

文章编号:1006-2467(2021)12-1640-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.273

面向新型电力系统的华东电网运行 备用体系构建方法

胡 宏¹, 陈新仪¹, 王利峰¹, 滕晓毕¹

严 正², 徐潇源², 王 晗²

(1. 国家电网公司华东分部, 上海 200120;

2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 为进一步提升华东电网的有功调节能力, 从受端特性、新能源发展、净负荷波动、以及电力市场化改革需求等方面分析了新型电力系统建设下构建华东电网运行备用体系的必要性, 并结合国内外典型电网运行备用体系的现状, 提出了适应华东电网发展的运行备用建议体系, 对备用的分类、响应时间和最小备用配置原则进行了重新梳理和修订. 最后, 通过对华东电网实际运行数据的测算分析, 验证了本文所建议的运行备用体系的有效性.

关键词: 运行备用; 华东电网; 最小备用配置; 测算分析

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

Construction Method of an Operating Reserve System for East China Power Grid Oriented to New Power Systems

HU Hong¹, CHEN Xinyi¹, WANG Lifeng¹, TENG Xiaobi¹

YAN Zheng², XU Xiaoyuan², WANG Han²

(1. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to further enhance the active power regulation capacity of East China power grid, this paper analyzes the necessity of constructing an operation reserve system of East China power grid under the new power systems construction from the aspects of receiving end characteristics, new energy development, net load fluctuation, and the demand of power market reform. Furthermore, it proposes an operating reserve proposal system of East China power grid under the new situation based on the status of typical power systems at home and abroad. The suggested operating reserve system reorganizes and revises the principles of reserve classification, response time, and minimum reserve configuration. The results verify the effectiveness of the proposed operating reserve system through the measurement and analysis of the actual operation data of the East China power grid.

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/19-JS-214)

作者简介: 胡 宏(1970-), 男, 浙江省杭州市人, 硕士生, 高级工程师, 主要从事电力系统运行工作.

通信作者: 严 正, 男, 教授, 博士生导师; E-mail: yanz@sjtu.edu.cn.

Key words: operating reserve; East China power grid; minimum reserve configuration; measurement and analysis

在电力系统运行过程中,留取一定的运行备用容量是应对系统内发生功率预测偏差和运行事故的主要手段,对于保障电网安全稳定运行具有重要意义^[1-3].为更加有效、合理地留取运行备用,不同规模的电网系统包括美国 PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland)电网、英国国家电网、北欧电网等均基于各自系统的运行特征,从备用的种类、响应时间、最小备用配置容量等方面进行了规定,以满足电网实际运行的有功调节需求.文献[4]研究了北美、澳大利亚和欧洲等多个国家和地区电网的发展情况,并对其事故备用标准进行了细致分类.作为我国区域受端电网的典型代表,华东电网基于《电力系统技术导则 SD131-1984》^[5]中的相关规定,于 2014 年发布了《华东电网运行备用调度管理规定(试行)》^[6],构建了华东电网的运行备用体系并沿用至今,保障了华东地区电力供给的安全性和稳定性.

我国已制定 2030 年实现“碳达峰”、2060 年实现“碳中和”的目标,并以构建新型电力系统作为实现上述目标的重要手段.在此过程中,区域电网由外到内的运行特征将发生显著变化,主要体现为外部直流馈入比例增加、内部间歇性新能源发电发展迅猛、电力市场化改革推进迅速等^[7-9],这使得电力系统需要进一步增强自身有功调节能力,以应对复杂运行环境下可能出现的不确定性事件.同时,《电力系统技术导则 SD131-2020》^[10]于 2020 年 7 月 1 日正式实施,其中重新整理和释义了运行备用的相关内容,并着重增加了对新能源间歇性发电影响的考量.在上述背景下,有必要对华东电网的运行备用体系进行梳理和修订,一方面,用以应对华东电网运行特征复杂性不断增强的局面,提升华东电网整体的有功调节水平;另一方面,构建运行备用体系是区域电力备用辅助市场实施的关键,将为华东区域内电力市场化改革的推进奠定良好基础.

综上所述,本文首先分析了新型电力系统发展下构建华东电网运行备用体系的必要性,通过对国外典型电网运行备用体系的调研,并结合现行的国内导则与规定,构建了新形势下华东电网的运行备用体系,对备用的分类、响应时间和最小备用配置原则进行了重新梳理并给出修订建议.最后,通过对华东电网实际运行数据的测算分析,验证了本文所建议的运行备用体系的合理性.本文所提运行备用体

系的构建方法能够为我国其他地区电网运行备用容量的计算提供理论方法支撑.

