

# 속응자원의 국내 및 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력 서비스 제공에 따른 보상규칙 비교 분석

## Comparison of Compensation Rules for Fast Responding Resources Providing Frequency Regulation Service in Domestic and North American ISO/RTO Power Electricity Market

박대현\* · 박용기\*\* · 박종배\* · 김발호\*\*\* · 노재형†

(Dae-Hyun Park · Yong-Gi Park · Jong-Bae Park · Balho H. Kim · Jae-Hyung Roh)

**Abstract** -Since FERC order 755 was published, each frequency regulation market rules of the North American ISO/RTO have been revised in many parts. In 2016, the domestic CBP market has also changed its market rules to allow ESS to participate in the frequency regulation reserve services(Governor Free and Automatic Generation Control). This paper compares and analyzes the changed North American ISP/RTO market and domestic CBP market rules. In particular, we compare PJM and CAISO frequency regulation market pricing mechanism and settlement rules with the settlement rules of the domestic CBP market and compare the factors of each market used to compensate the participating resources in terms of resource dependency and accuracy.

**Key Words** : FERC(Federal Energy Regulatory Commission) order 755, ESS(Energy Storage System), GF(Governor Free), AGC (Automatic Generation Control)

### 1. 서론

2016년 4월 국내 CBP(Cost Base Pool) 시장은 전기저장장치의 전력시장 참여를 위해 시장운영규칙을 개정하였다. 해당 운영규칙의 개정취지는 전력시장에서 전기저장장치를 허용하는 근거규정을 마련하기 위해서이다. 규정안의 핵심은 전기저장장치의 변동비 산정 및 총·방전 전력량에 대한 정산 등을 담고 있다. 개정된 시장운영규칙을 기반으로 '17년부터 전기저장장치는 주파수조정예비력 서비스(GF)에 참여하고 정산을 받고 있다. 현재 국내 CBP 시장의 경우, 전기저장장치와 같은 비전통 자원의 주파수조정예비력 참여에 따른 보상에 있어 예비력 급전신호에 따른 응답 정확성, 속응성, 일치성 등을 고려하여 보상이 이루어진다 [1]. 하지만 예비력 급전신호에 따라 변동하는 출력 변동분(mileage)은 예비력 서비스 제공에 따른 보상에서 제외되어 있다. 이와는 다르게 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력시장(Frequency Regulation Market)은 FERC(Federal Energy Regulatory Commission) Order 755가 수립된 이후 많은 변화가 이루어졌다. FERC Order 755가 개정되기 전, 시스템 운영자는 오직 주파수

조정예비력 제공 자원에게 예비력 공급용량(Regulation capacity)에 관한 보상만을 제공했었다. 이에 발전기 출력 설정값(Set-point)을 변동시켜 보다 많이 예비력 제공에 공헌을 한 자원은 그에 따른 보상을 받지 못하였다. 이러한 예비력 공급성과(performance 또는 mileage)에 대한 보상을 위해 FERC Order 755는 자원의 응답정확성 및 속응성을 고려하여 자원의 예비력 공급성과를 반영하도록 개정하였다[2]. 개정 이후 FERC Order 755의 규정을 따르지만 각기 다른 시장규칙으로 운영 중인 북미 ISO/RTO의 주파수조정예비력 시장정책에 관한 시장별 비교연구 [3]-[6]가 진행되었다. 또한 FERC Order 755를 따르는 주파수조정예비력시장에서 전기자동차 최적화 운영 설계[7] 및 전기자동차의 시장 참여에 따른 공급성과 기반 정산 관련 연구[8], 전기저장장치의 잠재적인 수익 추정[9] 및 적정 크기 분석[10] 그리고 상업용 빌딩이 FERC Order 755를 따르는 시장(PJM)에 참여할 경우에 대한 운영 계획 분석[11], [12] 등의 연구가 이루어졌다. 이외에도 PJM의 주파수조정예비력 시장에서 속응자원(Fast Responding Resource)에 대한 보상 관련 연구[13], MISO 시장에 FERC Order 755 개념을 적용시키는 방안에 관한 연구[14], CAISO 주파수조정예비력시장의 예비력 공급용량 및 공급성과에 관한 입찰 전략[15] 및 FERC Order 755를 준수하며 에너지 및 예비력 동시최적화시장에서 시장 참여자의 보상관련 수식화 연구 [16] 등 다양한 측면에서 개정 이후의 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력시장에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문은 FERC order 755를 준수하는 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력 시장 구조(가격결정메커니즘 또는 보상방안)를 알아보고 이 중 PJM과

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea.

E-mail: jhroh@konkuk.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea.

\*\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Youngsan University, Korea.

\*\*\*Dept of Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

Received : March 16, 2018; Accepted : April 1, 2018

CAISO 주파수조정예비력 시장 가격결정메커니즘(또는 보상규칙)을 비교분석한다. 또한 국내 CBP 시장의 주파수조정예비력 서비스(GF 및 AGC)에 참여하는 비전통자원에 관한 보상규칙과 PJM 및 CAISO 주파수조정예비력 시장에 참여하는 비전통 자원에 관한 보상규칙을 자원의 응답 정확성 및 속응성 등과 같은 지표를 사용하여 비교분석 한다.

**2. 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력시장 가격결정메커니즘**

본 장에서는 FERC Order 755를 따르는 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력시장의 구조를 알아보고, 북미 ISO/RTO 중 PJM와 CAISO의 주파수조정예비력시장에 속응자원이 참여했을 시 이루어지는 보상규칙에 대하여 알아본다.

**2.1 FERC Order 755에 따른 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력 시장**

2011년 11월 20일 발표된 FERC Order 755는 “Pay-for-Performance”라는 부제로 속응자원의 예비력 급전 신호에 따른 응답속도 및 정확성을 반영하여 추가적인 보상을 제공하도록 하는 개정안이다. 이에 시장에 참여하는 자원은 주파수조정예비력 공급용량뿐만 아니라 공급성과에 대하여 보상을 받게 되었다. 이 중 예비력 공급용량 관련 보상은 주파수조정예비력을 제공하는 용량(MW)과 예비력 시장에 참여함으로써 발생하는 기회비용(Lost Opportunity Cost)을 포함하여 이루어진다. 공급성과에 관한 보상은 자원의 응답 정확성 및 자원이 실제 예비력을 제공하면서 발생하는 출력 설정값(Set-point)의 변화량을 고려하여 이루어진다. 여기에서 설정값 변화량은 마일리지(Regulation mileage)라 칭하며 예비력 급전 신호 구간 간의 예비력 급전 설

정값 변화량으로  $\Delta MW/MW$ 의 단위를 가진다[3]. 다음의 수식은 마일리지에 관한 수식이다.

$$M = \sum_{i=1}^n |P_i - P_{i-1}| / P_{max} \tag{1}$$

수식 (1)에서  $P_i$ 는  $i$ 번째 예비력 급전신호 구간에서 예비력시장 참여 자원의 출력량이다.

