{\Delta P_r^t - \sum_{l=2}^{5} r'^t_l}{r_2^t} \right\rceil & otherwise \end{cases} \quad \forall l = 3,4,5 \tag{4.13}$$

4.3 예비력 간의 상호관계를 고려한 예비력 필요 용량 결정

본 절에서는 4.2절에서 제안한 각 예비력 간의 상호관계를 고려하여, 최적 예비력 필요용량을 구하는 방법을 제안한다. 만약 2차 예비력 필요용량이 충분히 많다면, 3차 예비력의 실행된 에너지양이 작다. 반대로 2차 예비력 필요용량이 작다면, 3차 예비력의 실행된 에너지양이 전의 경우보다 증가한다. 이를 확장하면 2차 예비력과 3차 예비력의 필요용량이 작다면 DLC의 실행량이 크며, 2차 예비력과 3차 예비력의 필요용량이 크다면 DLC의 실행량은 작다. 또한 2차, 3차, DLC 용량과 부하차단의 관계 역시 동일하다.

기간 k에서의 예비력 실행의 목적함수는 양(+)의 방향과 음(-)의 방향의 예비력 비용을 최소화하는 것이다.

$$C_{FCR}^{k} = \min_{r_{l+}^{k}, r_{l-}^{k}} (C_{FCR+}^{k} + C_{FCR-}^{k}), \quad l = 2,3,4 \tag{4.14}$$

$$C_{FCR+}^{k} = C_{r+}^{k}(r_{+}^{k}) + C'^{k}_{r+}(r'^{k}_{+}) \tag{4.15}$$

$$C_{FCR-}^{k} = C_{r-}^{k}(r_{-}^{k}) + C'^{k}_{r-}(r'^{k}_{-}) \tag{4.16}$$

C_{FCR}^{k}: 기간 k에서 전체 예비력 비용

C_{FCR+}^{k}: 기간 k의 양(+)방향의 예비력 비용

C_{FCR-}^{k}: 기간 k의 음(-)방향의 예비력 비용

식 (4.15)와 식 (4.16)은 각 예비력의 에너지비용을 나타내는데, 예비력 필요용량을 결정하는데 있어 기댓값으로 나타내어야한다. 만약 $f_r(x)$를 수급불균형 크기 x가 발생하는 확률분포 함수로서 정의한다면, 예비력 에너지 사용에 대한 기대비용은 양(+)과 음(-)에 대해 다음의 수식으로 표현될 수 있다.

$$
\begin{aligned}
E(C_{FCR+}^{k}) &= \sum_{l=2}^{4} C_{rl+}^{k}(r_{l+}^{k}) + \int_{r_{2+}^{k}}^{r_{2+}^{k}+r_{3+}^{k}} \lambda'^{k}_{3+}(x) x f_r(x) \\
&+ \int_{r_{2+}^{k}+r_{3+}^{k}}^{r_{2+}^{k}+r_{3+}^{k}+r_{4+}^{k}} \lambda'^{k}_{4+}(x) x f_r(x) + \int_{r_{2+}^{k}+r_{3+}^{k}+r_{4+}^{k}}^{\infty} VOLL(x) x f_r(x)
\end{aligned}
\tag{4.17}
$$

$$
\begin{aligned}
E(C_{FCR-}^{k}) &= \sum_{l=2}^{4} C_{rl-}^{k}(r_{l-}^{k}) + \int_{-r_{2-}^{k}-r_{3-}^{k}}^{-r_{2-}^{k}} \lambda'^{k}_{3-}(x) |x| f_r(x) \\
&+ \int_{-r_{2-}^{k}-r_{3-}^{k}-r_{4-}^{k}}^{-r_{2-}^{k}-r_{3-}^{k}} \lambda'^{k}_{4-}(x) |x| f_r(x)
\end{aligned}
\tag{4.18}
$$

여기서 식 (4.18)의 우변의 마지막 항이 식 (4.17)에 부호가 반대인 항으로 없는 이유는 해당 확률이 0에 가깝고, 현실적으로 계약되지 않는 부

하의 사용량을 증가시키는 것은 개념적으로 적합하지 않기 때문이다. 문제의 결정 변수인 각 용량(r_2^k, r_3^k, r_4^k)는 규정된 시간간격(interval) 동안 동일하게 유지된다. 보통 시간간격 k은 일반적으로 경제급전 주기로 결정되며, SO가 그 기준을 정한다. 앞서 설명하였던 것처럼 실시간 수급균형자원의 가격은 용량가격과 에너지가격으로 구분되며 국가별로 다양하게 전개되는데, 위 수식에서는 2차 예비력은 용량가격만을, 3차 예비력과 DLC는 용량과 에너지 가격 모두를, 부하차단을 에너지가격만을 보상받는 것으로 가정하였다. 이 때 목적함수 $R(r_{l+}^k, r_{l-}^k)$는 다음과 같이 표현된다. 예비력 필요용량 비용과 사용용량 비용의 기댓값의 합을 의미한다.

$$\min_{r_{l+}^k, r_{l-}^k} \left\{ R(r_{l+}^k, r_{l-}^k) = E(C_{FCR+}^k) + E(C_{FCR-}^k) \right\}, \forall l = 2,3,4 \tag{4.19}$$

제 5 장 예비력 필요용량 결정 방법 모델링

5.1 동적 계획법

예비력 용량 결정 문제는 목적함수를 만족시키는 각 예비력의 용량을 구하는 문제이다. 시간이 지남에 따라 수급불균형의 상태가 변화하고, 정해진 시간에 해당 용량을 결정하고 각 예비력이 정해진 규칙에 따라 실행되는 문제는 동적계획법을 통해 정식화할 수 있다. 이 방법은 기존의 단일단계의 문제였던 예비력 용량 결정 문제를 새롭게 다중단계로 생성시켰다는데 의의가 있다. 본 절에서는 우선 동적계획법에 대해 살펴보고, 동적계획법을 이용하여 예비력 용량 결정 문제 모델링을 한다.

다중단계의 예비력 용량결정 문제는 수학적으로 수급 불균형의 상태(state), 제어(control)로써의 용량 결정, 불확실성 변수(uncertainty)인 수급불균형의 변동을 가진 변수 등을 포함한 동적계획법 문제로 정식화 될 수 있다. 동적 계획법은 전체 N 단계(stage)의 문제를 우선 1 단계의 문제를 푸는 것으로 시작하여, 순차적으로 각 단계의 문제를 풀어 최적 해를 찾아내는 방법을 의미한다. 기본적으로 시간적으로 가장 나중의 문제를 첫 번째로 풀며, 이전 단계의 문제의 역순으로 푸는 역진귀납법(backward induction)을 사용한다.

시간이 일련의 의사결정 기준의 단계로 나눠지고, 제어 변수에 대한 결정(decision)은 각 단계의 시작부분에서 내려진다. 즉 단계는 결정시점(decision epoch)이며, 단계와 단계 사이는 기간(period)가 된다.

동적 시스템은 다음과 같은 형태이다[60-62].

$$x_{k+1} = t_k(x_k, u_k, w_k),\ k = 0,1,...,N-1 \tag{5.1}$$

여기서 t_k는 전이함수(transition function), k는 시간지표, x_k는 시간 k에서의 상태, u_k는 시간 k에서의 제어 변수, w_k는 확률 변수이다. 제어 변수 u_k는 허용 가능한 해에 속해야 하고, 일반적으로 다음과 같이 선택된다.

$$\begin{aligned} & u_k = \mu_k(x_k) \\ & s.t \\ & u_k \in U_k \end{aligned} \tag{5.2}$$

여기서 $\mu_k(x_k)$는 제어 정책(control policy)라 정의하며, 각 의사결정 시점 k에서의 제어 규칙을 구체화시킨다.

각 단계에서 비용 또는 이득이 발생하고, 정책은 최소 비용 또는 최대 이득에 대한 제어 값을 의미한다. 따라서 동적계획법의 문제는 비용을 최소화하거나 이득을 극대화시키는 제어 정책을 결정하는 것이다. 최소 비용의 정확한 정의는 범위가 유한 구간(finite horizon)인지 무한 구간(infinite horizon)인지에 따라 다르게 정의되는 본 논문의 문제와 관련된 유한구간의 문제에 대해 설명한다.

유한 구간은 동적 계획법의 목적함수는 유한의 N 단계에 대한 총비용이 최소화되는 것을 의미한다. 이 때 각 단계 k에서 발생하는 비용은 $f_k(x_k,u_k,w_k)$이며, 각 마지막 단계의 종착(terminal) 비용은 $f_N(x_N)$이다. 목적함수를 충족시키는 최적 정책을 찾는 과정은 수학적으로 다음과 같다.

$$V_N(x_N) = f_N(x_N) \tag{5.3}$$

$$V_k(x_k) = \min_{u_k \in U_k(x_k)} E\{f(x_k,u_k,w_k) + V_{k+1}(f(x_k,u_k,w_k))\} \tag{5.4}$$

$V_k(x_k)$는 의사결정 시점 k에서의 최적 기대 비용이다. 역진 귀납법에 따라 마지막 단계 N에서 출발하여 종착비용을 계산하는데서 시작한다. 이 동적계획법은 $f_{k+1}(x_{k+1})$의 계산 결과를 통해 $V_k(x_k)$ 역방향으로 계산되며, 이 과정이 첫 단계에 도달할 때까지 반복된다. 최적 제어 정책은 식

(5.4)를 각 상태 x_k에서 최솟값을 얻는 $\mu_k^*(x_k)$의 형태로 구한다. 그리고 최적 정책의 값 u_k^*는 유일한 값이 아닌 여러 값을 가질 수도 있다. 여기서 식 (5.4)의 관계를 '최적해의 법칙(the principle of optimality)'라고 한다. 그 의미는 현재 상태 x_k와 현재의 결정 u_k과 무관하게 결정에 따른 다음 단계의 x_{k+1}이 주어졌을 때, 마지막 단계 N까지 연계된(subsequent) 결정들이 최적이라는 것을 뜻한다.

5.2 동적 계획법을 통한 예비력 필요 용량 결정

현재 많은 국가에서 적용되고 있는 예비력 필요 용량 결정 방법이 가지는 가장 큰 한계는 전체 운영기간동안 수급 불균형의 크기 및 변동성과 각 예비력 자원의 기능적, 경제적 상호관계를 반영하지 못한다는 사실이다. 운영기간동안 예비력의 운영에 직접적인 영향을 줄 수 있는 요소가 변화하더라도 동일한 필요용량을 유지하는 현재 방식은 운영기간을 예비력 용량 결정 시점으로 나눠 동적 계획법에 따라 각 상황에 따라 가변적인(adaptive) 필요용량을 결정하는 동적 계획법의 문제로 정식화할 수 있다.