1 华东电网运行备用体系构建必要性

1.1 华东电网运行情况

华东电网由江苏、安徽、上海、浙江、福建 5 个省(市)电网构成,供电面积约为 $4.7 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国 4.91%.目前,华东电网已形成了以长三角城市群为中心的网格状受端电网格局,其中上海、苏南、浙北和皖南地区构成华东 500 kV 主环网,电源主要分布在苏北、皖北、浙江东南沿海和福建等地区.区外受电方面,华东电网已经形成安徽、苏北、浙江三大直流送电群向环太湖负荷中心送电的局面,截止 2019 年底共有 11 回区外直流向华东地区送电.电力市场建设方面,华东电网与其他区域电网间存在跨区富余可再生能源现货市场和中长期跨区域交易合同,华东区域内存在省间调峰辅助服务市场^[11]和中长期省间交易市场^[12],浙江和福建作为电力现货市场试点省份已开展模拟试运行^[13-14].

随着新型电力系统的发展,受区外来电占比增加、区内新能源快速发展、电力市场化改革快速推进等因素的影响,华东电网的运行特性发生了显著变化,在电网有功功率调节和备用调度管理方面面临着新形势和新挑战,具体表现为以下几点.

(1) 电网受端特性显著增强,存在直流闭锁后大功率缺额风险.截至 2018 年底,华东电网受入区外来电 $6.976 \times 10^7 \text{ kW}$,且 2019 年新增区外来电 $8.381 \times 10^6 \text{ kW}$.随着大功率特高压直流线路的陆续投产,华东电网的受端特性会进一步凸显,形成受电容量大、区域受电比例高、单回直流输电线路额定功率大的局面,存在直流闭锁后大功率缺额的风险.

(2) 华东区域内分布式新能源发展迅速,以新能源为主体的新型电力系统有功调节需求增强.受分布式新能源快速发展的影响,华东电网内净负荷的波动性增强,为维持系统频率稳定和功率平衡,需要进一步提升华东电网的有功调节能力.

(3) 调度口径新能源占比增加,部分用电高峰时段会面临备用不足的局面.截至 2019 年底,华东电网调度口径新能源装机容量已达到全网调度口径装机容量的 13%,且 2020~2022 年华东全网预计净增电源 $4.684 \times 10^7 \text{ kW}$,其中新增新能源占比

42.4%, 新能源出力不确定性将直接影响电力的供需平衡, 冬、夏季用电高峰期将出现局部时段全网备用紧张、部分区域电网备用不足的局面。

(4) 电力市场化进程快速推进, 备用管理的合规性和精细度要求提高。华东区域内浙江和福建作为第一批电力现货市场试点省份, 已开展模拟运行; 其他省市也将陆续开展电力现货市场建设。电力市场环境下, 各省(市)备用的留取将更加侧重于经济效益, 在此过程中对备用管理的合规性和精细度要求将进一步提高。

在上述背景下, 依据现行华东电网运行备用体系所留取的备用容量会出现难以满足新形势下华东电网备用需求的情况, 并且电力市场化进程也对备用类型、备用来源提出了新的要求。因此, 有必要调研、梳理现行典型电网的运行备用体系, 为新运行特性下华东电网运行备用体系的构建提供建议, 进一步提升新型电力系统发展下华东电网的有功调节能力, 保障华东电网的运行安全性和供电可靠性, 并为华东区域内电力市场化改革奠定基础。

1.2 国外典型电网的运行备用体系概述

本节调研了国外典型电网的运行情况, 以美国 PJM 电网和英国国家电网为代表, 分析不同运行环境下电网运行备用体系的特点, 为新型电力系统发展下华东电网运行备用体系构建提供参考。

1.2.1 美国 PJM 电网的运行备用体系

(1) 运行备用的分类和定义。美国 PJM 电网的运行备用主要包括一次备用和二次备用^[15], 相应备用设置的目的和来源介绍如下。

运行备用: 为应对负荷预测误差和发电侧强迫停运等不确定性事件而留取的备用。运行备用容量指 30 min 内所有可响应调度指令的机组备用容量和可切除的负荷容量, 参与运行备用的机组包括并网运行机组和离线机组。