FERC Order 755의 주요 요소로 예비력 공급용량 및 공급성과에 대한 입찰(Two part bidding)을 둘 수 있다. 이에 주파수조정예비력 시장에 참여하는 자원은 예비력 공급용량에 대한 입찰가[\$/MW], 공급용량(MW) 및 공급성과에 대한 입찰가[\$/MW 또는 \$/mile)를 제출해야 한다. 이중 공급용량 입찰가는 1MW의 주파수조정예비력을 제공하는데 필요한 가격을 나타내며, 공급성과 입찰가는 1MW를 변동하는데 필요한 비용이다. 또한 높은 수준의 공급성과를 유도하기 위해 급전신호를 받은 자원 중 가장

**표 1** Pay-for-performance 시장 용어[3]

**Table 1** Pay-for-performance market terms

	가격		마일리지 (Regulation mileage)	성과지수 (Performance Factor)
	공급용량 (Capacity)	공급성과 (Mileage)		
PJM	Capability price	Performance price	mileage	performance score
CAISO	Capacity price	mileage price	mileage	accuracy percentage
NYISO	Capacity price	movement price	movement	performance index
MISO	Capacity price	mileage price	mileage	performance accuracy
ISO-NE	Capacity price	service price	movement	performance score

**표 2** FERC Order 755 지침에 따른 북미 전력시장 시장 설계[17]

**Table 2** ISO/RTO market designs according to the FERC Order 755

	PJM	CAISO	NYISO	MISO	ISO-NE
시장 정산	단일정산	이중정산	단일정산	단일정산	이중정산
정산에 사용되는 요소	성과지수, 유효용량지수, 신호별 마일리지 비율	자원별 출력 변동분 승수 (Mileage Multiplier)	시스템 출력 변동분 승수 (Mileage Multiplier)	자원별 출력 변동분 승수 (Mileage Multiplier)	자원별 출력 변동분 승수 (Mileage Multiplier)
공급성과 시장가격 (MP)	청산자원 중 가장 비싼 공급성과 입찰가(\$/MW)	한계 자원의 공급성과 입찰가(\$/mile)	한계 자원의 공급성과 입찰가(\$/mile)	청산자원 중 가장 비싼 공급성과 입찰가(\$/MW)	청산자원 중 가장 비싼 공급성과 입찰가(\$/MW)
공급용량 시장가격 (CP)	한계자원의 공급용량 입찰가+기회비용 - 공급성과 시장가격(\$/MW)	한계자원 입찰가+ 기회비용(\$/MW)	한계자원 입찰가+ 기회비용(\$/MW)	한계자원 입찰가+ 기회비용(\$/MW)	한계 입찰가 (\$/MW)
급전신호	2개의 신호 RegA & Reg D	속응자원 우선 (Fast-first)	속응자원 우선 (6초 응답률)	속응자원 우선 (Fast-first)	속응자원 우선 (Fast-first)
보상방식	[(CP*MW)+MP*MW* 신호별 마일리지 비율]* 성과지수	CP*MW+MP* 마일리지*성과지수	CP*MW + MP* 마일리지*성과지수 (자원의 성과지수 하한값 고려)	CP*MW+MP* 마일리지 (자원의 성과지수 하한값 제한)	CP*MW+MP* 마일리지 (성과지수 제한)

비싼 공급성과 입찰가를 공급성과 부문 시장 가격으로 결정(시장마다 규칙이 조금씩 상이함)하는 요소가 있다. 아래의 <표 1>과 <표 2>는 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력시장에서 조금씩 상이하게 사용되는 용어에 대한 정의와 FERC Order 755에 규정에 따른 북미 ISO/RTO 주파수조정용 예비력 시장 구조를 나타낸다.

<표 2>에서 단일정산 방식은 주파수조정예비력 공급용량 요구량(Regulation Capacity Requirement)만을 고려한 방식이며, 이중정산 방식은 공급용량 및 공급성과 요구량 모두를 고려하는 방식을 말한다. 본 논문은 북미 ISO/RTO의 frequency regulation 시장 중 PJM과 CAISO만을 자세하게 다루기에 다음 절에서는 PJM과 CAISO의 시장 참여자 보상에 사용되는 요소들에 관하여 알아본다.

## 2.2 PJM Frequency Regulation 시장 가격결정 메커니즘

### A. 주파수조정예비력 급전 신호(Frequency Regulation Signal)

PJM은 하루전 주파수조정용 예비력 시장에서 2가지 유형의 급전 신호(RegA, RegD)를 제공한다. RegA 신호는 기존의 예비력 자원(증감발 제약을 가진 공급자원(CT, Cc, 수력 및 스팀터빈))에게 제공되는 급전 신호로 설계된 반면에 RegD는 응동 속도가 빠른 자원(에너지 제약을 가진 자원(ESS, flywheel 등))을 위하여 설계되었다. 일반적으로 RegA 신호를 받는 자원의 평균 마일리지보다 RegD 신호를 받는 자원의 평균 마일리지 2~3배에 이른다[18].

### B. 응답 정확성(Accuracy)

PJM은 급전신호 대비 응답정확성을 판단하는 요소로 성과지수(performance score)를 사용하여 자원 급전 순위 및 보상에 이용한다. 해당 성과지수는 일치성지수(precision score), 지연성지수(delay score) 그리고 상관관계지수 또는 일치성지수(correlation score 또는 accuracy score) 항목으로 구성되어 있다. 이 중 일치성지수는 예비력 급전 신호와 해당 자원의 응답량 사이의 편차(절대값)의 합으로 10초씩 예비력 급전 신호 구간에 대한 1시간 평균으로 산출하며, 0과 1 사이의 값을 가지며, 다음의 수식과 같다.

$$S^{precision} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Reg^{response}[i] - Reg^{signal}[i]}{Reg^{hourly\ average\ signal}} \right| \quad (2)$$

여기에서 n은 급전 구간동안 발생한 예비력 급전신호 횟수,  $Reg^{hourly\ average\ signal}$ 는 급전 신호에 관한 1시간 평균값 그리고  $Reg^{response}[i]$ 와  $Reg^{signal}[i]$ 는 i 시점에서 자원의 응답량 및 예비력 급전 신호를 각각 뜻한다.