일반적으로 동적계획법 알고리즘은 많은 확률론적 최적화 문제에 적용 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 동적계획법은 비다항식(non-polynomial)의 차원의 급증 문제가 있다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 수식 (4.17)와 (4.18)에서 연속적 확률분포 함수 $f(x)$로 표현되는 수급불균형의 크기(P_r^t)를 동적 계획법의 이산적 단계로 변화시킬 때 계산적 한계로써의 “차원의 저수(curve of dimensionality)”를 피하기 위해 7단계의 이산확률분포($+3\sigma,+2\sigma,+\sigma,0,-\sigma,-2\sigma,-3\sigma$)로 한정하여 이를 상태의 기준으로 정의한다. 즉, 현재 단계의 특정 상태에서 다음 단계의 상태로 갈 수 있는 경로를 7가지로 정의하였다는 것을 의미한다. 여기서 수급 불균형의 변동 확률 $\Pr(x_{k+1}/x_k,u_k)$은 기본적으로 정규분포를 따르지만, SO가 경험과 실시간 정보를 통해 각 수요의 변동기준의 확률을 지

정할 수도 있다.

우선, 운영기간(e.g 1일) 동안을 예비력 용량 결정 주기(e.g 30분, 1시간)로 나누고 이를 동적계획법의 단계 k으로 정의한다. 그리고 단계와 단계 사이를 불확실성이 현실화되는 기간으로 정의한다. 본 논문에서는 예비력 필요용량 결정문제에서 초기의 상태는 0으로 하였다. 이는 예비력 용량결정문제의 시작의 위치에서는 수급불균형의 상태가 발생하지 않았다는 것을 의미한다.

$$x_0 = 0 \tag{5.5}$$

여기서 상태 천이는 우선 2차, 3차, DLC 용량과 에너지양의 관계와 수급 불균형의 크기의 변동에 따라 결정된다.

$$x_{k+1} = \Delta P_r^k - \sum_{i=3}^{5} r'^k_i(x_k) \tag{5.6}$$

각 단계에서의 목적함수는 앞 장에서 정의된 식 (4.19)와 같다.

$$f_k(x_k, u_k, w_k) = R(r^k_{i+}, r^k_{i-}) \tag{5.7}$$

여기서 결정변수와 최적전략은 각 예비력의 필요용량을 결정하는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} & u_k = \mu(r_2^k, r_3^k, r_4^k) \\ & s.t \\ & u_k \in U_k \end{aligned} \tag{5.8}$$

최적 결정의 계산순서는 마지막 단계에서 우선 시작하며, 수식 (5.9) 종료시점의 종착비용은 모든 운영기간이 종료한 시점에서의 결정이기 때문에 0이다.

$$V_N(x_N) = f_N(x_N) = 0 \tag{5.9}$$

예비력을 포함한 수급조정자원의 최적 필요용량은 동적계획법의 정의에 따라 재귀적 방법으로 구해진다.

$$V_k(x_k) = \min_{r_2^k, r_3^k, r_4^k} E\{f_k(x_k, r_i^k, w_k) + V_{k+1}(f_k(x_k, r_i^k, w_k))\},\ \forall i = 2, 3, 4 \tag{5.10}$$

제 6 장 사례 연구

본 장에서는 4장, 5장에서 제안한 예비력 간의 상호관계를 주파수제어예비력 필요 용량 결정 문제에 적용하여, 사례연구의 결과를 통해 그 타당함을 보이고자 한다.

6.1 수급 불균형 모형

본 논문에서 정의하는 수급불균형 모형은 실시간에서 수요와 공급의 불일치 양(load-generation imbalance)을 의미한다. 실시간에서 변동하는 모든 수요 모델링은 주로 월 단위(monthly), 주 단위(weekly) 및 일 단위(daily)의 수요를 예측하는 방법론으로 제시된다. 또한 단기 수요(short term)는 보통 1시간 단위에서 일 단위의 수요를 의미한다. 그러나 본 연구에서는 실시간 단기 운영과 직접적인 관련을 가지는 수초(e.g. 2초 또는 4초) 단위의 수요를 모델링 하였다.

해당 수요모델은 단기 가격예측 모델을 참고하여 수요 변동의 경향(tendency)와 변동성(volatility)을 함께 포함하는 시변확률변수(time-varying random variable)로 취급하였다. 변동하는 수요의 이러한 특성은 표준 위너과정(generalized Wiener process)로 나타낼 수 있다. 위너과정은 경향성이 있는 브라운 운동(Brownian motion with drift)으로 묘사되며 다음

과 같이 정의된다[63].

$$dx = \alpha dt + \sigma dz \tag{6.1}$$

이 식에서 z는 위너 과정를 따르는 변수이며 α,σ는 상수이다. 여기서 α는 변동의 경향(drift)을 나타내며, σ는 분산(variance)을 의미한다. 그리고 수식 (6.1) 에서 수요의 변화(dx)는 정규분포를 따르며, 이 때 분산은 다음과 같다.

$$V(\Delta x) = \sigma^2 \Delta t \tag{6.2}$$

dz는 백색소음(white noise)라 하며, 매우 짧은 시간 Δt에 대해 $z = \epsilon\sqrt{\Delta t}$가 성립한다. 여기서 ϵ는 평균 0, 표준편차 1인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 이 때 z는 표준 위너과정을 따른다고 말한다.

위의 일반화된 위너과정은 해당 변수가 어떻게 변동하면서 변하는지를 설명해주지만, 추가적 특성을 포함시키기 위해 다른 여러 모델들도 개발되어 왔다. 그 중 하나는 수 초 단위의 수요가 일정한 경향과 무작위성(randomness)을 나타낸다 하더라도 평균값으로 회귀하는 특성을 포함시킨 평균 회귀(mean reversion) 모델이다. 또 하나는 실시간 수급 상황을 설명하는데 있어, 발전기 탈락과 같은 예상치 못한 상황을 반영하기 위해

서는 점프확산(jump diffusion) 모델이 효과적으로 볼 수 있다. 원래 이 모델은 금융시장에서의 예측하기 힘든 가격의 스파이크(spike)를 설명하기 위해 제안되었는데, 해당 변수에 큰 충격을 불연속적으로 주는 사건을 고려할 때 효과적인 것으로 알려져 있다. 따라서 실시간 수요모델에서 발전기 사고를 포함시킬 때 활용하였다.

6.1.1 임의보행(random walk) 모델

임의보행 모델은 브라운 운동 모델과 위너 과정과 밀접한 관련을 가진다. 이산시간 하의 임의보행의 시간 폭을 무한히 작게 할 때, 극한에서의 확률과정을 표준 위너과정(또는 브라운 운동)으로 정의한다. 따라서 임의 보행은 위너 과정의 이산적 모형으로 해석할 수 있다.

$$Q_n = Q_{n-1} + \alpha \Delta t + \sigma \epsilon_t \sqrt{\Delta t} \tag{6.3}$$

여기서 α는 수요변동의 기울기, $\sigma \epsilon_t \sqrt{\Delta t}$은 임의보행의 변동성, Q_n은 현재(n)의 수요 값, Q_{n-1}은 이전 시간($n-1$)에서의 수요 값을 의미한다.

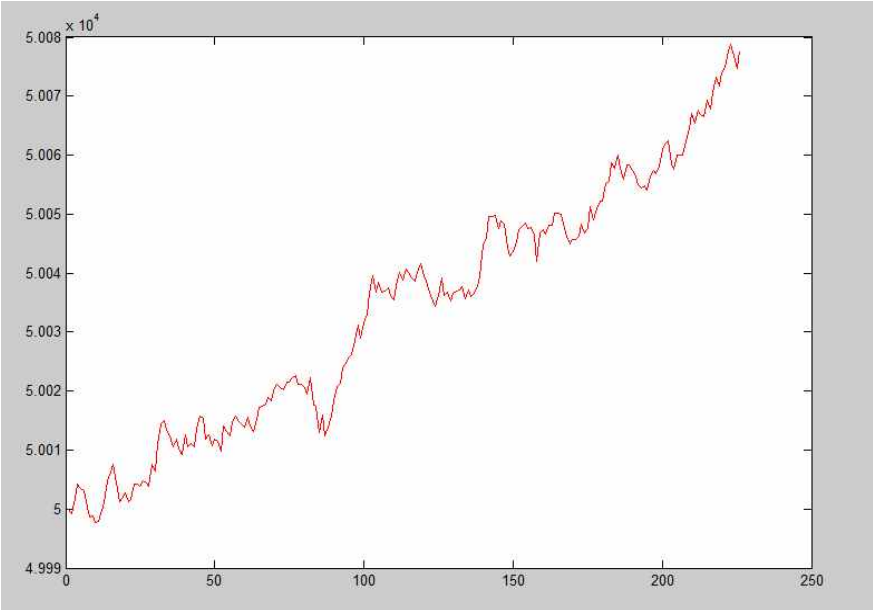

그림 6.1 임의보행의 예

6.1.2 평균회귀 모델

평균회귀 모델에서는 일반적으로 해당 변수의 경향을 평균회귀 정도(mean reverting rate)와 장기 평균(long run mean)을 정의한다. 즉, 수요가 장기적 평균값에서 이탈했을 때, 평균을 향해서 회귀 경향이 있는 확률과정을 의미하며, 본 연구에서는 온슈타인-울렌벡(Ornstein-Uhlenbeck) 확률과정을 적용하였다. 해당 모델의 방정식은 다음과 같다.

$$Q_n = Q_{n-1} + \eta(\mu - Q_{n-1})\Delta t + \alpha\Delta t + \sigma\epsilon_t\sqrt{\Delta t} \qquad (6.4)$$

여기서 μ는 장기평균을 의미하는데, 수요가 충분한 시간이 지났을 때 (in the long run) 이르게 되는 값을 의미한다. 본 연구에서는 SO가 경제급전의 기준시간(e.g. 30분 or 1시간) 동안 발전계획량(scheduled generation quantity)을 장기평균으로 사용하였다. η는 평균회귀 속도(speed of reversion)로 정의되며, 수요가 평균값에 얼마나 빨리 근접하는지를 나타낸다. 따라서 이 1에 가까워질수록 평균값에 회귀하는 특성이 강해진다[63].