一次备用: 为应对负荷预测误差而留取的备用, 需保持与电网同步运行或处于备用状态, 且能在 10 min 内投入运行^[16]。一次备用包括同步备用和非同步备用。其中, 同步备用(即旋转备用)指在 10 min 内并网机组的出力增加量或负荷的减少量; 非同步备用(即快速启动备用)指离线机组在 10 min 内根据调度指令立即启动并网的发电量。

二次备用: 为应对负荷预测误差和发电侧强迫停运等不确定性事件而留取的备用。二次备用容量指在 10~30 min 内可响应调度指令的机组备用容量以及可切除的负荷^[16]。

由上述备用的分类和定义可以看出, 美国 PJM 电网主要依据响应时间对备用进行了分类, 并兼顾了发电侧和负荷侧资源。

(2) 最小备用配置原则。

美国 PJM 电网的日前运行备用容量 C_{OR} 主要由负荷预测不足误差率、发电机强迫停运率和预测最大负荷决定, 其计算公式如下:

$$C_{OR} = (\eta_L + \eta_G) P_{L, \max} \quad (1)$$

式中: η_L 为负荷预测不足误差率, 以 3 年内平均负荷预测不足误差为依据; η_G 为发电机强迫停运率, 以日前 18:00 到运行日 20:00 之间连续 3 年机组强迫停机的平均水平为依据; $P_{L, \max}$ 为预测最大负荷。

1.2.2 英国国家电网的运行备用体系

(1) 运行备用的分类和定义。

以英国国家电网日前运行备用容量的计算为依据, 本文主要介绍其备用体系中的事故备用、快速备用和短期运行备用^[17], 相应备用设置的目的和要求如下。

事故备用: 为应对大型发电站可用性的不确定性以及天气和负荷预测的误差而留取的备用。

快速备用: 为应对系统实时运行中负荷预测误差和新能源发电预测误差而留取的备用。英国国家电网要求机组快速备用需要在调度指令下发后的 2 min 内响应, 在 4 min 内达到满出力, 持续时间需达到 15 min, 并且提供快速备用的机组最小容量为 2.5×10^3 kW。

短期运行备用: 为应对系统内的负荷预测误差和新能源发电预测误差, 以及保障系统低频时的频率稳定而留取的备用。英国国家电网要求机组短期运行备用需要在调度指令下发后 20 min 内响应, 并可维持满出力 2 h, 最长需达 4 h, 并且可提供短期运行备用机组的最小容量为 3×10^3 kW。

除上述主要的几种备用外, 英国国家电网根据电网内部电源结构、运行环境的变化, 正研究引入新的备用产品, 以维持电网的安全稳定运行。

(2) 最小备用配置原则。

考虑系统运行事故的不确定性以及负荷和新能源出力的预测误差, 英国国家电网的日前运行备用容量 C'_{OR} 计算如下:

$$C'_{OR} = C_{CR} + C_{FR} + C_{ER} \quad (2)$$

式中: C_{CR} 为应对系统内最严重事故功率缺额所留取的备用容量; C_{FR} 为维持系统频率稳定所留取的低频备用容量; C_{ER} 为应对负荷和新能源发电预测误差留取的备用容量。

基于对美国 PJM 电网和英国国家电网运行备用体系的概述可知,运行备用的设置需要考虑负荷预测误差、新能源出力波动和电网运行事故所引起的功率缺额的影响,并根据有功功率缺额的情况设置不同时间尺度、不同类型的备用服务进行响应,以维持系统的频率稳定和功率平衡.值得注意的是,各个电网最小备用配置容量的计算原则是在其备用类型和基本备用需求的基础上,依据不同地区电网的实际网情进行设置的.典型电网的运行特征如表 1 所示.由表 1 可知,美国 PJM 电网、英国国家电网和华东电网的运行特征对比可知,我国华东电网具有负荷规模大、外来电占比高的独有特征,在此背景下,照搬国外电网的备用体系架构是无法切合实际电网运行需求的,需要进一步研究并建立符合华东电网实际网情的运行备用体系.