상관관계지수는 주파수조정예비력 시장 참여 자원이 얼마나 예비력 급전 신호를 잘 추종했는지에 대한 지표로서 지연성지수를 산출하는데 이용된다. 해당 상관관계지수 계산은 매시간 10초 단위로 시간대( $\delta$ )를 옮기면서 최대5분까지 총 31개의 샘플 중 예비력 급전신호와 해당 자원의 응답 사이 5분 운전시간 동안의 상관관계 값 중 가장 큰 값으로 결정되며 다음의 수식과 같다.

$$S^{corr} = \max_{\delta=0-5min} \frac{\sum_{i=1}^n Reg^{response}[i - \bar{i}^{response} + \delta] \times Reg^{signal}[i - \bar{i}^{signal}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Reg^{response}[i - \bar{i}^{response} + \delta])^2 \times \sum_{i=1}^n (Reg^{signal}[i - \bar{i}^{signal}])^2}} \quad (3)$$

여기에서  $\bar{i}^{response}$ 와  $\bar{i}^{signal}$ 은 i시점부터 5분 동안의 평균 급전신호 및 응답량을 나타낸다.

성과지수의 3가지 항목 중 마지막 항목인 지연성지수는 주파수조정용 예비력 급전신호와 해당 자원의 응답 사이의 응답 지연 시간을 나타낸다. 이러한 지연성지수는 상관관계지수 값이 최대가 되는 시간대( $\delta$ )에서 얻어지며, 다음과 같다.

$$S^{delay} = \left| \frac{\delta - 5min}{5min} \right| \quad (4)$$

이와 같은 3가지 지수를 통해 PJM의 성과지수는 가중선형결합(weighted linear combination)으로 산출되며, 다음과 같다.

$$S^{performance} = AS^{precision} + BS^{corr} + CS^{delay} \quad (5)$$

여기에서 A, B 및 C는 음이 아닌 정수로 총합이 1이어야 하는 계수이다. A, B 및 C에 대한 값은 주파수조정용 예비력에 대한 과거 실적 데이터 분석을 통하여 PJM에서 지정하며, 일반적으로 1/3의 값씩 가진다.

### C. 유효용량지수(Benefit Factor)

유효용량지수는 RegD 공급자원을 기존의 RegA 공급자원과 비교하여 동등한 가치를 가지도록, RegA 및 RegD 자원 간의 주파수조정예비력 제공용량에 관한 대체율(rate of substitution)을 모델링하기 위해 도입되었다. 즉, 자원의 주파수조정예비력 입찰용량을 재산정하여 새로운 예비력 용량인 유효용량(Effective MW)을 산정하는데 유효용량지수가 쓰인다. 여기에서 RegD 자원은 유효용량지수를 통해 유효용량 산정에 관한 가중치(2.9~0.0001)를 받게 되지만, RegA 자원은 가중치(유효용량지수 = 1)를 받지 않는다. 이러한 각 자원의 유효용량은 주파수조정예비력 요구량을 만족시키는데 사용되며, 정산에 사용되지 않는다(자원이 제공한 실제 예비력 용량을 기준으로 정산됨). RegD 자원의 유효용량지수를 산정 수식은 다음과 같다.

$$BF_j = \frac{MW_j^{Performance\ adjusted} \times (0.0001 - 2.9)}{RegD^{limitMW} \times Reg^{requirement}} + 2.9 \quad (6)$$

여기에서  $MW_j^{Performance\ adjusted}$ 는 자원 j가 입찰한 예비력 용량과 해당 자원의 과거 성과지수의 곱으로 재 산정된 용량[MW]을 말하며,  $RegD^{limMW}$ 는 PJM이 정한 주파수조정용 예비력 시장에 참여하는 전체 RegD 자원의 비율을 말한다. 현재 PJM은  $RegD^{limMW}$ 을 40%로 규정하여 운영중이다. 마지막으로  $Reg^{requirement}$ 는 주파수조정예비력 요구량으로 현재 고부하 시간에는 800MW, 저부하 시간대에는 525MW 고정값으로 결정되어

있다. 이와 같은 수식 (6)을 통해 구한 각 자원의 유효용량지수와 입찰 용량의 곱으로 자원의 유효용량을 산정한다[19].

**D. 가격결정 및 보상**

위의 A, B, C에서 설명한 요소들을 토대로 PJM 주파수조정예비력 시장은 시장가격을 결정 및 시장 참여자에게 보상을 제공한다. 시장 참여자가 입찰한 정보는 시장 참여자의 과거 성과지수, 급전신호 유형(RegA 또는 RegD)에 따른 유효용량지수와 신호별 마일리지 비율(mileage ratio)에 따라 변경되며, 새로운 시장입찰 가격(Adjusted Total offer cost(\$))과 자원의 시장 급전순위를 결정하는 급전 우선순위 가격(Rank price)을 만든다. 여기에서 신호별 마일리지 비율은 기존 신호(RegA)에 대한 마일리지와 시장에 참여한 자원이 추종하기로 선택한 급전신호의 마일리지의 비율로 만약 참여 자원이 RegA 신호를 받는다면 해당 자원의 마일리지 비율은 1이며, RegD 신호를 받는다면 1 이상의 값을 받게 된다. 이러한 마일리지 비율은 시장 참여에 따른 보상에서 RegD 신호를 추종하는 자원에게 가중치로서 작용하게 된다. 아래의 수식은 자원의 급전순위를 결정하는 우선순위 가격과 새로운 시장 입찰 가격이다[20].