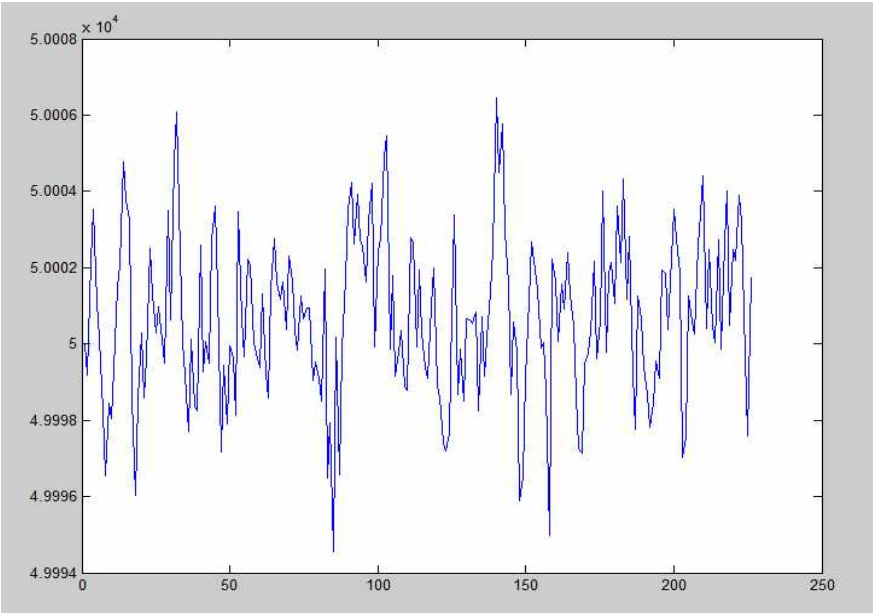

그림 6.2 평균회귀의 예

6.1.3 점프확산 모델

지금까지 논의했던 임의보행 모델과 평균회귀 모델은 그 표본 경로가 연속적인 것이었다. 본 논문에서는 불연속적인 사고 등에 의한 발전기 탈락은 수요의 급증으로 표현할 수 있으며, 이는 불연속적인 점프확산 과정으로 설명할 수 있다. 점프의 크기(jump size)는 사전에 발전기 탈락의 크기에 의해 결정되며, 점프가 일어나는 횟수들은 포아송 과정을 따르기 때문에 충분히 작은 시간 동안에 점프가 두 번 이상 발생할 확률은 매우 낮다. 또 발전기 운영에 있어 경제급전 기간은 상대적으로 단기적 시간이기 때문에, 사고의 빈도수를 1회로 제한하였다. 점프확산 모델은 발전기 탈락 성분이 수요 스파이크 성분으로서 평균 회귀 모델에 더해졌다. 따라서 다음과 같은 평균 회귀 점프 확산(mean-reversion jump diffusion) 모델이 성립된다.

$$Q_n = Q_{n-1} + \eta(\mu - Q_{n-1})\Delta t + \alpha\Delta t + \sigma\epsilon_t\sqrt{\Delta t} + \Delta J_n \qquad (6.5)$$

여기서, 마지막 항의 ΔJ는 점프의 크기이며, I_n는 사건발생 여부를 나타내는 지표확률 변수이며 다음과 같이 정의된다.

$$I_n = \begin{cases} 1 \; with probabilty \; pr_I \\ 0 \; with probabilty \; 1 - pr_I \end{cases} \qquad (6.6)$$

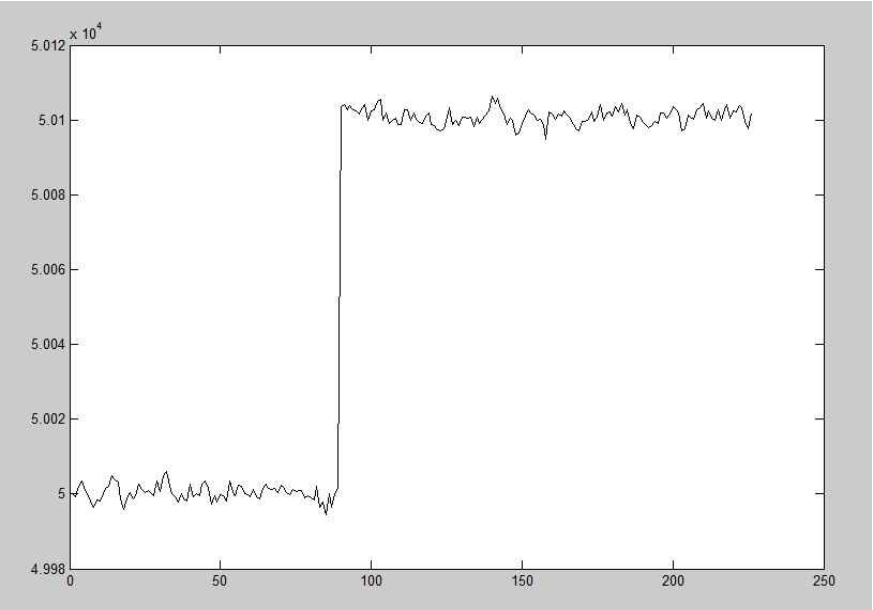

그림 6.3 점프 확산의 예

6.1.4 수급불균형 모델의 단계 및 상태 정의

현 단계에서 다음 단계로 천이할 때는 각 상태에서 7 개($+3\sigma$,$+2\sigma$, $+\sigma$,0,$-\sigma$,-2σ,-3σ)의 이산적 상태로 이동한다고 가정하였다. 이러한 가정에 따라 수급불균형의 변동량의 크기를 상태로서 정의하였다. 1은 각 단계에서 가장 큰 수급불균형의 변동량(양의 가장 큰 변동)을 나타내며, 숫자가 증가할수록 수급불균형의 변동이 낮아진다. 가령, 단계 1에서 단계 2로의 이동에서 상태 4는 변동이 없는 것을, 7은 가장 낮은 수급변동(음의 가장 큰 변동)량을 의미한다.

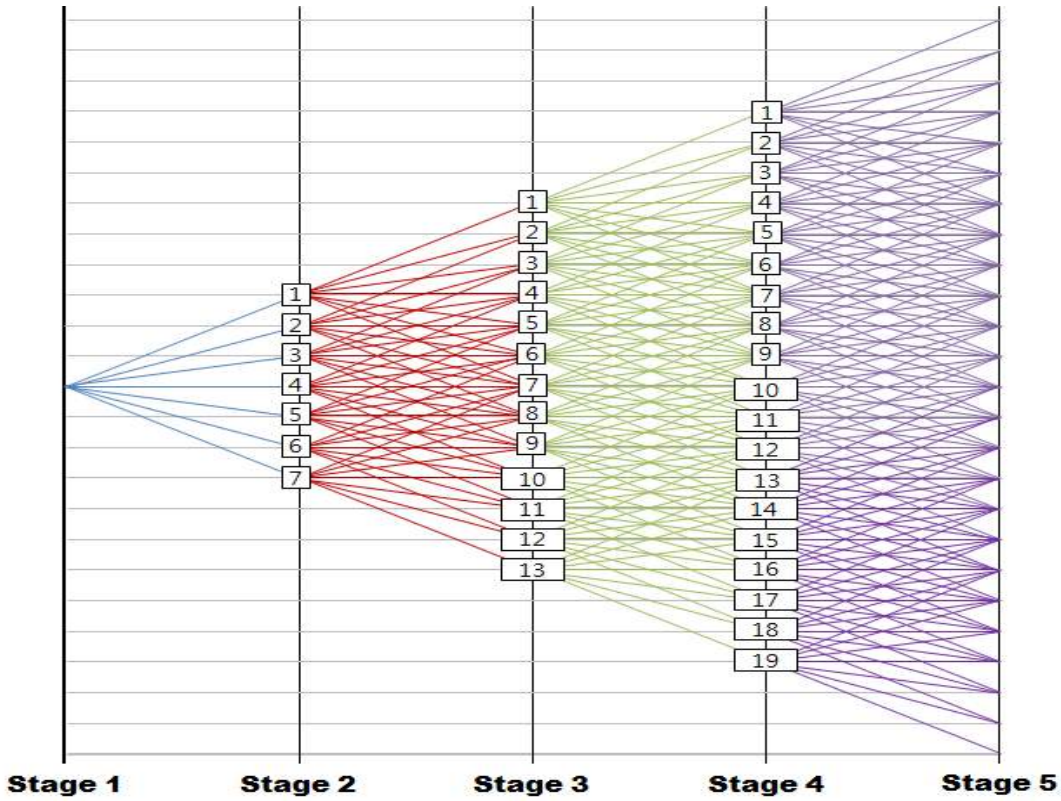

그림 6.4 수급불균형 모델에서의 상태 및 단계

6.2 예비력 간 상관관계를 고려한 최적용량 결정

6.2.1 사례연구 개요

우선 모든 수급불균형 모델에 대한 데이터로서 다음의 수급조정 자원 가격을 독일시장 가격 데이터[64]를 반영하여 생성시켰다. 용량가격과 에너지가격의 단위가 각각 [$/MW], [$/MWh]으로 다르기 때문에, 각 수급조정자원의 실행유지시간을 단계와 단계사이의 기간과 같다고 고려하였다. 사례연구에서는 해당기간을 1시간으로 산정하였으며, 4주기 동안 용량이 유지되기 때문에 이를 고려하여 가격에 반영하였다.

표 6.1 예비력 가격 기준 입력 값

	2차 용량	3차 용량	3차 에너지	DLC 용량	DLC 에너지	부하차단 에너지
양(+)의 기울기	10	5	10	2	30	N/A
음(-)의 기울기	10	1	1	0.5	2	N/A
양(+)의 y절편	100	1	50	5	100	10000
음(-)의 y절편	1	1	20	0.1	40	1000

수급불규형의 크기를 시간 기준의 확률과정에 따라 생성시키기 위해, 기준 값으로 표 6.2의 값을 적용하였다.

표 6.2 수급불균형 생성 기준 입력 값

구 분	샘플크기	표준편차	평균회귀성	점프사이즈	Stage수	초기값	종료비용
크기	2000(개)	100(MW)	0.5	300(MW)	5(개)	0(MW)	0($)

6.2.2 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 1: 임의보행

(1) 임의보행에서 수급불균형 천이확률

표 6.2의 값에 따라 식 6.3으로 표현되는 임의보행을 수급불균형의 크기를 시간 기준의 확률과정에 따라 생성시키기 위해, 기준 값으로 표 6.2의 값을 적용하였다. 이 때 각 단계에서의 다음 단계로의 천이확률은 표 6.3부터 표 6.6의 값으로 산출되었다. 해당 확률은 각 상태에서 정규분포와 유사한 형태를 보였다.

표 6.3 임의보행 천이확률 (stage 1 ⇒ stage 2)

Stage 1 ⇒ 2		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.007484	0.058016	0.161508	0.547692	0.159458	0.054771	0.011071

표 6.4 임의보행 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3)

Stage 2 ⇒ 3		state						
Stage I \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.006707	0.058793	0.161897	0.547303	0.159381	0.05481	0.01111
	2	0.00645	0.05905	0.162025	0.547175	0.159355	0.054822	0.011122
	3	0.006689	0.058811	0.161906	0.547294	0.159379	0.054811	0.011111
	4	0.009919	0.055581	0.160291	0.548909	0.159702	0.054649	0.010949
	5	0.00894	0.05656	0.16078	0.54842	0.159604	0.054698	0.010998
	6	0.006539	0.058961	0.161981	0.547219	0.159364	0.054818	0.011118
	7	0.010672	0.054828	0.159914	0.549286	0.159777	0.054611	0.010911

표 6.5 임의보행 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4)

Stage 3 ⇒ 4		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.006994	0.058506	0.161753	0.547447	0.159409	0.054795	0.011095
	2	0.007328	0.058172	0.161586	0.547614	0.159443	0.054779	0.011079
	3	0.008798	0.056702	0.160851	0.548349	0.15959	0.054705	0.011005
	4	0.008694	0.056806	0.160903	0.548297	0.159579	0.05471	0.01101
	5	0.00885	0.05665	0.160825	0.548375	0.159595	0.054703	0.011003
	6	0.010825	0.054675	0.159837	0.549363	0.159793	0.054604	0.010904
	7	0.010729	0.054771	0.159886	0.549314	0.159783	0.054609	0.010909
	8	0.006807	0.058693	0.161846	0.547354	0.159391	0.054805	0.011105
	9	0.009657	0.055843	0.160422	0.548778	0.159676	0.054662	0.010962
	10	0.009665	0.055835	0.160418	0.548782	0.159676	0.054662	0.010962
	11	0.009713	0.055787	0.160393	0.548807	0.159681	0.054659	0.010959
	12	0.009629	0.055871	0.160435	0.548765	0.159673	0.054664	0.010964
	13	0.006288	0.059212	0.162106	0.547094	0.159339	0.054831	0.011131