表 1 典型电网的运行特征

Tab. 1 Operation characteristics of typical power grids			
运行特征	负荷规模/kW	装机中风光占比/%	电源中直流占比/%
美国 PJM 电网	1.65×10^8	1.00	0
英国国家电网	5.20×10^7	34.39	6
华东电网	3.20×10^8	13.00	15

2 华东电网运行备用体系构建建议

考虑华东电网在有功调节能力提升方面面临的新形势和新挑战,结合国外典型电网运行备用分类的经验,本文基于最新发布的《电力系统安全稳定导则 GB38755-2019》^[18]和《电力系统技术导则 SD131-2020》^[10],并在已有《华东电网运行备用调度管理规定(试行)》的基础上,针对华东电网的运行特征,提出了面向新型电力系统发展的华东电网运行备用建议体系,以期增强华东电网的有功调节能力,保障华东电网的安全稳定运行.

2.1 华东电网运行备用分类和定义

华东电网运行备用分类如图 1 所示.从备用的用途和响应时间出发,本节重新梳理并将华东电网运行备用进行分类.其中,运行备用分为正备用和负备用,正备用包括 10 min 备用(含旋转备用)以及 30 min 备用,相应备用设置的目的和来源分别介绍如下.

(1) 运行备用:为平衡负荷及电源(含新能源)波动、电网事故等未来不确定事件引起的电网功率不平衡,保证电网安全运行和可靠供电,由电力调度部门安排的预留容量.运行备用需要考虑新形势下

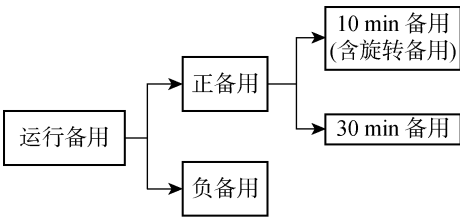


图 1 华东电网运行备用分类

Fig. 1 Operating reserve classification for East China power grid

具有强随机性特征的分布式新能源快速发展所带来的影响,且需要具有正、负双方向的调节性能(正备用和负备用).

(2) 旋转备用:为应对负荷及电源(含新能源)波动、单台大机组跳闸、单一电网元件故障导致的多台大机组失去、单一直流双极闭锁冲击等情况,由电力调度部门安排的接于母线且立即可以带负荷的、不受电网稳定限额约束的预留上调容量.旋转备用包含于 10 min 备用中.

(3) 10 min 备用:为保障在负荷及电源(含新能源)波动情况下发生机组跳闸、直流闭锁、电网事故等事件后的系统备用充裕度,由电力调度部门安排的在调度部门发出指令后 10 min 内能够全部调出,并不受电网稳定限额约束,且能至少持续 1h 的预留容量.

(4) 30 min 备用:为应对多重相继事故冲击由电力调度部门安排的 30 min 内能够全部调出,并不受电网稳定限额约束,且能至少持续 2 h 的预留容量.

(5) 负备用:为应对负荷及电源(含新能源)波动、外送通道突然失去等突发情况,由电力调度部门安排的在调度部门发出指令后 10 min 内能够全部调出,不受电网稳定限额约束的预留容量.

可提供上述备用的机组如表 2 所示.

2.2 最小备用配置原则

针对不同的运行备用,规定最小备用配置如下.

(1) 旋转备用最小配置原则:全网旋转备用总量不小于电网当时运行的最大单机容量,不小于最大直流双极送电功率,同时不小于全网预测最高负荷的 2.5%;

(2) 10 min 备用最小配置原则:全网 10 min 备用总量取电网当时运行的最大单机容量和最大直流双极送电功率中较大者与全网预测最高负荷的 2.5%之和;

(3) 30 min 备用最小配置原则:各省市 30 min

备用不小于本省市单一元件故障会损失的发电出力值,不小于各区外直流任一直流双极闭锁后本省市最大消纳值;

(4) 负备用最小配置原则:全网负备用容量取全网正常方式下(节假日或恶劣天气除外)预测最低负荷的 3%。节假日及台风等极端自然天气情况下,

负备用配置可视运行需要进行调整。

为进一步论证旋转备用最小配置原则中旋转备用容量占全网预测最高负荷的比例(2.5%)的合理性,本文构建了兼顾系统运行经济性和安全性的华东电网备用需求计算模型,该模型包括预调度模型和再调度模型两部分,具体模型构建如下。

表 2 对应于不同类型运行备用的机组
Tab.2 Units for different operating reserve types

备用类型	备用时间	机组来源
正备用	10 min 备用	旋转备用:在运机组 10 min 内可调用的剩余发电容量,暂不包括负荷侧备用容量。 在运机组、具备快速启动能力的机组(包括有足够水能储备的未开水电、未开抽蓄机组)、储能装置或符合要求的负荷侧资源 10 min 内可调用的容量。
	30 min 备用	不受燃料制约的火电机组剩余容量,有足够水能储备的水电机组、抽蓄机组容量,以及经省市政府批准的负荷备用容量。
负备用	—	在运机组下调容量、可紧急停机的在运水电与抽蓄机组及有足够库容储备的、可转入抽水状态的备用抽蓄机组容量。