$$\lambda_j^{Rank} = \frac{C_j^{ATOC}[\$]}{MW_j^{capability}[MW]} \quad (7)$$

$$C^{ATOC} = C^{ARCC} [\$] + C^{ALOC} [\$] + C^{ARPC} [\$] \quad (8)$$

여기에서  $MW_j^{capability}$ 는 자원이 입찰한 예비력 용량을 말하며, 해당 자원에 대한  $C^{ATOC}$ 는 새로운 총 입찰 비용(Adjusted total offer cost)을 뜻한다. 또한  $C^{ARCC}$ 는 변경된 주파수조정용 예비력 용량 가격,  $C^{ALOC}$ 는 변경된 기회비용, 그리고  $C^{ARPC}$ 는 변경된 마일리지 비용을 나타낸다. 각각 변경된 비용( $C^{ARCC}$ ,  $C^{ALOC}$ ,  $C^{ARPC}$ )들은 다음의 수식과 같다.

$$C^{ARCC} = \frac{Pr^{COPI}[\$/MW]}{F^{BFactor}} \times \frac{MW^{capability}[MW]}{S^{HPS}} \quad (9)$$

$$C^{ALOC} = \frac{C^{LOCI}[\$/MW]}{F^{BFactor}} \times \frac{MW^{capability}[MW]}{S^{HPS}} \quad (10)$$

$$C^{ARPC} = \frac{Pr^{POPI}[\$/\Delta MW]}{F^{BFactor}} \times \frac{MW^{capability}[MW]}{S^{HPS}} \times M^{HMR}[\Delta MW/MW] \quad (11)$$

여기에서  $Pr^{COPI}$ 는 자원이 입찰한 주파수조정용 예비력 용량 가격을 나타내며,  $C^{LOCI}$ 는 에너지만을 고려한 자원이 예비력을 제공할 때 발생하는 기회비용을 뜻한다. 또한  $Pr^{POPI}$ 는 자원이 입찰한 마일리지 가격,  $F^{BFactor}$ 는 입찰한 자원의 유용성 요소,  $S^{HPS}$ 는 해당 자원의 과거 실적 요소 그리고  $M^{HMR}$ 는 입찰자원의 예비력 급전 신호 유형에 따른 지난 30일간의 평균 마일리지를 나타낸다. 이중  $C^{LOCI}$ 는 RegD 신호를 추종하는 자원에 한하

여 0이다.

이와 같이 주파수조정용 예비력 시장에 참여한 자원의 우선순위 가격을 토대로 시장에서 결정된 주파수조정용 예비력 필요용량을 만족시키도록 급전순위를 결정하며, 마지막으로 필요용량을 만족시킨 한계 자원의  $C^{ATOC}$ 와 실제 실적요소를 반영한  $C^{ARPC}$ 와의 차가 예비력 용량 부문 보상 단가로 결정되며, 실제 실적요소가 반영된  $C^{ARPC}$ 가 마일리지 부문 보상 단가로 결정된다. 다음의 수식은 시장에 참여한 자원에 대한 예비력 용량 및 마일리지 부문에 대한 보상(credit)을 나타낸다.

$$RMCCP^{credit} = Regulation\ MW \times 실제\ Performance\ Score \times RMCCP \quad (12)$$

$$RMPCP^{credit} = Regulation\ MW \times 실제\ performance\ Score \times M^{AMR} \times RMPCP \quad (13)$$

여기에서 Regulation MW는 실제 자원이 제공한 regulation 용량을 말하며  $M^{AMR}$ 은 시간별 실시간 마일리지 비율을 뜻한다. 각 용량 및 마일리지에 대한 시장 청산가격은 5분 단위로 계산되며, 주파수조정용 예비력을 제공하는 자원에 대한 정산은 시간별 기준으로 이루어진다.

**2.3 CAISO 주파수조정용 예비력 시장 가격결정 메커니즘**

CAISO의 주파수조정예비력 시장은 예비력 급전신호를 상향 및 하향(regulation up 및 down)으로 구별하여 제공하는 시장으로 하루전 시장에서 대부분의 예비력 요구량을 확보하는 구조를 가지고 있다. 이러한 CAISO의 주파수조정예비력 시장에 참여하는 자원은 예비력 공급용량 가격[\$/MW], 용량[MW] 및 공급성과 가격[\$/mile)을 입찰한다. 예비력 용량 요구량(regulation capacity requirement)은 거래일에 대하여 예측한 부하의 일정 %로 산출하며, 평균 332(up)MW, 325(down)MW 정도이다. 이와는 다르게 거래시간에 필요한 전 자원의 출력변화량을 뜻하는 마일리지 요구량(mileage requirement)은 <표 3>에서 나타내는 3 가지 방법론으로 산출된 값 중 가장 작은 값으로 결정된다[21].

여기에서, 시스템 마일리지 승수는 해당 거래일 거래시간에 대하여 이전 7일 동안 같은 시간대의 실제 시스템 마일리지 누적분과 예비력 필요용량의 비율을 뜻한다. 또한 자원별 마일리지 승수는 자원의 속응성 및 정확성을 고려하여 자원이 할당받을 수 있는 마일리지를 증가시켜주는 가중치를 말하며 다음의 수식과

**표 3** CAISO의 마일리지 요구량 (mileage requirement) 산정방법[21]

**Table 3** Calculation example of the resource-specific mileage multipliers and the mileage assignment

1	예비력 용량 요구량(D-day에 대한 예측값)×시스템 마일리지 승수(System mileage multiplier)
2	거래 전 7일간의 해당 거래시간에서 지시된 평균 mileage
3	D-day 예비력 관련 전체 입찰용량×자원별 마일리지 승수(resource-specific mileage multiplier)

같다.

$$RMC = MP \times M \times PF \tag{16}$$

$$MM^{Resource} = MM^{System} \times WF^{Delay} \times \frac{WF^{Accuracy}}{WF^{Average Accuracy}} \tag{14}$$

여기에서  $MM^{System}$ 은 시스템 마일리지 승수를 말하며,  $WF^{Delay}$ 는 자원별 속응성 가중치를 말한다.  $WF^{Delay}$ 는 해당 자원의 급전신호에 따른 응답이 1분인 경우 10, 5분인 경우 5, 10분인 경우 1의 값을 가지게 된다. 이 외에  $WF^{Accuracy}$ 는 특정 기간 동안의 자원별 평균 응답 정확성을 뜻하며 급전 신호 대비 실제 급전량의 비(比)로 계산되며,  $WF^{Average Accuracy}$ 는 계통 내 평균 응답 정확성을 나타낸다. 수식 (14)를 이용하여 산출한 자원별 마일리지 승수  $MM^{Resource}$ 는 각 자원이 사전에 입찰한 예비력 공급용량[MW]과 곱하여 각 자원별 최대 할당 가능한 마일리지를 산출하게 된다.