표 6.6 임의보행 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5)

Stage 4 ⇒ 5		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.007675	0.057825	0.161413	0.547787	0.159477	0.054761	0.011061
	2	0.009712	0.055788	0.160394	0.548806	0.159681	0.054659	0.010959
	3	0.006458	0.059042	0.162021	0.547179	0.159356	0.054822	0.011122
	4	0.008475	0.057025	0.161013	0.548187	0.159557	0.054721	0.011021
	5	0.010257	0.055243	0.160121	0.549079	0.159736	0.054632	0.010932
	6	0.009828	0.055672	0.160336	0.548864	0.159693	0.054654	0.010954
	7	0.010633	0.054867	0.159933	0.549267	0.159773	0.054613	0.010913
	8	0.010504	0.054996	0.159998	0.549202	0.15976	0.05462	0.01092
	9	0.008981	0.056519	0.160759	0.548441	0.159608	0.054696	0.010996
	10	0.006747	0.058753	0.161876	0.547324	0.159385	0.054808	0.011108
	11	0.009931	0.055569	0.160285	0.548915	0.159703	0.054648	0.010948
	12	0.009812	0.055688	0.160344	0.548856	0.159691	0.054654	0.010954
	13	0.006085	0.059415	0.162207	0.546993	0.159319	0.054841	0.011141
	14	0.00704	0.05846	0.16173	0.54747	0.159414	0.054793	0.011093
	15	0.009225	0.056275	0.160638	0.548562	0.159632	0.054684	0.010984
	16	0.006072	0.059428	0.162214	0.546986	0.159317	0.054841	0.011141
	17	0.006707	0.058793	0.161896	0.547304	0.159381	0.05481	0.01111
	18	0.008647	0.056853	0.160927	0.548273	0.159575	0.054713	0.011013
	19	0.006693	0.058807	0.161904	0.547296	0.159379	0.05481	0.01111

(2) 임의보행에서 예비력 용량 결정

생성된 표 6.3에서 표 6.6까지의 천이확률을 4장 및 5장에서 제시한 예비력 간 관계를 고려한 용량 결정방법에 따라 결과를 산출하였다. 이 때 각 단계와 상태에서의 최적 용량은 다음의 표 6.7에서부터 표 6.10까지의 값으로 산출되었다.

표 6.7 단계 1에서의 예비력 용량 결정(임의보행)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(1, 1)	100	100	200

표 6.8 단계 2 에서의 예비력 용량 결정(임의보행)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(2, 1)	100	300	100
(2, 2)	100	200	100
(2, 3)	100	100	100
(2, 4)	200	0	200
(2, 5)	300	0	300
(2, 6)	200	0	300
(2, 7)	200	0	400

단계 1과 단계 2의 수급조정자원의 용량결정 결과를 보면, 수급불균형의 변동이 양의 방향으로 클수록 3차 예비력 용량이 증가하며, 음의 방향으로 갈수록 DLC 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 양의 변동에 대해 3차 용량가격과 에너지가격이 2차 용량가격보다 상대적으로 낮다

는 것을 의미하며, DLC 용량가격은 음의 변동에 대해 다른 수급조정자원보다 낮다는 것을 알 수 있다. 각 가격과 수급불균형의 위치에 따라 최적 용량이 변화하는 것을 상기의 사례연구를 통해 확인할 수 있다.

표 6.9 단계 3 에서의 예비력 용량 결정(임의보행)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(3, 1)	200	600	200
(3, 2)	100	600	200
(3, 3)	100	500	200
(3, 4)	100	400	200
(3, 5)	100	300	200
(3, 6)	100	200	200
(3, 7)	100	100	200
(3, 8)	200	0	200
(3, 9)	300	0	200
(3, 10)	200	0	200
(3, 11)	300	0	300
(3, 12)	200	0	400
(3, 13)	200	0	600
(3, 14)	100	0	900

단계 3의 결과는 단계 2의 결과와 크게 다르지 않다. 수급불균형의 변동이 양의 방향으로 가장 크게 증가한 상태 1에서는 가장 많은 수급조정자원의 전체용량을 확보하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 상대적으로 저렴한 양방향의 3차 예비력 자원을 많이 확보하여 경제적인 효율성을 고려하였다. 반면, 음의 방향으로 가장 크게 증가한 상태 14에서는 음의 변동성에 대응하기 위해, 음의 변동에 대해 가장 저렴한 DLC을 크게 확보하고 상대적으로 비싼 3차 예비력을 0으로 하여 전체 운영의 효율성을 극대화시켰다.

표 6.10 단계 4 에서의 예비력 용량 결정(임의보행)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(4, 1)	100	1000	200
(4, 2)	200	800	200
(4, 3)	100	800	200
(4, 4)	200	600	200
(4, 5)	100	600	200
(4, 6)	200	400	200
(4, 7)	100	400	200
(4, 8)	100	300	200
(4, 9)	100	200	200
(4, 10)	100	100	200
(4, 11)	100	0	200
(4, 12)	100	0	300
(4, 13)	200	0	400
(4, 14)	300	0	700
(4, 15)	200	0	600
(4, 16)	100	0	900
(4, 17)	200	0	800
(4, 18)	100	0	1100
(4, 19)	200	0	1000

단계 4에서의 용량결정 역시, 단계 2와 단계 3과 유사한 패턴을 보인다. 다만, 변동성이 이전 단계보다 커진 상태에서는 필요한 수급조정자원의 총 용량이 증가하였다. 음의 방향으로 변동에 대해 3차 예비력이 DLC보다 비싸기 때문에, 해당 용량을 상태 11부터 19까지 0으로 유지하는 것을 확인할 수 있다. 2차 예비력 용량의 최소 값은 전체 예비력 실행의 기준 값이기 때문에, 100[MW]인데 전체적으로 다른자원에 비해 용량가격이 비싸다는 것을 확인할 수 있다. 왜냐하면 전체 상태를 불문하고 2차 예비력 용량은 100[MW]~200[MW]에 머물기 때문이다.

6.2.3 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 2: 평균회귀

(1) 평균회귀에서 수급불균형 천이확률

수급불균형 모델을 평균회귀로 설정하고, 표 6.2에 따라 설정하였을 때 천이확률은 다음과 같다. 임의보행과 비교할 때, 수급불균형의 크기가 0으로 향하는 경향이 강하다는 것을 확인할 수 있다. 특히 표 6.14를 보면, 상태 1에서는 수급불균형이 음의 방향으로 향할 확률이 가장 크며 반대로 상태 19에서는 양의 방향으로 향할 확률이 크다.

표 6.11 평균회귀 천이 확률 (stage 1 ⇒ stage 2)

Stage 1 ⇒ 2		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.007412	0.058088	0.161544	0.547656	0.159451	0.054774	0.011074

표 6.12 평균회귀 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3)

Stage 2 ⇒ 3		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.009962	0.011838	0.055069	0.054131	0.159706	0.159847	0.549447
	2	0.006792	0.015008	0.056654	0.052546	0.159389	0.549605	0.160005
	3	0.008581	0.013219	0.05576	0.15864	0.549168	0.159916	0.054716
	4	0.010655	0.054845	0.159922	0.549278	0.159776	0.054612	0.010912
	5	0.051683	0.162717	0.550859	0.158341	0.054308	0.011046	0.011046
	6	0.162098	0.550549	0.158651	0.05437	0.052302	0.011015	0.011015
	7	0.549872	0.159328	0.160744	0.054506	0.053656	0.010947	0.010947

표 6.13 평균회귀 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4)

Stage 3 ⇒ 4		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.006524	0.015276	0.056788	0.052412	0.159362	0.160019	0.549619
	2	0.009821	0.011979	0.055139	0.054061	0.159692	0.159854	0.549454
	3	0.00898	0.01282	0.05556	0.05364	0.159608	0.159896	0.549496
	4	0.006584	0.015216	0.056758	0.052442	0.159368	0.160016	0.549616
	5	0.006432	0.015368	0.056834	0.052366	0.159353	0.549623	0.160023
	6	0.0065	0.0153	0.0568	0.1576	0.54896	0.16002	0.05482
	7	0.010047	0.055453	0.160227	0.548973	0.159715	0.054643	0.010943
	8	0.04985	0.16455	0.551775	0.157425	0.054125	0.011137	0.011137
	9	0.162307	0.550654	0.158546	0.054349	0.052093	0.011025	0.011025
	10	0.551884	0.157316	0.164768	0.054103	0.049632	0.011148	0.011148
	11	0.551341	0.157859	0.163682	0.054212	0.050718	0.011094	0.011094
	12	0.549432	0.159768	0.159864	0.054594	0.054536	0.010903	0.010903
	13	0.549562	0.159638	0.160125	0.054568	0.054275	0.010916	0.010916

표 6.14 평균회귀 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5)

Stage 4 ⇒ 5		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.010484	0.011316	0.054808	0.054392	0.159758	0.159821	0.549421
	2	0.006749	0.015051	0.056675	0.052525	0.159385	0.160008	0.549608
	3	0.009835	0.011965	0.055132	0.054068	0.159694	0.159853	0.549453
	4	0.009217	0.012583	0.055441	0.053759	0.159632	0.159884	0.549484
	5	0.00753	0.01427	0.056285	0.052915	0.159463	0.159968	0.549568
	6	0.009122	0.012678	0.055489	0.053711	0.159622	0.159889	0.549489
	7	0.010203	0.011597	0.054948	0.054252	0.15973	0.159835	0.549435
	8	0.007117	0.014683	0.056491	0.052709	0.159422	0.159989	0.549589
	9	0.008098	0.013702	0.056001	0.053199	0.15952	0.15994	0.54954
	10	0.010016	0.011784	0.055042	0.054158	0.159712	0.159844	0.549444
	11	0.008297	0.013503	0.055901	0.053299	0.15954	0.54953	0.15993
	12	0.007193	0.014607	0.056454	0.157946	0.549029	0.159985	0.054785
	13	0.006365	0.059135	0.162068	0.547132	0.159346	0.054827	0.011127
	14	0.053766	0.160634	0.549817	0.159383	0.054517	0.010942	0.010942
	15	0.161816	0.550408	0.158792	0.054398	0.052584	0.011001	0.011001
	16	0.549972	0.159228	0.160943	0.054486	0.053457	0.010957	0.010957
	17	0.550291	0.158909	0.161583	0.054422	0.052817	0.010989	0.010989
	18	0.55098	0.15822	0.162959	0.054284	0.051441	0.011058	0.011058
	19	0.551714	0.157486	0.164428	0.054137	0.049972	0.011131	0.011131

(2) 평균회귀에서 예비력 용량 결정

평균회귀는 평균에서 멀어질수록, 평균상태로 돌아오는 경향이 강해지는 확률과정을 의미한다. 따라서 평균에서 멀어진 상태일수록 반대반향으로 수요가 이동할 확률이 높다. 이에 임의보행에 비해, 필요용량의 크기가 낮은 것을 결과로서 확인할 수 있다.