2.2.1 预调度模型 在最小化经济成本的前提下构建机组的预调度模型,其目标函数为

$$\min f(P_i) = \sum_{i=1}^W (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \tag{3}$$

式中: $f(P_i)$ 为系统运行经济性指标; W 为电网等值后机组的数量; a_i, b_i, c_i 为机组 i 的成本系数; P_i 为机组 i 的有功出力。

预调度模型中所满足的约束条件如下:

(1) 全网功率平衡约束。

$$\sum_i P_i = P_D - P_N \tag{4}$$

式中: P_D 为负荷功率; P_N 为新能源发电预测功率。

(2) 备用约束。

$$R_i = u P_D \frac{P_{i, \max}}{\sum_j P_{j, \max}} \tag{5}$$

式中: R_i 为机组 i 的旋转备用留取容量; u 为旋转备用占预测负荷的比例; $P_{i, \max}$ 为机组 i 出力的上限。

(3) 机组的最大、最小出力约束。

$$\left. \begin{aligned} P_{i, \min} &\leq P_i \\ P_i + R_i &\leq P_{i, \max} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: $P_{i, \min}$ 为机组 i 的出力下限。

(4) 关键线路传输容量约束。

$$-P_{l, k, \max} \leq P_{l, k} \leq P_{l, k, \max} \tag{7}$$

式中: $P_{l, k}$ 为节点 l 到节点 k 之间线路上传输的有功功率; $P_{l, k, \max}$ 为节点 l 到节点 k 之间的线路传输功率的上限。

2.2.2 再调度模型 在预调度所得机组出力结果

的基础上,令净负荷预测误差 ϵ_1 服从正态分布,在满足重点线路约束、机组出力约束、以及机组爬坡约束的基础上,更新全网功率平衡约束为

$$\sum_i P_{i, 1} = (P_D - P_N)(1 + \epsilon_1) \tag{8}$$

同时,更新机组出力上限为机组预调度出力与机组备用预留量之和。利用蒙特卡洛模拟方法,对 N 个负荷样本进行再调度计算,未能获得可行解的样本数为 N_1 , 则定义安全性指标为

$$\xi = \frac{N_1}{N} \tag{9}$$

对本文所用的备用需求计算模型做如下说明:

- ① 该模型仅适用于典型运行场景下单个时间断面的备用需求计算;
- ② 在应用于实际华东电网计算时可对区域内的发电机组进行等值,以降低计算规模;
- ③ 关键线路选取为华东电网区域内容易发生潮流越限的线路;
- ④ 发电机的成本系数可根据相同容量机组的经验参数进行设置。

通过上述模型分别计算给定旋转备用占比 u 下的经济性和安全性指标,将所得经济性指标和安全性指标进行归一化处理,最后结合插值法和 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)方法^[19]选取折中解,折中解所对应的占比即为所求。本文利用华东电网 2019 年冬高场景下的数据进行了测算,根据《电力系统技术导则》规定的占比 u 由 2% 至 5% 递增,利用 TOPSIS 选取折中解所对应的旋转备用占比约为 2.53%。上

述结果与目前建议的旋转备用容量占全网预测最高负荷的比例(2.5%)较为接近,一定程度上说明了建议比例的合理性.随着计算场景和数据的丰富,在实际规则制定和研究中还可以对建议比例进行适当调整.

2.3 建议体系与现行备用体系的对比

目前,华东电网对备用容量的预留和分配遵循2014年实行的《华东电网运行备用调度管理规定(试行)》.考虑华东电网所面临的新形势,本文所建议的运行备用体系在运行备用类型及响应时间、备用来源、最小备用配置原则等方面进行了改进,主要对比如表3所示.