15분 주기로 이루어지는 CAISO 주파수조정예비력 시장의 가격결정은 자원별 증감발률(ramp rate)을 고려하여 빠른 자원부터 우선적으로 급전신호를 제공하며, 각 예비력 용량 및 마일리지 요구량을 마지막으로 만족시키는 자원의 용량 및 마일리지 입찰 가격이 각 부분의 시장가격이 된다[22]. 시장 참여자원의 예비력 용량 보상은 용량부문 시장가격(\$/MW)과 자원이 제공한 예비력 용량[MW]의 곱으로 산정되며, 마일리지 보상은 마일리지 시장가격(\$/mile), 실제 자원이 수행한 마일리지(mile) 그리고 해당 자원의 정확성(%)의 곱으로 다음의 수식과 같다.

$$RCC = CP \times MW \tag{15}$$

여기에서 RCC(regulation Capacity Credit)은 공급용량에 대한 보상액[\$]을 말하며, CP는 공급용량에 관한 시장가격, MW는 각 자원이 입찰한 공급용량[MW]을 뜻한다. 또한 RMC(Regulation Mileage Credit)은 공급성과에 대한 보상액[\$]을 뜻하며,  $MP$ 는 공급성과에 대한 시장가격, M은 해당 자원의 실제 계측된 마일리지 그리고 PF는 성과지수(Performance factor)를 나타낸다.

### 2.4 PJM 및 CAISO 주파수조정예비력시장 가격결정메커니즘 비교

본 절은 앞 절에서 언급한 PJM과 CAISO 주파수조정예비력 시장의 전체적인 가격결정메커니즘 및 보상에 사용되는 산식을 비교분석하며, 아래의 <표 4>는 PJM과 CAISO 주파수조정예비력 시장메커니즘을 비교한 표이다.

<표 4>는 앞절에서 언급한 PJM과 CAISO 주파수조정예비력 시장의 가격결정 메커니즘 및 보상규칙을 비교한 표이다. 가격도출에 있어서 PJM은 CAISO보다 세밀하게 자원의 응답정확성 및 속응성을 반영하기 위하여 수식 (2)-(11)을 사용하였다. 이에 반에 CAISO는 최대 할당가능 자원별 마일리지를 도출하는데 사용되는 자원별 마일리지 승수에 관한 수식(14)만을 이용하였다. 해당 수식은 자원의 속응성, 과거 정확성, 시스템 정확성을 고려한다. 정산과의 과정에서 PJM은 공급용량 및 공급성과 부문 모두에 자원의 속응성 및 정확성을 고려한 반면에 CAISO의 경우, 공급용량 정산에서는 자원의 속응성 및 정확성이 고려되지 않는다.

**표 4** PJM 및 CAISO 주파수조정예비력 시장메커니즘 비교

**Table 4** Comparison of PJM and CAISO regulation market mechanisms

구분	PJM	CAISO
입찰	공급용량(Capability) 및 공급성과(Performance) 입찰[\$/MW]	공급용량(Capacity)[\$/MW] 및 공급성과(Mileage) 입찰[\$/mile]
예비력 요구량 구분	단일 예비력 용량 요구량 (Regulation capability requirement) - On/Off peak 시간별 고정값 사용	예비력 용량 요구량(Capacity requirement), 공급성과 요구량(Mileage requirement) - 과거 데이터 기반 산정
가격 도출	자원별 과거 속응성 및 정확성 반영 - 수식 (2)-(5) AGC 급전 신호 유형에 따른 가중치 반영 - 수식(6) Rank Price 기반 공급용량 요구량 청산 - 수식(7)-(11)	자원의 속응성 및 과거 정확성 반영 - 수식 (14) 예비력 공급용량[MW]*자원별 마일리지 승수 - 수식 (14) 공급용량 및 공급성과 요구량 ramp rate 기반 청산
시장 청산 가격	한계발전기의 Rank Price가 시장청산가격(RMCP)로 결정	공급용량 및 공급성과 요구량을 만족시키는 자원의 입찰가가 시장 청산가격으로 결정 - 공급용량 시장가격(Capacity price) - 공급성과 시장가격(Mileage price)
정산	공급용량 정산(Capacity credit) - 자원의 속응성 및 정확성 고려 - 수식 (12) 공급성과 정산(Performance credit) - 자원의 속응성, 정확성 고려 - AGC 신호 유형에 따른 가중치 제공 - 수식 (12)	공급용량 정산(Capacity credit) - 자원의 속응성 및 정확성 고려 안됨 - 수식 (15) 공급성과 정산(Mileage credit) - 자원의 정확성 고려됨 - 수식 (16)

### 3. 국내 CBP 시장 주파수조정용 서비스(G/F, AGC) 제공 자원 보상방안

국내 CBP 시장에서 제공하는 주파수조정서비스는 계통의 수급균형을 유지하기 위해 운영되는 서비스로 주파수추종서비스(GF), 자동발전제어서비스(AGC) 그리고 최근에 개편된 주파수조정용 전기저장장치의 주파수 추종 및 원격출력제어 서비스가 존재한다[16]. 본 장에서는 GF 및 AGC 서비스에 대한 보상방안을 알아본다.

#### 3.1 주파수추종용 예비력 서비스(Governor Free) 보상방안

주파수조정서비스 중 GF는 상정사고 이후 조속기로 주파수 하락을 방지하는 역할을 수행하는 서비스로 해당 서비스를 제공하는 자원은 다음과 같은 수식에 의해 정산된다.

$$GFP_{i,t} = GFRQ_{i,t} \times SDWF_{i,t} \times DBWF_{i,t} \times GFSF_{i,t} \times GFHF \times \text{운전시간(분)}/60 \quad (17)$$

해당수식은 GF를 제공한 발전기의 응답속도 및 부동대를 고려하여 시간당 정산금액을 산출하는 수식으로 각 항목은 다음과 같다.