표 6.15 단계 1에서의 예비력 용량 결정(평균회귀)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(1, 1)	100	100	200

초기상태의 값은 임의보행과 유사하기 때문에, 평균회귀와 결과와 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다.

표 6.16 단계 2 에서의 예비력 용량 결정(평균회귀)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(2, 1)	100	300	300
(2, 2)	100	200	300
(2, 3)	100	100	300
(2, 4)	100	100	200
(2, 5)	200	0	200
(2, 6)	300	0	300
(2, 7)	200	400	0

그러나 단계 2에서의 결과는 임의보행과 큰 차이를 나타낸다. 양의 방향으로 수급불균형양의 큰 상태에서는 평균값(0)으로 갈려는 확률이 커지기 때문이 음의 경향성의 매우 높다. 이에 따라 음의 예비력 실행이 요청되며, 결과적으로 음의 변동에 대해 가격이 낮은 DLC 자원의 용량이 증가한다. 그러나 양의 변동성도 동시에 존재하기 때문에 3차 예비력 자원과 DLC 자원이 전체 비용 최소화에 따라 적정 용량을 가지게 된다.

표 6.17 단계 3 에서의 예비력 용량 결정(평균회귀)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(3, 1)	200	500	400
(3, 2)	300	300	300
(3, 3)	200	400	200
(3, 4)	200	300	300
(3, 5)	100	300	100
(3, 6)	200	400	100
(3, 7)	100	500	100
(3, 8)	100	500	100
(3, 9)	200	300	100
(3, 10)	300	300	100
(3, 11)	500	200	100
(3, 12)	500	200	300
(3, 13)	300	600	300
(3, 14)	100	900	300

평균회귀 모형에서는 0에 근접한 상태에서는 임의보행보다 더 낮은 예비력 용량이 필요하지만, 오히려 0보다 멀어진 상태에서는 각 상태의 반대방향으로 변동 경향이 강하다는 것을 확인할 수 있다.

표 6.18 단계 4 에서의 예비력 용량 결정(평균회귀)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(4, 1)	400	800	400
(4, 2)	200	800	200
(4, 3)	200	600	200
(4, 4)	300	300	300
(4, 5)	200	400	200
(4, 6)	200	200	400
(4, 7)	300	100	300
(4, 8)	200	0	200
(4, 9)	200	0	400
(4, 10)	200	0	400
(4, 11)	200	0	300
(4, 12)	200	0	100
(4, 13)	200	100	100
(4, 14)	200	100	100
(4, 15)	200	100	100
(4, 16)	400	300	200
(4, 17)	300	400	400
(4, 18)	300	500	600
(4, 19)	200	500	500

단계 4의 결과 역시 단계 3의 결과와 비슷하다. 수급불균형이 큰 상태 일수록 수급조정자원의 총 용량이 크게 필요하며, 복잡해진 변동특성을 반영하여 각 자원의 기대비용에 따라 각 자원의 필요용량이 결정된다. 단계 4의 상태 19에서의 확률은 상대적으로 양의 변동이 크지만 음의 변동도 여전히 영향력이 존재하기 때문에 양의 변동에 대해 비용이 낮은 3차와 음의 변동에 대해 비용이 낮은 DLC의 용량이 같은 크기로 결정되었음을 확인할 수 있다.

6.2.4 수급불균형 모델에 따른 최적 용량 결정 3: 점프확산

(1) 점프확산에서 수급불균형 천이확률

점프확산 모형은 수급불균형의 급작스러운 변동을 포함한다. 본 논문에서는 발전기 탈락 등의 큰 변동이 해당구간에 발생하며 해당 크기는 3σ이며, 주어진 구간동안 점프는 한차례만 발생한다고 가정하였다. 또한 그림 6.4에서 정의한 수급불균형의 상태를 벗어나는 경우 가장 상위의 상태 1로 수렴한다고 가정하였다. 이에 따라 실제적 상황에서의 발전기 탈락과는 다소 차이를 나타낸다. 다만, 본 논문의 가정에 따라 전체적으로 모든 상태에서 양의 방향으로 수급불균형이 변동할 확률이 더 높아졌다.

표 6.19 점프확산 천이 확률 (stage 1 ⇒ stage 2)

Stage 1 ⇒ 2		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.159945	0.079262	0.140664	0.439889	0.127469	0.043866	0.008906

표 6.20 점프확산 천이확률(stage 2 ⇒ stage 3)

Stage 2 ⇒ 3		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.163614	0.075648	0.138803	0.441696	0.127835	0.043682	0.008722
	2	0.161463	0.077799	0.139878	0.440621	0.12762	0.04379	0.00883
	3	0.16277	0.076491	0.139224	0.441274	0.127751	0.043724	0.008764
	4	0.160517	0.078745	0.140351	0.440148	0.127526	0.043837	0.008877
	5	0.161163	0.078099	0.140028	0.440471	0.12759	0.043805	0.008845
	6	0.160908	0.078354	0.140155	0.440343	0.127565	0.043818	0.008858
	7	0.161175	0.078087	0.140022	0.440477	0.127591	0.043804	0.008844

표 6.21 점프확산 천이확률(stage 3 ⇒ stage 4)

Stage 3 ⇒ 4		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.161055	0.078207	0.140082	0.440417	0.127579	0.04381	0.00885
	2	0.161595	0.077667	0.139812	0.440687	0.127633	0.043783	0.008823
	3	0.161801	0.077461	0.139709	0.44079	0.127654	0.043773	0.008813
	4	0.162701	0.07656	0.139259	0.44124	0.127744	0.043728	0.008768
	5	0.160091	0.07917	0.140564	0.439935	0.127483	0.043858	0.008898
	6	0.162931	0.076331	0.139144	0.441355	0.127767	0.043716	0.008756
	7	0.160387	0.078875	0.140416	0.440083	0.127513	0.043844	0.008884
	8	0.163146	0.076115	0.139036	0.441463	0.127789	0.043706	0.008746
	9	0.162822	0.076439	0.139198	0.4413	0.127756	0.043722	0.008762
	10	0.160361	0.0789	0.140429	0.44007	0.12751	0.043845	0.008885
	11	0.160567	0.078695	0.140326	0.440173	0.127531	0.043835	0.008875
	12	0.161595	0.077666	0.139812	0.440687	0.127634	0.043783	0.008823
	13	0.160657	0.078604	0.140281	0.440218	0.12754	0.04383	0.00887

표 6.22 점프확산 천이확률(stage 4 ⇒ stage 5)

Stage 4 ⇒ 5		state						
Stage i \ Stage i+1		1	2	3	4	5	6	7
state	1	0.160547	0.078714	0.140336	0.440163	0.127529	0.043836	0.008876
	2	0.161169	0.078092	0.140025	0.440474	0.127591	0.043805	0.008845
	3	0.16341	0.075852	0.138904	0.441594	0.127815	0.043693	0.008733
	4	0.161677	0.077584	0.139771	0.440728	0.127642	0.043779	0.008819
	5	0.160944	0.078317	0.140137	0.440361	0.127568	0.043816	0.008856
	6	0.162447	0.076815	0.139386	0.441113	0.127719	0.043741	0.008781
	7	0.163066	0.076195	0.139076	0.441422	0.127781	0.04371	0.00875
	8	0.159939	0.079322	0.14064	0.439859	0.127468	0.043866	0.008906
	9	0.162381	0.07688	0.139419	0.44108	0.127712	0.043744	0.008784
	10	0.159867	0.079394	0.140676	0.439823	0.127461	0.04387	0.00891
	11	0.162942	0.076319	0.139138	0.441361	0.127768	0.043716	0.008756
	12	0.15967	0.079592	0.140774	0.439724	0.127441	0.04388	0.00892
	13	0.162008	0.077254	0.139605	0.440893	0.127675	0.043763	0.008803
	14	0.162633	0.076628	0.139293	0.441206	0.127737	0.043731	0.008771
	15	0.160307	0.078954	0.140456	0.440043	0.127505	0.043848	0.008888
	16	0.162554	0.076707	0.139332	0.441167	0.127729	0.043735	0.008775
	17	0.160109	0.079152	0.140555	0.439944	0.127485	0.043858	0.008898
	18	0.162563	0.076698	0.139328	0.441171	0.12773	0.043735	0.008775
	19	0.160049	0.079212	0.140585	0.439914	0.127479	0.043861	0.008901

(2) 점프확산에서 수급불균형 용량결정

표 6.23 단계 1에서의 예비력 용량 결정(점프확산)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(1, 1)	100	200	200

다른 수급불균형모형에서와 다르게 단계 1에서부터 변동성에 증가에 대한 영향을 받는다. 양 방향으로의 변동성이 증가하였기 때문에, 이 때 가격이 상대적으로 낮은 3차 예비력의 용량이 증가하였다.

표 6.24 단계 2 에서의 예비력 용량 결정(점프확산)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(2, 1)	200	700	0
(2, 2)	100	600	100
(2, 3)	100	500	100
(2, 4)	100	400	200
(2, 5)	100	400	100
(2, 6)	200	600	200
(2, 7)	200	700	200

단계 2에서는 수급불균형의 크기가 큰 상태일수록 필요한 용량이 더욱 커진 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 0과 가까운 상태에서는 임의보행과 큰 차이를 나타내지 않았다. 또 앞선 결과에서처럼 3차 용량의 변화가 2차 및 DLC 용량에 비해 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있다.

표 6.25 단계 3 에서의 예비력 용량 결정(점프확산)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(3, 1)	300	1000	200
(3, 2)	200	800	200
(3, 3)	200	600	200
(3, 4)	200	400	200
(3, 5)	100	400	100
(3, 6)	100	400	100
(3, 7)	100	600	100
(3, 8)	100	600	200
(3, 9)	200	600	200
(3, 10)	200	500	100
(3, 11)	200	400	200
(3, 12)	100	400	00
(3, 13)	100	400	300
(3, 14)	200	500	300

단계 3에서는 음의변동부분에 대한 대응하기 위한 예비력 필요용량이 오히려 감소한 것을 확인할 수 있다. 즉, 상태 12부터 상태 19에서는 수급불균형양의 음의 방향으로 변동성이 낮아지기 때문에, 해당 상태에서 음의 방향에 따라 결정되던 평균회귀, 랜덤확산의 경우보다 더 낮은 용량을 필요로 한다. 이 때 용량을 결정하는 것은 양의 방향으로의 수급불균형 변동이다. 본 논문에서 고려한 점프 확산은 양의 방향으로만 나타나기 때문에, 해당 결과가 산출되었음을 알 수 있다. 양의 변동이 큰 상태에서는 수급조정자원의 용량이 단계 2에서 보다 크게 증가하였다.