表 3 运行备用体系对比

Tab. 3 Comparison of operating reserve systems

区别项	2014 年管理规定	建议改进体系
正备用类型	旋转备用、30 min 备用	10 min 备用(含旋转备用)、30 min 备用
备用来源	旋转备用:已运行机组剩余发电量	见表 2
最小备用配置原则	旋转备用:不小于最大单机容量和最大直流双极送电功率之和,且不小于全网预测最高负荷的 2%	见 2.2 节

相比于现行备用体系,本文所建议的备用体系在应对新型电力系统发展下华东电网的有功调节需求上更有优势,具体体现为以下 3 点:

(1) 备用类型划分更为细致,有功调节场景更为明确.结合目前华东现行体系和国外典型电网运行经验,所建议的运行备用体系从响应时间尺度出发,对备用类型进行了划分,更加明确了具有不同响应能力的备用资源的调用场景,从而形成应对不同时间尺度下有功调节需求的分层解决方案.

(2) 最小备用的留取更加适应华东电网运行现状.新能源占比不断增加使得全网的净负荷波动性增强,为提高系统的调节能力,建议体系中的最小备用容量配置适当增加了为应对负荷波动而留取的比例(由 2%提高到 2.5%).

(3) 为华东地区电力辅助服务市场的建设奠定了基础.华东电网及各省(市)运行备用类型及相应容量的确定是区域内备用辅助服务市场开展的前提条件,所建议的运行备用体系从目前华东区域内电力市场化改革的开展情况出发,具有坚实的实践基础和广阔的应用前景.

3 华东电网备用需求测算与分析

基于本文提出的华东电网运行备用建议体系,本节重点测算分析了华东电网 2020 年夏季高峰期的备用需求,并与美国 PJM 电网和英国国家电网进行了对比.进一步,基于华东电网历史数据,验证了建议体系中所留取的正备用容量的合理性.

3.1 典型电网备用容量测算及对比分析

(1) 美国 PJM 电网.

以美国 PJM 电网的负荷规模为 1.65×10^8 kW (近 5 年来的负荷峰值)计算,2019 年 1~12 月美国 PJM 电网日前运行备用需求(10 min 备用与 30 min 备用之和)占日预测最大负荷的比例如图 2 所示.其中: δ_1 为美国 PJM 电网日前运行备用需求占日预测最大负荷的比例; T 为日期.由图 2 可知,其平均值为 5.08%,最大值为 6.08%,最小值为 3.55%.

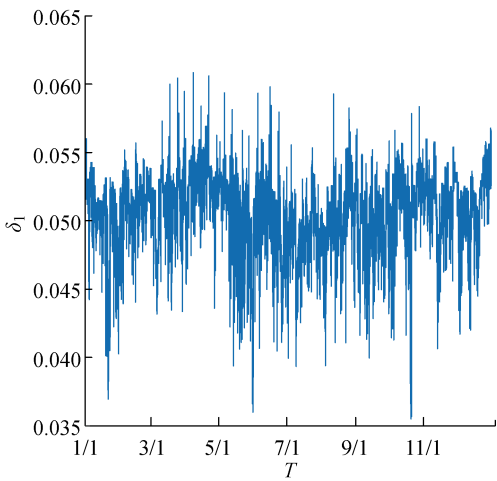


图 2 美国 PJM 电网备用需求相对预测最大负荷的比例

Fig. 2 Proportion of operating reserve requirement to maximum predicted load for PJM grid of America

(2) 英国国家电网.

以英国国家电网的负荷规模为 5.2×10^7 kW (近 5 年来负荷峰值)计算,从 2019 年 2~11 月,英国国家电网的日前运行备用需求占预测最大负荷的比例如图 3 所示,其中: δ_2 为英国国家电网的日前运行备用需求占预测最大负荷的比例.由图 3 可知,英国日前备用需求占预测最大负荷的比例在 11%~22%之间波动.

(3) 华东电网.

含四省一市的华东电网作为统一的频率控制区,其 10 min 备用(含旋转备用)是全网留取、分省

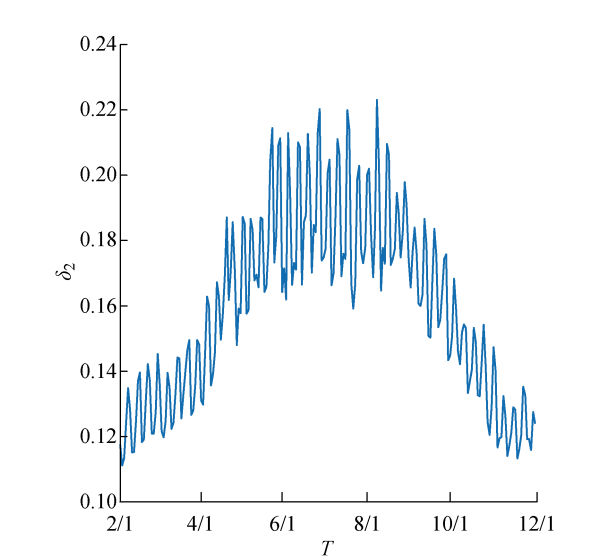


图 3 英国国家电网备用需求相对预测最大负荷的比例
Fig. 3 Proportion of operating reserve requirement to predicted maximum load for National Grid of Britain