- $GFP_{i,t}$  : 주파수추종서비스 정산금액
- $GFRQ_{i,t}$  : 주파수추종서비스 응답가능용량
- $SDWF_{i,t}$  : 속도조정률에 따른 가중치
- $DBWF_{i,t}$  : 부동대에 따른 가중치
- $GFSF_{i,t}$  : 주파수추종서비스 운전상태
- $GFHF$  : 주파수추종서비스 정산단가

이중 주파수추종운전 응답가능용량(GFRQ)은 전력거래소 계통 운영처 계통기술팀에 의해 매 분기 시작 1개월 전, “발전기 운전 실적 분석시스템”에서 계산된 최근 5회 산술평균 주파수추종운전 응답량을 뜻하며, 1회 응답량은 주파수 변동 전 20초(2초 간격)간의 평균출력과  $60 \pm 0.2Hz$  범위를 벗어난 후 10초~60초까지 50초(2초 간격)간의 평균출력의 차로써 정의된다. 해당 응답량은 발전기 운전실적 분석시스템(GODAS)에 의해 산정되며, 다음의 계산식과 같다.

$$GFRQ_i = \text{변화량} - \text{기준량} = \frac{\sum_{n=1}^{26} \text{출력}}{26} - \frac{\sum_{n=1}^{11} \text{출력}}{11} \quad (18)$$

속도조정률 가중치(SDWF)에서 속도조정률은 조속기 및 전기저장장치의 주파수에 대한 응답특성을 나타낸 것으로 정격출력, 정격주파수에서 순간적으로 무부하로 했을 때 주파수 상승분과 정격주파수와의 비(比)로서 다음과 같다.

$$Ri = \frac{\Delta ft}{\Delta Pt} \cdot \frac{Pr}{fr} \cdot 100 \approx \frac{\text{주파수변화율}}{\text{출력변화율}} [\%] \quad (19)$$

해당 속도조정률 수식에 대한 각 항목은 다음과 같다.

- $Ri$  : 안정상태 경사 속도조정률[%]
- $\Delta ft$  : 구간 주파수변화[Hz]
- $\Delta Pt$  : 구간 출력변화[MW]
- $fr$  : 정격주파수[Hz]
- $Pr$  : 정격출력[MW]

속도조정률은 전력거래소 중앙전력관제센터에서 측정하며 분기당 1회 최소 4시간 이상, 수력 등은 2시간 이상 주파수 추종성 분석시스템에 의해 수행된다. 또한 GF의 속도조정률 측정조건은 계통주파수가 4 sample 이상 계속 상승 또는 하락하고 주파수 변화량이 threshold 값(0.03Hz)보다 클 경우 측정하며, GF와 AGC 동시운전 발전기의 경우 AGC off 후 측정한다. 측정기준은 측정값과 신고값 대비 110% 이내 면 합격이다. <표 5>는 속도조정률(%)에 따른 속도조정률 가중치(SDWF)를 나타낸다.

표 5 속도조정률 가중치

Table 5 Governor free weighting factor

속도조정률(%)	3이하	4이하	5이하	6이하	7이하	8이하	8초과
SDWF	1.05	1.025	1.0	0.95	0.9	0.85	0.8

부동대 가중치(DBWF)는 60Hz를 기준으로 일정 주파수 범위 내에서 조속기가 응답하지 않도록 설정된 제어 범위에 대한 가중치를 말하며 <표 6>과 같이 산정된다.

표 6 부동대 가중치

Table 6 Dead band weighting factor

부동대	%	0.04 이하	0.05 이하	0.06 이하	0.07 이하	0.08 이하	0.08 초과
	Hz	59.976 ~60.024	59.97 ~60.03	59.964 ~60.036	59.958 ~60.042	59.952 ~60.048	60.048 초과
DBWF		1.05	1.025	1.0	0.95	0.9	0.85

주파수추종 운전상태(GFSF)의 경우, EMS에서 취득한 조속기 접점 또는 차단기 접점의 on/off 상태로서 매 시간별 누적운전시간을 고려하여 1또는 0의 값을 가지고 적용된다.

#### 3.2 자동발전제어(Automatic Generation Control) 서비스 보상방안

주파수조정 서비스에서 자동발전제어(AGC)에 대한 정산식은 다음과 같다.

$$AGCP_{i,t} = AGCQ_{i,t} \times CAWF_{i,t} \times CPWF_{i,t} \times AGCF \quad (20)$$

여기에서, 각 항목은 다음과 같다.

- $AGCP_{i,t}$  : 자동발전제어서비스 정산금액
- $AGCQ_{i,t}$  : 자동발전제어서비스 제어가능용량
- $CAWF_{i,t}$  : 제어가용률에 따른 가중치
- $CPWF_{i,t}$  : 제어성과에 따른 가중치
- $AGCF_{i,t}$  : 자동발전제어서비스 정산단가

이 중 자동발전제어 제어가능용량은 다음의 식과 같이 발전기별 제어참여율을 계통요구량으로 환산하여 산정한다. 단, 자동발전제어서비스를 제공하지 않는 구간은 제외한다.

$$AGCQ_{i,t} = Apf_{i,t} \times AGCRQ_i \quad (21)$$

여기에서  $Apf$ 는 발전기별 제어참여율을 뜻하며,  $AGCRQ$ 는 시간대별 자동제어 요구량으로 총 500MW를 나타낸다.

$Apf$ 는 매 1분단위의 발전기별 EMS 조정참여율( $Rpf$ , 적분)과 발전기별 EMS 추종참여율( $Epf$ , 비례)를 1시간단위로 합산하여 다시 1분단위로 평균한 값을 의미하며, 다음의 수식과 같다.

$$Apf_{i,t} = \frac{1}{120} \sum_{m=1}^{60} (Rpf_{i,m} + Epf_{i,m}) \quad (22)$$

또한 제어가용률 가중치는 입찰공급가능용량 대비 자동발전제어 운전용량의 백분율로 다음과 같이 산출된다.

$$CAF_{i,t} = \frac{1}{60} \times \sum_{m=1}^{60} \frac{LFC_{i,m}^{\max} - LFC_{i,m}^{\min}}{RA_{i,t}} \times 100 \quad (23)$$

여기에서, 매 1분단위의  $LFC^{\max}$ 는 자동발전제어 최대운전용량을 의미하며,  $LFC^{\min}$ 은 매 1분 단위의 자동발전제어 최소운전용량을 의미한다. 또한  $RA$ 는 변경 공급가능용량으로 마감시간 이후 발전사업자가 발전기 출력증가/감소율을 고려하여 변경 입찰한 변경 공급가능용량을 의미한다. 다만, 변경 입찰이 없는 경우에는 해당 발전기의 공급가능용량( $A$ )으로 대체된다. 따라서  $CAF$ 에 관한 수식은 특정 시점에서 해당 발전기의 1시간에 대한 자동발전제어 최대운전용량과 최소운전용량의 차를 공급가능용량으로 나눈 후 1분단위로 평균한 값(%)을 나타낸다. <표 7>은 제어가용률에 따른 제어가용률 가중치를 나타낸다.