표 6.26 단계 4 에서의 예비력 용량 결정(점프확산)

종류 / (stage, state)	2차용량	3차용량	DLC용량
(4, 1)	400	1300	200
(4, 2)	300	1200	200
(4, 3)	300	900	200
(4, 4)	300	800	200
(4, 5)	400	500	200
(4, 6)	300	700	100
(4, 7)	300	500	100
(4, 8)	300	500	0
(4, 9)	300	400	200
(4, 10)	200	500	100
(4, 11)	100	500	100
(4, 12)	300	500	100
(4, 13)	300	500	100
(4, 14)	100	600	100
(4, 15)	200	600	300
(4, 16)	100	600	300
(4, 17)	100	400	300
(4, 18)	100	500	400
(4, 19)	100	500	300

단계 4에서는 단계 3에서와 같이 음의변동부분에 대한 대응하기 위한 예비력 필요용량이 감소하였음을 알 수 있다. 그리고 유사하게 양의 변동이 큰 위치에서의 수급조정자원의 필요용량이 증가하였음을 확인할 수 있다. 구체적으로 상태 1의 경우를 보면, 단계 3 에서 전체 예비력 필요용량 1500MW에서 1900MW로 증가하였다. 수급불균형의 변동성이 양의 변동으로 증가하였기 때문에 더 많은 예비력 용량이 필요하다는 것을 의미한다. 반면 3단계에서 가장 낮은 상태 14와 4단계의 상태 19를 비교하면 오히려 필요용량이 100MW 낮아졌다. 이는 음의 변동성 감소로 전체 필요용량의 크기가 감소하였다는 것을 의미한다.

6.3 용량결정 문제에서의 수급불균형 모델 선택

앞 절 6.2에서의 사례연구는 수급불균형의 크기에 따라 각 수급조정자원의 최적용량이 변화하는 결과를 보여준다. 따라서 SO가 실시간 수급불균형 모형을 적합하게 선택하는 것은 매우 중요하다. 본 사례연구에서는 수급불균형모델을 SO가 선택하는 것에 따라 최적 운영비용이 어떻게 달라지는지를 확인함으로써, 수급불균형 모델을 적절하게 선택하는 것이 중요하다는 것을 보이고자 한다.

6.3.1 임의보행 모형의 검증

수급불균형 모델이 실제 임의보행 모형이지만, SO는 해당 수급불균형 모델을 1)임의보행, 2)평균회귀, 3)점프확산 모형으로 예측할 수 있다. 각 상황을 가정하여 용량결정을 하였을 때 발생하는 평균비용은 다음과 같다.

표 6.27 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(임의보행)

stage	1	2	3	4
평균비용	1480.152	1619.62	1387.252	1455.654

표 6.28 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(임의보행)

stage	1	2	3	4
평균비용	1981.234	2213.62	1525.224	1555.623

표 6.29 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(임의보행)

stage	1	2	3	4
평균비용	1714.132	1829.632	1762.252	1455.322

실제 수급불균형모형이 임의보행일 때, 수급불균형 모형을 임의보행으로 가정하여 용량결정을 내린 결과(표 6.27)가 전 단계에 걸쳐 가장 낮은 평균비용을 산출한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 각 단계가 진행됨에 따라 평균비용의 차이가 점점 커지는 결과를 보이는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 점프확산을 가정하였을 때가 평균회귀를 가정하였을 때보다 더 큰 비용차이를 보인다. 평균회귀를 가정한 경우는 예비력 용량을 작게 설정하여 각 수급조정자원의 사용량에 대한 에너지 비용으로 인해 해당 비용이 증가하는 것이며, 반대로 점프확산을 가정하여 용량 결정을 했을 때는 과다 용량보유로 용량 비용의 증가로 전체 예비력 운영비용이 올바른 예측을 했을 때보다 커진다는 것을 확인할 수 있다.

6.3.2 평균회귀 모형의 검증

실제 수급불균형 모형이 평균회귀 모형일 때, SO가 3가지의 수급불균형 모형을 가정하였을 때 발생한 평균 비용을 비교한 값은 다음과 같다.

표 6.30 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(평균회귀)

stage	1	2	3	4
평균비용	1480.152	1319.62	1582.122	1355.234

표 6.31 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(평균회귀)

stage	1	2	3	4
평균비용	1100.332	1392.32	1382.252	1255.654

표 6.32 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(평균회귀)

stage	1	2	3	4
평균비용	1590.152	1619.26	1982.234	1645.324

실제 수급불균형 모형과 같은 평균회귀를 가정하였을 때, 비용이 가장 낮게 나오며 점프확산과 평균회귀를 가정하였을 때 비용은 단계가 진행됨에 따라 더 커진다. 또한 점프확산을 가정했을 때가 임의보행을 가정했을 때보다 평균회귀에서의 비용과의 차이가 가장 크다. 이유는 점프확산의

경우 0에서 멀어지는 확률이 커지는 경향이 있기 때문에, 평균회귀에서보다 과다의 용량을 확보하기 때문에 경제적으로 비효율적인 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 임의보행을 가정하였을 때도 과다용량 보유를 의미하는 결과가 나오지만 상대적으로 점프확산보다는 비용이 낮게 나왔다.

6.3.3 점프확산 모형의 검증

실제 수급불균형 모형이 점프확산 모형일 때, 앞 선 사례와 마찬가지로 3가지의 수급모형을 가정하여 예비력 평균비용을 비교해보았다.

표 6.33 임의보행을 가정하였을 때 평균비용(점프확산)

stage	1	2	3	4
평균비용	1280.152	1632.62	1329.252	1445.54

표 6.34 평균회귀를 가정하였을 때 평균비용(점프확산)

stage	1	2	3	4
평균비용	1780.152	1619.62	1582.252	1955.542

표 6.35 점프확산을 가정하였을 때 평균비용(점프확산)

stage	1	2	3	4
평균비용	1110.242	1591.422	1422.252	1445.532

앞선 사례와 유산한 결과를 확인할 수 있다. 실제 수급불균형 모형과 같은 점프확산을 가정하였을 때, 가장 낮은 평균비용이 산출되는 것을 결과로써 확인할 수 있다. 반면, 평균회귀일 때 가장 높은 비용이 나오며 단계가 진행될수록 그 비용의 차이가 증가한다. 평균회귀일 때 전체 수급조정자원의 용량이 적게 설정되었기 때문에 에너지 사용량에 대한 평균비용이 증가로 경제적으로 비효율적인 결과가 산출되었기 때문이다.

해당 사례연구를 통해 SO가 가변예비력 방법을 통해 여러 단계에서 각각의 예비력 용량을 다르게 구할 때, 수급불균형 모델 혹은 수요모델을 정확하게 예측할 필요가 있다는 사실을 확인할 수 있다.

6.4 예비력 간 상호관계에 따른 3차 예비력으로써 ESS의 가치

6.4.1 사례연구 개요

전력저장장치(ESS, energy storage system)는 많은 예비력 자원과 다르게 빠른 응답 특성을 지니고 있다. 3차 예비력의 성능 기준은 10 분에서 15 분 이내에 원하는 출력을 내는 것이다. 그러나 전력저장장치는 10 초에서 수 분 이내로 원하는 응답을 할 수 있다. 따라서 이러한 빠른 응답 특성이 예비력의 용량에 영향에 주는 측면이 3차 예비력으로서의 에너지 저장장치의 가치로 고려하였다. 본 절에서는 4장에서 고려한 예비력 간의 경제적, 기능적 상호관계를 고려하였을 때 ESS가 가질 수 있는 가치를 사례연구로서 제시한다. 아래 그림 6.5는 3차 예비력 자원은 긴 시간의 응답 특성, 즉 활성화 시간(activation time)이 필요하다는 것을 설명해준다[65].

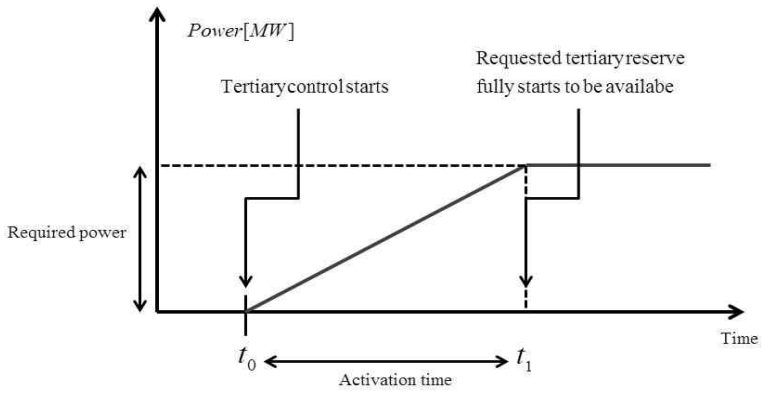

그림 6.5 3차 제어의 활성화 시간

3차 제어의 활성화 시간의 길이는 2차 예비력 용량과 직접적인 관계를 가지고 있다. 만약 수급의 불균형이 선형적으로 증가하고 있다고 가정하였을 때, 2차 예비력의 포화 순간에 맞추어 3차 예비력은 실행되기 시작한다.

3차 예비력의 활성화 시간은 2차 예비력 용량에 다음과 같이 직접적으로 영향을 준다.

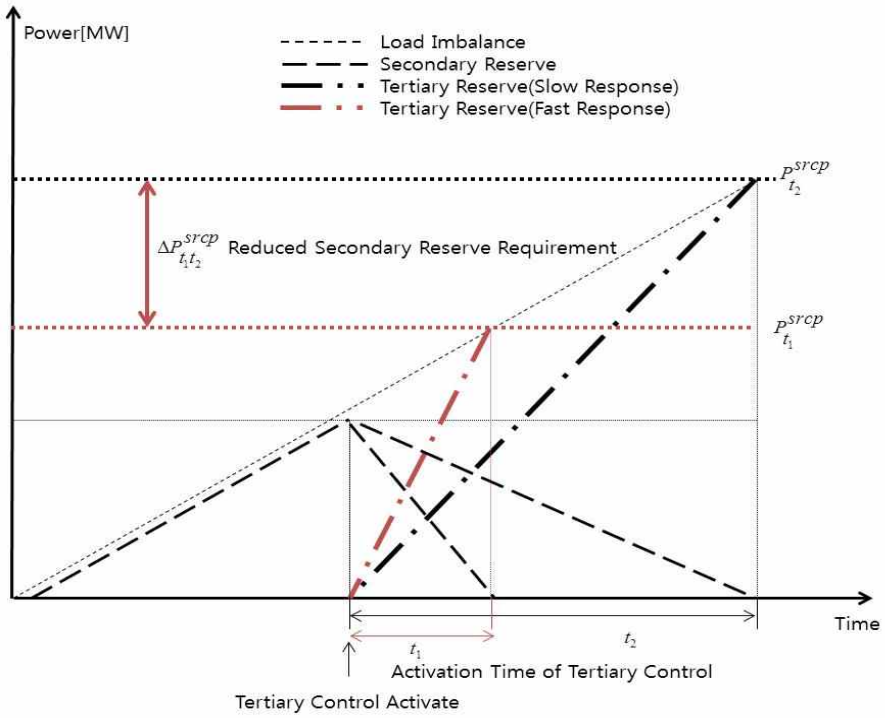

그림 6.6 3차 제어의 활성화 시간과 2차 제어의 용량의 관계

위 그림 6.6 에서 확인할 수 있듯 3차 예비력의 활성화 시간 t_1이 t_2보다 작을 때 빠른 응답을 할 수 있기 때문에, 2차 예비력 용량은 t_2에서 높은 필요용량 P_{t2}^{srcp}을 가지며, 빠른 t_1에 대해서는 작은 필요용량 P_{t1}^{srcp}을

가지게 된다. 이 때 원래의 기준보다 줄어든 가치만큼이 3차 예비력으로서 에너지저장장치가 가질 수 있는 가치가 된다.