配置的,其 30 min 备用是分省留取、全网加和的,其中,包含了华东直属机组备用容量的分配,相关分配系数可参考《华东电网运行备用调度管理规定(试行)》。因此,从全网层面,华东电网需保证系统整体的有功调节能力,侧重于 10 min 备用的全网留取;各省(市)在满足最小配置原则下,自行留取 30 min 备用。华东电网 2020 年夏季高峰预测最大负荷为 $3.199\,6\times10^8\text{ kW}$,根据本文中所建议的运行备用体系测算 2020 年华东电网 10 min 备用需求并分配到四省一市,所得结果如表 4 所示。由计算结果可知,华东电网 2020 年夏季负荷高峰期的旋转备用需求占预测最大负荷的 2.5%,10 min 备用需求为预测

表 4 华东电网 2020 年夏季负荷高峰备用需求测算
Tab. 4 Reserve requirement of East China power grid in 2020 summer load peak period

华东四省 一市及其 直属机组	旋转备用/ kW	10 min 备用/ kW	30 min 备用/ kW
华东直属机组	6.330×10^5	1.253×10^6	1.089×10^6
上海	8.440×10^5	1.670×10^6	1.000×10^6
江苏	2.292×10^6	4.538×10^6	1.126×10^6
浙江	1.785×10^6	3.534×10^6	1.250×10^6
安徽	1.285×10^6	2.545×10^6	1.350×10^6
福建	1.160×10^6	2.298×10^6	1.089×10^6
华东电网	7.999×10^6	$1.583\,8\times10^7$	6.904×10^6

最大负荷的 4.96%,30 min 备用需求为预测最大负荷的 2.16%。

综合上述结果和表 1 中的电网运行特性可知,相较于美国 PJM 电网,华东电网直流输电线路馈入占比高且其新能源发电占比较大,因此,华东电网的备用需求占比(7.12%,10 min 与 30 min 备用之和)略高于美国 PJM 电网备用需求占比的平均水平(5.08%);相比于英国国家电网,华东电网内新能源发电占比略低,因此华东电网备用需求相对预测最大负荷的占比也低于英国国家电网(11%~22%),可见新能源波动的影响比较显著。

3.2 基于历史数据的华东电网正备用容量合理性验证

基于华东电网 2019 年负荷预测数据和实际运行数据,统计分析不同时段负荷预测偏差的概率分布特性,并分析本文建议体系中正备用容量配置的合理性。由于建议体系中负备用容量配置与现行体系一致,所以本文不做进一步讨论。

3.2.1 测算说明 对本部分的测算分析进行几点说明,分列如下。

(1) 测算指标:以负荷预测偏差和负荷预测偏差占该日预测最大负荷的比例作为测算指标,用以反映负荷的波动情况,所述指标计算如下。

负荷预测偏差 = 实际负荷 - 预测负荷

负荷预测偏差占预测最大负荷比例 = (实际负荷 - 预测负荷) / 该日预测最大负荷

(2) 置信水平:考虑负荷偏差的波动性及其概率分布特征,为避免负荷偏差极端值导致计算结果偏于保守的问题,本节采用了一定的置信度水平作为测算评估标准,尽可能覆盖大部分偏差情况,以降低极端值带来的影响。

(3) 偏差定义:当实际负荷大于预测负荷时为向上预测偏差,电网提供正备用予以应对;当实际负荷小于预测负荷时,产生向下预测偏差,需要电网提供负备用予以平衡。本测算中仅给出了考虑向上预测偏差的结果,以验证正备用配置的合理性。

(4) 测算日期:考虑工作日和非工作日负荷水平不同,除了对全年 365 d 进行偏差分析,还需要对正备用较为紧张的工作日负荷偏差进行分析。经统计,2019 年工作日 250 d,非工作日 115 d。