**표 7** 제어가용률 가중치

**Table 7** Control availability weighting factor

CAF	15 미만	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50	50 이상
CAWF	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3

제어성과는 당해 거래일의 실제출력과 계획출력의 상관계수로 서 아래와 같이 산출된다. 단, 발전기별 제어참여율이 1% 미만인 경우에는 가중치를 1로 적용한다.

$$CPF_i = CORREL_{day}(\overline{AG}_{i,m}, \overline{EG}_{i,m}) \quad (24)$$

여기에서  $\overline{AG}_{i,m}$ 은 EMS에서 4초 단위로 산정된 발전기 실제 출력의 1분 평균을 의미하며,  $\overline{EG}_{i,m}$ 은  $\overline{AG}_{i,m}$ 과 유사하게 EMS에서 4초 단위로 산정된 발전기 예상출력의 1분 평균을 의미한다.  $\overline{EG}_{i,m}$ 의 경우 EMS 요구출력의 1분 평균값( $\overline{DG}_{i,m}$ )과 조속기 예상응답량의 1분 평균값( $\overline{GF}_{i,m}$ )의 합으로 산출되며 다음의 수식과 같다.

$$\overline{EG}_{i,m} = \overline{DG}_{i,m} + \overline{GF}_{i,m} \quad (25)$$

또한, 조속기 예상응답량의 1분 평균값을 의미하는  $\overline{GF}_{i,m}$ 은 다음과 같이 산정된다.

$$\overline{GF}_{i,m} = \frac{RG_i \times \overline{\Delta F}_m}{60 \times SD_i} \times 100 \quad (26)$$

$\overline{GF}_{i,m}$ 의 수식에서  $\overline{\Delta F}_m$ 은 ESM에서 4초 자료로 산정된 주파수편차의 1분 평균을 나타내며,  $RG_i$ 는 시장등록 자료에 의거한 발전기의 정격출력(MW)을 의미한다.  $SD_i$ 는 주파수추종서비스 적용기준에 의거한 속도조정율(%)을 나타낸다. 이와 같이 산정된 제어 성과지수( $CPF_i$ )의 값에 따라 제어성과 가중치( $CPWF_i$ )가 자동발전제어서비스를 제공한 자원들을 정산하는데 사용되며, 제어성과 가중치( $CPWF_i$ )는 <표 8>과 같다.

**표 8** 제어성과 가중치

**Table 8** Control performance weighting factor

CPF	0.5 미만	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~0.95	0.95 이상
CPWF	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1

### 3.3 시장별 속증자원에 대한 보상방안 지표 비교

지금까지 PJM 및 CAISO의 주파수조정예비력 시장에 참여하는 예비력 공급자원과 국내 CBP 시장에서 GF 및 AGC 서비스를 제공하는 예비력 공급자원에 관한 보상 메커니즘을 알아보았다. 이러한 메커니즘을 토대로 주파수조정예비력 공급자원의 보상과 관련하여 예비력 공급에 관한 속증성, 정확성 및 일치성 지표를 비교한다. 아래의 <표 9>는 PJM, CAISO 및 국내 CBP 시장에서의 주파수조정예비력 공급자원의 보상 관련 지표를 비교한 표이다.

결과적으로 PJM의 경우 자원의 속증성, 정확성 및 일치성을 고려하기 위하여 성과지수(응답정확성, 지연성, 일치성 지수), 유효용량지수, 마일리지 및 신호별 마일리지 비율을 사용하며, 이러한 요소들을 토대로 예비력 공급자원의 예비력 급전 순위, 시장 가격 등을 도출한다. CAISO의 경우 자원의 최대 할당 가능 마일리지를 도출하는데 사용되는 자원별 마일리지 승수를 계산할 때, 각 자원의 급전 신호에 대한 응답 정확성, 정확성 및 일치성이 고려된다. 응답에 대한 정확성, 일치성 및 속증성을 반영한 자원

**표 9** 주파수조정예비력 공급자원 보상관련 속응성 및 정확성 반영 지표 비교

**Table 9** The comparison of performance factors relative to the compensation of frequency regulation resources

평가지표	PJM	CAISO	CBP	
			GF	AGC
속응성	<ul style="list-style-type: none"> <li>성과지수</li> <li>- 응답 정확성 지수</li> <li>유효용량지수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>마일리지</li> <li>마일리지 승수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>속도조정률 가중치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>제어성과가중치</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>마일리지</li> <li>신호별 마일리지 비율</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>마일리지 고려 안함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>마일리지 고려 안함</li> </ul>
정확성	<ul style="list-style-type: none"> <li>성과지수</li> <li>- 응답 지연성 지수</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>부동대 가중치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>제어성과가중치</li> </ul>
일치성	<ul style="list-style-type: none"> <li>성과지수</li> <li>- 응답 일치성 지수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>마일리지 승수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>실적기반 GF 용량 (GFRQ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>제어가용률 가중치</li> </ul>

별 마일리지 승수는 예비력 공급성과 시장가격을 결정하는데 영향을 끼친다. 마지막으로 국내 보조서비스 중 주파수추종 및 주파수조정예비력 서비스 제공자원에 대한 보상은 오직 제공 가능 용량에 대한 보상만이 이루어지고 있으며, 이러한 보상규칙 일부는 PJM에서 사용중인 성과지수의 산정방식과 유사하다. 하지만 국내 시장은 FERC Order 755에서 규정한 마일리지 보상에 대한 개념을 아직 사용하고 있지 않다고 볼 수 있다. 따라서 전력저장장치와 같은 비전통 자원의 빠른 응답 실적에 따른 차별화된 보상 규칙이 아직까지는 마련되지 않았다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 과