경쟁시장 환경에서 2차 예비력이 용량 가격에 대해서만 보상받는다고 가정한다면, 시장가격과 용량을 고려해 에너지저장장치의 가치를 측정할 수 있다.

만약, 3차 예비력에 대한 입찰이 다음 그림5.5와 같다고 할 때, $\lambda_{t_2}^{src}$는 P_{t2}^{srcp}의 용량가격[$/MW]을 의미하며, $\lambda_{t_1}^{src}$는 P_{t1}^{srcp}의 용량가격이 된다. 현재 3차 예비력 기준으로서 t_2를 15 분이라고 가정한다면 빠른 응답특성에 대한 3차 예비력으로서의 가치는 다음과 같다.

$$V_t = \lambda_{15}^{src} P_{15}^{src} - \lambda_t^{src} P_t^{src} \tag{6.7}$$

6.4.2 사례연구와 결과해석

우선 2차 예비력의 필요용량이 3000[MW]이며, 수급불균형의 분당 증가속도가 100[MW/min]이라고 가정하였다. 그리고 첫 번째 입찰함수는 다음과 같이 정하였다.

표 6.36 2차 예비력 용량 입찰 예시

Power (P^{src} [MW])	Price (λ^{src} [$/MW])
$0 \le P^{src} < 500$	300
$500 \le P^{src} < 900$	350
$900 \le P^{src} < 1500$	400
$1500 \le P^{src} < 2000$	450
$2000 \le P^{src} < 2500$	530
$2500 \le P^{src} < 4000$	570

이 때 3차 예비력 자원으로 전력저장장치의 가치는 다음과 같다.

표 6.37 활성화 시간에 전력저장장치의 가치-1
(부하증가속도 100MW/min)

Activation Time [minutes]	Secondary Reserve Requirement [MW]	Value of ESS(V_{ess}) [$/MW]
3	1,800	900,000
5	2,000	650,000
7	2,200	544,000
10	2,500	285,000

활성화 시간이 빠를수록 더 적은 2차 예비력 용량이 필요하기 때문에 전력저장장치의 가치가 커지는 것을 확인할 수 있다. 만약, 부하의 증가속도가 더 빠른 상황(부하증가 속도= 150MW/min)이라면, 아래 표 A.3과 같이 더 높은 가치를 가진다.

표 6.38 활성화 시간에 전력저장장치의 가치-2
(부하증가속도 150MW/min)

Activation Time [minutes]	Secondary Reserve Requirement [MW]	Value of ESS(V_{ess}) [$/MW]
3	1,200	1,2300,000
5	1,500	1,035,000
7	1,800	900,000
10	2,250	517,500

실시간 운전 상황에서 에너지 저장장치의 3차 예비력으로서의 가치는 부하의 증가속도, 응답속도, 입찰 가격에 따라 결정된다는 사실을 확인할 수 있다. 본 논문에서 보고자 하는 주요한 관계는 2차 예비력과 3차 예비력이 직접적인 관계가 있기 때문에, 3차 예비력의 응답특성의 변화는 2차 예비력의 용량의 변화를 가져올 수 있다. 본 절에서는 부하의 선형적 증가를 가정했다는 한계가 있지만, 빠른 응답특성을 가진 자원에게 더 많은 보상을 해줄 수 있는 인센티브를 측정하는 방법을 제안하였다.

제 7 장 결 론

본 논문에서는 예비력 용량결정 시 예비력 간 경제적, 기능적 상호관계를 적용하여, 주파수제어예비력 용량결정 문제를 기존의 단일단계의 문제에서 다중단계의 문제로 제안하였다.

현재 주파수제어예비력 용량 결정은 과거 운영실적에 따라 결정론적 방법을 통해 이루어지고 있다. 또한 선행 연구들은 결정론적 방법의 한계를 극복하기 위해 계통의 확률적 특징을 수급불균형 크기의 확률분포에 포함시키고, 적정 용량의 기준을 판단하기 위해 신뢰도 지표를 도입하여 예비력 필요용량 결정방법을 제안해왔다. 대다수 선행연구에서는 예비력 필요용량을 예비력 비용과 부하차단 비용의 합으로 정의되는 사회비용의 최소화 기준으로 결정한다. 그러나 이러한 접근 방법은 전력계통의 불확실성은 문제에 반영하였으나, 전체 예비력용량 또는 사고/비사고 기준에 따른 예비력 용량만을 제시한다는 한계가 있다.

사고/비사고에 따른 주파수제어예비력 분류 기준은 불확실성의 증가를 반영하지 못하며, 이에 따른 기존의 연구들은 예비력간의 상호관계를 예비력 용량결정문제에 고려하지 못하였다는 한계를 가진다.

본 논문에서는 주파수 제어체계에 따라 정의된 예비력(2차, 3차)과 DLC, 부하차단 간의 상호관계를 고려하여 실시간 수급균형을 유지하는 것을 수학적으로 정식화하여, 주파수제어예비력 필요용량 결정문제에 반

영하였다. 또한 본 논문에서는 실시간 상황을 반영하여 예비력 필요용량을 결정하는 방법을 수학적으로 정식화시켰으며, 이는 예비력 필요용량 문제를 다중단계의 문제로 새롭게 제안하였다는 것을 의미한다.

사례연구에서는 본 논문에서 제시한 가변 예비력 용량 결정 방법의 적절성을 평가하기 위해, 수급불균형의 크기를 3가지 확률과정(임의보행, 평균회귀, 점프확산)으로 모델링하여 각 수급불균형 모델에 따른 최적 용량결정 결과를 분석하였다. 또한 예측한 수급불균형 모델과 실제 수급불균형 모델의 중요성을 검증하기 위해, 수급불균형 모델을 제시한 3가지로 가정하여 적합한 수급불균형 모델에서 최적의 결과가 도출됨을 보였다. 마지막 사례연구에서는 논문에서 제안한 예비력 간 상호관계를 고려하여, 빠른 응답 특징을 가지는 전력저장장치가 3차 예비력으로서 높은 가치를 가지는 것을 보였다.

요컨대, 본 논문에서는 단일단계의 예비력 용량결정 문제를 새롭게 다중단계의 예비력 용량결정 문제로 제시하였다. 이를 위해, 예비력의 주파수 제어체계에 따른 기능적, 경제적 상호관계를 파악하고 수학적으로 모델링하였다. 그리고 예비력 필요용량을 결정하는 문제를 예비력 간 상호관계를 고려해서 최적 용량을 구하였다. 또한 변화하는 전력시장 환경에 적절하게 대응하는 가변적 용량결정 방법을 동적계획법을 통해 다중단계의 문제로 모델링하였다.

본 연구를 통해 경쟁시장 환경 하에서 주파수제어예비력 필요용량을

다중단계로 각 상황에 따라 다르게 결정하는 방법을 제시함으로써, 전력계통의 운영의 효율성과 안정성을 높일 수 있을 것으로 생각한다. 본 연구에서 고려하지 못한 예비력의 시간지연을 포함시켜, 예비력의 상호관계를 반영하여 용량을 결정하는 연구가 진행되어야 할 것이며, 더 나아가 실제 각 예비력의 실행 시점을 결정하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] P. Joskow, “Lessons learned from electricity market liberalization,” *The Energy Journal*, vol. 29, no.2, pp. 9-42, 2008.

[2] F. A. Wolak, *Market design and price behavior in restructured electricity markets: An international comparison*, Springer, 2000.

[3] F. P. Sioshansi, “Electricity Market Reform: What have we learned? What have we gained?,” *The Electricity Journal,* vol. 19, no. 9, pp. 70-83, 2006.

[4] F. P. Sioshansi, “Competitive electricity markets: questions remain about design, implementation, performance,” *The Electricity Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 74-87, 2008.

[5] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z.Y. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002.

[6] K. W. Cheung, “Ancillary Service Market design and implementation in North America: From theory to practice,” *DRPT2008*, Nanjing China, 6-9 April 2008.

[7] 한국전력거래소, 전력시장의 효율적 향상을 위한 계통운영보조서비스 개선방안에 관한 연구, 2007.

[8] Y. G. Rebours, “A Comprehensive Assessment of Markets for

Frequency and Voltage Control Ancillary services," PhD. dissertation, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, U.K., 2008.

[9] 김성수, 경쟁적인 전력사업 환경하에서의 예비력 운용에 관한 연구, 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 학위 논문,1999.

[10] F. D. Galiana, F. Bouffard, J. M. Arroyo, and J. F. Restrepo, "Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1970-1983, Nov. 2005.

[11] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon and S. Rossignol, "Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services - Part I: Technical Features," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 350-357, 2007.

[12] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services - Part II: Economic Features," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 358-366, Feb. 2007.

[13] Y. G. Rebours and D. S. Kirschen, A Survey of Definitions and Specifications of Reserve Services, University of Manchester Press, Manchester, 2005.

[14] M. J. Nokandi and H. Monsef, "Scheduling of Spinning Reserve Considering Customer Choice on Reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1780-1789, Nov 2009.

[15] J. Aghaei, H. Shayanfar, and N. Amjady, "Multi-objective market clearing of joint energy and reserves auctions ensuring power system security", *Journal of Energy Conversion and Management*, vol. 50, no.4, pp. 899-906, 2009.

[16] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Optimizing the spinning reserve requirements using a cost/benefit analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 24-33, Feb. 2007.

[17] K. Afshar, M. Ehsan, M. Fotuhi-Firuzabad, and N. Amjady, "Cost-benefit analysis and MILP for optimal reserve capacity determination in power system," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 196, pp. 752-761, 2008.

[18] A. Ahmadi-Khatir, and R. Cherkaoui, "A probabilistic spinning reserve market model considering disco's different value of lost loads," *Electr. Power Syst. Res.,* vol. 81, 862-872, 2011.

[19] A. Ahmadi-Khatir, M. Fotuhi-Firuzabad, L. Goel, "Customer Choice of Reliability in Spinning Reserve Procurement and Cost Allocation Using Well-being Analysis," *Electr. Power Systs. Res.*,

vol. 73, no. 10, pp. 1431-1440, May 2009.

[20] A.M. Leite Da Silva and G. P. Alvarez, "Operating reserve capacity requirements and pricing in deregulated markets using probabilistic techniques," *IET Gen., Transm., Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 439-446, May 2007.

[21] M. Najafi, M. Ehsan, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Akhavein, and K. Afshar, "Optimal reserve capacity allocation with consideration of customer reliability requirements," *Energy*, vol. 35. no.9, pp. 3883-3890, 2010.

[22] J. Frunt, W. L. Kling, and P. P. J. van den Bosch, "Classification and quantification of reserve requirements for balancing," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, pp. 1528-1534, 2010.

[23] A. A. Khatir, R. Cherkaoui and M. Zima, "Literature Survey on Fundamental Issues of Frequency Control Reserve(FCR) Provision," *ETH Zurich - Power System Laboratory*, Nov 2010.

[24] M. Scherer, M. Zima, and G. Andersson, "An integrated pan-European ancillary services market for frequency control," *Energy Policy*, vol. 62, pp.292-300, 2010.

[25] K. Kirk, M. Valdma, "Determination of Optimal Operating Reserves in Power Systems," *Oil Shale*, vol. 26, no. 3 pp. 220-227,

2009.