본 논문은 속응자원의 예비력 공급성과에 따른 추가적인 보상을 제공하도록 규정한 FERC Order 755에 대한 개념과 해당 규칙을 따르는 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력 시장의 구조에 대하여 알아보았다. 또한 북미 ISO/RTO 중 PJM과 CAISO 주파수조정예비력 시장에서의 시장 가격결정방법론 및 시장 참여자원에 대한 정산규칙에 영향을 미치는 요소에 대하여 알아보았다. 그 외에도 2017년부터 전력저장장치가 주파수추종 및 주파수조정예비력 서비스를 제공할 수 있는 국내 CBP 시장에서의 해당 서비스의 정산규칙을 조사하고 PJM, CAISO 및 CBP 시장의 주파수조정서비스를 제공한 자원에 대한 보상방안을 비교 분석하였다. 또한 각 시장의 가격결정에 영향을 미치는 요소가 자원의 속응성, 정확성 및 일치성 측면에서 어느 특성에 속하는지를 구분하였으며, 국내 CBP 시장이 FERC Order 755에서 규정한 시장 참여자원의 공급성과(또는 마일리지)에 대한 보상을 현재까지는 제공하고 있지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 보다 빠르고 정확하며, 비교적 더 많은 용량을 주파수조정서비스로 제공하는 자원에 대한 적절한 보상이 이루어지지 않는다고 볼 수 있기에 이에 대한 제도개선 또는 북미 ISO/RTO에서 사용중인 마일리지 개념을 도입을 고려할 필요가 있다 사료된다. 따라서 향후 북미 ISO/RTO 주파수조정예비력 시장의 가격결정메커니즘

및 마일리지 개념을 국내 CBP 시장에 도입할 경우 각 자원의 보상금 변화 및 경제성에 대한 연구를 수행하고자 한다.

#### References

- [1] 전력거래소, “전력시장운영규칙”, 12. 2016 available : [www.kpx.or.kr](http://www.kpx.or.kr)
- [2] Federal Energy Regulatory Commission. Order No. 755. Frequency Regulation Compensation in the Organized Wholesale Power Markets, Oct. 20, 2011. Available: <http://www.ferc.gov>.
- [3] Bolun Xu, Yury Dvorkin, Daniel S. Kirschen, C.A. Silva-Monroy, Jean-Paul Watson, “A Comparison of Policies on the Participation of Storage in U.S. Frequency Regulation Markets”, IEEE, 2016
- [4] Michael Kintner-Meyer, “Regulatory Policy and Markets for Energy Storage in North America”, IEEE, Vol. 102, No7, July 2015
- [5] Ruston Ogburn, “Performance-Based Regulation: Maximizing Value through Markets”, IEEE, 2012
- [6] Vivek Pandurangan and Hamidreza, “Frequency Regulation Services: A Comparative Study of Select North American and European Reserve Markets”, IEEE, 2012
- [7] Mohammad Nikkhah Mojdehi, Prasanta Ghosh, Makan Fardad, “Energy and Cost Minimization of Bidirectional Frequency Regulation Service by EV Following FERC Order 755” IEEE, 2015
- [8] Kab Seok Ko, Sekyung Han, Dan Keun Sung, “Performance-Based Settlement of Frequency Regulation for Electric Vehicle Aggregators”, IEEE Transactions on Smart Grid, 2016
- [9] Raymond H. Byrne, Ricky J. Concepcion, Cesar A. Silva-

Monroy, "Estimating Potential Revenue from Electrical Energy Storage in PJM", Power and Energy Society General Meeting, 2016

[10] Feng Guo, Ratnesh Sharma, "Hybrid Energy Storage Systems Integrating Battery and Ultra Capacitor for the PJM Frequency Regulation Market", Power and Energy Society General Meeting, 2016

[11] Yashen Lin, Prabir Barooah, Sean Meyn, Timothy Middelkoop, "Demand Side Frequency Regulation from Commercial Building HVAC Systems: An Experimental Study", American Control Conference, 2015

[12] Evangelos Vrettos, Emre C. Kara, Jason MacDonald, Goran Andersson, Duncan S. Callaway, "Experimental Demonstration of Frequency Regulation by Commercial Buildings - Part II : Results and Performance Evaluation", IEEE Transactions on Smart Grid, 2016

[13] Ying Xiao, Frederick S, "Performance-Based Regulation Modelin PJM Wholesale Markets", IEEE, 2014

[14] Rae-Anne Miller, Bala Venkatesh, Daniel Cheng, "Overview of FERC Order No. 755 and proposed MISO Implementation", Power and Energy Society General Meeting, 2013

[15] Ashkan Sadeghi-Mobarakeh, Hamed Mohsenian-Rad, "Strategic Selection of Capacity and Mileage Bids in California ISO Performance-based Regulation Market," Power and Energy Society General Meeting, 2016

[16] Yonghong Chen, "Two-part Regulating Reserve Compensation Formulation under Energy and Ancillary Service Co-optimization", IEEE, 2013.

[17] Beacon Power, "overview of FERC Order 755 and Pay-for-Performance Regulation", March 21, 2014, Available : [www.beaconpower.com](http://www.beaconpower.com)

[18] PJM Manual 28: Operating Agreement Accounting, PJM, 2017.

[19] PJM Manual 12: Balancing Operations, PJM, 2017.

[20] PJM Manual 11: Energy & Ancillary Services Market Operations, PJM, 2017.

[21] CAISO Annual Report on Market Issues and Performance, CAISO, 2017.

[22] Business Practice Manual for Market Operations, CAISO, 2017.

## 저 자 소 개



### 박 대 현 (Dae-Hyun Park)

1987년 4월 9일생. 2013년 건국대 전기공학과 졸업. 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



### 박 용 기 (Yong-Gi Park)

1979년 11월 14일생. 2005년 건국대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영산대학교 조교수.



### 박 중 배 (Jong-Bae Park)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 전기공학과 교수



### 김 발 호 (Balho H. Kim)

1962년 7월 11일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 홍익대학교 전기정보제어공학과 교수



### 노 재 형 (Jae-Hung Roh)

1969년 11월 10일생. 1993년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 2003년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 Illinois Institute of Technology 전기공학과 졸업(공학박사). 1992년 한국전력공사 입사. 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수