[26] K. Afshar, M. Ehsan, M. Fotuhi-Firuzabad, and N. Amjady, "A method for reserve clearing in disaggregated model considering lost opportunity cost," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 527-538, 2008.

[27] M. Q. Wang, and H. B. Gooi, "Optimizing Probabilistic Reserve in Large Power Systems," *IEEE Trans. & Distr. Conference & Exposition: Asia and Pacific,* 2009.

[28] C. C. Wu and N. Chen, "Online methodology to determine reasonable spinning reserve requirement for isolated power systems," *IEEE Proc. on Gener., Trans. and Distr.*, vol. 150, pp. 455-461, July 4 2003.

[29] M. E. Khan and R. Billinton, "Composite system spinning reserve assessment in interconnected systems," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 142, no. 3, pp. 305-309, May 1995.

[30] N. Chowdhury, "Probabilistic assessment of spinning reserve in isolated and interconnected generation systems," *Reliability Engineering & System Safety* vol. 46, no. 1, pp. 83-91, 1994.

[31] J. Chen, T. D. Mount, J. S. Thorp, and R. J. Thomas, "Location-based scheduling and pricing for energy and reserves: a

responsive reserve market proposal," *Decis. Support Syst.*, vol. 40, no. 3-4, pp. 563 - 577, 2005.

[32] F. Bouffard and F. D. Galiana, "An electricity market with a probabilistic spinning reserve criterion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 300-307, Feb. 2004.

[33] L. T. Anstine, R. E. Burke, J. E. Casey, R. Holgate, R. S. John, and H. G. Stewart, "Application of probability methods to the determination of spinning reserve requirements for the Pennsylvania-New Jersey-Mary-land interconnection," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-82, no. 68, pp. 720-735, Oct. 1963.

[34] R. Doherty and M. O'Malley, "A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 587 - 595, May 2005.

[35] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," *IEEE Trans. Power Syst,* vol. 28, no. 1, pp. 52-63, Feb. 2013.

[36] C. Breuer, C. Engelhardt, A. Moser, "Expectation-based Reserve Capacity Dimensioning in Power Systems with an Increasing

Intermittent Feed-in," *10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2013.

[37] K. Afshar and M. M. Barati, "A new approach for determination and cost allocation of reserve in the restructured power systems," *Electr. Power Syst. Res.,* vol. 100, pp. 25-33, 2013.

[38] E. Ela, M. Milligan, and B. Kirby, Operating Reserves and Variable Generation Technical Report, NREL/TP-5500-51928, Aug. 2011.

[39] A. Asrari, A. Kargarian, M. H. Javidi, M. Monfared and S. Lotfifard, "A Stochastic Hybrid Method to Forecast Operating Reserve: Comparison of Fuzzy and Classical Set Theory," *Electric Power Components and Systems,* vol. 41, no. 8, pp. 806-823, 2013.

[40] G. Liu, K. Tomsovic, "Quantifying Spinning Reserve in Systems With Significant Wind Power Penetration," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 27, no. 4, pp. 2385 - 2393, 2012.

[41] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems Second Edition,* New York: Plenum Press, 1996.

[42] H. B. Gooi, D. P. Mendes, K. R. W. Bell, and D. S. Kirschen, "Optimal scheduling of spinning reserve," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1485-1490, 1999.

[43] D. Chattopadhyay and R. Baldick, “Unit commitment with probabilistic reserve,” *in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, NewYork, vol. 1, pp. 280 - 285, 2002.

[44] UCTE OpHB-Team, *UCTE Operation Handbook Policy 1: Load-Frequency Control and Performance*, UCTE, Jul. 2004.

[45] E. Hirst and B. Kirby, *Electric Power Ancillary Services.* Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1996.

[46] 전력거래소, 계통규모 확대에 따른 적정 공급 및 운영예비력 산정에 대한 연구, 2011.

[47] 전력거래소, 전력시장운영규칙, 2013.

[48] 류성호, 이강완, 김광원, 황갑주, “전력시장에서의 적정 운영예비력 기준에 관한 연구,” 전기학회논문지, 제 52A권, 제5호, pp.287-293 2003.

[49] Thermal Working Group, *Ancillary services: unbundling electricity products - an emerging market*, 2003-150-0007, Eurelectric, 2004.

[50] Eurelectric, *Connection Rules for Generation and Management of Ancillary Services*, 2000-130-0003, Eurelectric, May 2000.

[51] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics and Stability,* New York:Wiley, 1997.

[52] A. Baggini, *Handbook of Power Quality.* West Sussex, U.K.:

Wiley, 2008.

[53] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 4th ed. Toronto, ON, Canada: Thomson, 2008.

[54] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, The EPRI Power System Engineering Series, vol. 2, pp. 581-626, 1993.

[55] 전력거래소, 해외전력산업 동향, 지식경제부, 2011.

[56] J. F. Ellison, L. S. Tesfatsion, V. W. Loose, and R. H. Byrne, "Project Report: A Survey of Operating Reserve Markets in U.S. ISO/RTO-Managed Electric Energy Regions," *Sandia Report SAND2012-1000*, Sandia National Laboratories, September 2012.

[57] E. L. Miguelez, I. E. Cortes, L. R. Rodriguez, and G. L. Camino, "An overview of ancillary services in Spain," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 3, pp. 515-523, Mar. 2008.

[58] C. Weber, "Adequate intraday market design to enable the integration of wind energy into the European power systems," Energy Policy, vol. 38, no. 7, pp. 3155-3163, Jul. 2010.

[59] MISO, Energy and Operating Reserve Markets, 2012

[60] E. Allen and M. Ilic, *Price-Based Commitment Decisions in the Electricity Market.* Springer, New York, 1999.

[61] W. L. Winston, *Operations Research, Applications and Algorithms*, 4 ed., Duxbury Press, 2003.

[62] J. Y. Joo, S. H. Ahn, Y. T. Yoon, "Enhancing price-responsiveness of end-use customers' loads: dynamically administered critical peak pricing," *Euro. Trans. Electr. Power*, vol. 19, no. 1, pp. 113-126, 2009.

[63] A. K. Dixit and R. S. Pindyck, *Investment Under Uncertainty.* Princeton NJ: Princeton Univ. Press, 1994.

[64] Consectec, *Benefits and practical steps towards the integration of intraday electricity markets and balancing mechanisms*, Frontier Economics Ltd, London, 2005.

[65] F. Abbaspourtorbati, M. Scherer, A. Ulbig, and G. Andersson, "Towards an optimal activation pattern of tertiary control reserves in the power system of Switzerland," *in American Control Conference*, Montreal, Canada, 2012.

Abstract

In the electric power network, it is essential to maintain a certain amount of generation capacity as frequency control reserve capacity to ensure that the power system is able to stop frequency excursion, avoid power shortage due to an unforeseen increase in load, generator random outages, and load fluctuation. Conventionally, frequency control reserve are implemented by directly handling centralized, vertically integrated utilities and is declared as non-profitable mandatory service. However, after the advent of electric power industry restructuring, frequency control services are treated as market commodities in the category of ancillary service. These services include primary, secondary, and tertiary control reserve from point of view their time deployment as well as corresponding control scheme. In practice, in order to quantify the needs of the frequency control reserve, especially the spinning reserve, deterministic approaches have been used without ensuring consistent reliability. Many previous researches have proposed probabilistic methods to evaluate in a more consistent way the amount of reserve capacity required in a power system. However, one of important aspects neglected in previous researches and practices for the determination methods of reserve capacity is interrelation among frequency control reserves. This dissertation presents a

methodology to determine the frequency control reserve capacity requirements based on functional and economical mutuality among various reserves, direct load control(DLC), and load shedding. The main objective of the proposed methodology are : to fomulate a multi stage problem to determine adaptive capacities of balancing resources using a dynamic programming; to determine the capacities for the different sub-market of balancing resources(e.g. secondary control reserve, tertiary control reserve and DLC).

The result of case study shows that reserve capacity decision strategy can be built by the proposed model. The case study demonstrate adaptive reserve capacity decision based on power imbalance and reserve prices can be more effective. Moreover, the last case study is presented to show that ESS can have more value as tertiary control reserve, which activation time is shorter and more flexible than traditional resources.

In short, this dissertation presents a novel approach to determining reserve capacity requirement in a competitive market.

Keywords: frequency control reserve, capacity requirement, competitive market, multi-stage, dynamic programming

Student number : 2006-21158

감사의 글

지금 논문을 마무리하는 이 글을 쓰는 순간에도 학위를 마쳤다는 기쁨보다는 아쉬움과 부끄러움이 가득합니다. 보잘것없는 학위논문으로 박사학위를 받게 된 창피함을 무릅쓰고 이 자리를 빌려 많은 도움을 주신 분들께 진심으로 감사를 드립니다.

먼저 긴 시간동안 인내와 지혜로 지도해주신 윤용태 교수님께 감사를 드립니다. 바쁘신 가운데서도 각별한 관심을 가지고 논문을 심사하여 주신 박종근 교수님, 문승일 교수님, 이병준 교수님과 먼 곳에서 오셔서 세심한 지도와 논문심사를 해주신 김건중 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

연구실에 오랜 시간동안 머물며, 함께 동고동락하며 고생한 전력시스템 및 경제 연구실 선후배님들께 감사의 말씀을 드립니다. 연구실 1호 박사로 후배들을 이끌어주시는 박근표 박사님, 나이가 같아 선배이지만 친구 같은 이호철 박사, 함께 수많은 밤을 지새우며 즐거운 만담을 나눴던 최태섭 박사님, 연구와 공부의 정도를 보여주신 진영규 박사님, 입학동기지만 항상 배울 게 많은 평익이형, 미국에서 꿈을 펼치고 계신 주지영 박사님, 동현이 형, 밍뉴엔 박사에게 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 또한 논문을 만드는데 가장 큰 도움을 준 준형이에게 진심으로

고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 어려운 주제로 고생하고 있는 성찬이, 열심히 노력하는 영식이, 후배여서 다행인 형태, 회사생활과 학교생활을 병행하며 고생하는 민철이, 옆자리에서 재미있던 시영이, 멋지고 성실한 형익이, 스마트하고 야심찬 승완이, 차분하고 성실한 혜지, 그리고 1년차 후배 용현이, 혜윤이에게 앞으로의 연구에 응원의 마음을 보냅니다.

그리고 중학교 때부터 저와 인생의 오랜 친구로 언제나 함께해온 동기, 세훈, 효엽이와 20대를 함께 보낸 성제형, 진우, 박사학위를 먼저 취득한 주형, 잘생긴 용우, 같은 분야에서 일하고 있는 상민에게도 고마움을 전합니다.

중국에서 고생하고 있는 큰형, 동생을 위해 신경써준 작은형, 그리고 항상 저를 믿어주시고 응원해주신 사랑하는 아버지, 어머니의 은혜에 깊은 감사를 드립니다. 부족하지만 사위로 따뜻하게 맞아주신 장모님, 장인어른께 감사드리며, 무엇보다도 힘들고 어려웠던 학위과정동안 고생했던 사랑하는 아내 미정이에게 진심어린 감사를 전하며 글을 마칩니다.