(5) 测算时段:考虑一天内不同时段负荷水平,除了针对全年日 96 时段数据进行统计外,本文还侧重选取了负荷高峰时段用以分析负荷预测的向上偏差。其中,高峰时段包括:早峰 9:00—10:45,午峰 13:00—16:00 和晚峰 19:00—21:45。

3.2.2 测算结果 计算 2019 年负荷预测偏差如表 5 所示,其中:基于现有运行备用体系计算 2019 年华东电网 10 min 可用备用容量为 9.09×10^6 kW;根据本文建议体系中的最小备用配置原则,计算 2019 年华东电网 10 min 备用容量为 1.539×10^7 kW,为 5.10%预测最大负荷。

由表 5 可知,现行备用体系计算的备用容量 (9.09×10^6 kW)可基本覆盖 90%置信度水平下工作日的全部高峰时段和 85%置信度水平下的所有日期全部高峰时段的负荷预测向上偏差.若进一步考虑分布式新能源发电波动性的影响,则上述置信度水平在高峰时段偏低,高峰时段不能满足备用需求的概率增加,不利于华东电网的安全运行.基于本

文所建议的备用体系计算所得备用容量 (1.539×10^7 kW)可基本覆盖 95%置信度水平的高峰时段负荷预测向上偏差,华东电网有功调节能力整体得到提升。

进一步,图 4 给出了全年日 96 时段下负荷预测偏差占该日预测最大负荷比例的累积概率分布函数(CDF),其中: δ_3 为负荷预测偏差占该日预测最大负荷的比例; Q_{CDF} 为累积概率.基于本文所提的运行备用体系计算所得备用容量占最大预测负荷的比例(5.10%)可达到 95.7%的累积概率覆盖程度,从概率分析的角度出发,所留取的备用容量在一定程度上已能够较好地满足华东电网因负荷波动而产生的正备用需求。

表 5 负荷预测向上偏差(kW)
Tab. 5 Upward deviation of load forecast (kW)

日期	时段	80%置信度	85%置信度	90%置信度	95%置信度	99%置信度	最大值
所有日期	96 时段	4.8125×10^6	5.8661×10^6	7.8635×10^6	1.21964×10^7	2.33779×10^7	4.01139×10^7
	早峰	5.9607×10^6	7.7656×10^6	1.02507×10^7	1.65159×10^7	2.91794×10^7	3.28416×10^7
	午峰	7.2715×10^6	9.7699×10^6	1.30242×10^7	1.67823×10^7	3.46783×10^7	4.01139×10^7
	晚峰	5.4412×10^6	6.7313×10^6	9.0171×10^6	1.16404×10^7	2.64579×10^7	3.25310×10^7
	全部高峰	6.0345×10^6	8.0475×10^6	1.06782×10^7	1.55732×10^7	2.91794×10^7	4.01139×10^7
工作日	早峰	4.6653×10^6	5.4070×10^6	8.7662×10^6	1.35283×10^7	1.98473×10^7	3.17492×10^7
	午峰	4.9790×10^6	6.4575×10^6	1.19200×10^7	1.60555×10^7	2.00904×10^7	3.57108×10^7
	晚峰	4.8018×10^6	5.5800×10^6	6.7313×10^6	1.03573×10^7	1.77144×10^7	3.25310×10^7
	全部高峰	4.8617×10^6	574.10×10^6	8.7224×10^6	1.36674×10^7	1.97899×10^7	3.57108×10^7

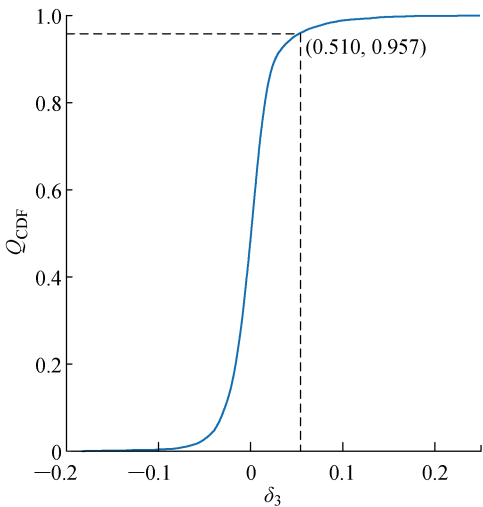


图 4 负荷预测偏差占预测最大负荷比例的累积概率分布
Fig. 4 CDF of proportion of load forecasting deviation to maximum predicted load

4 结语

本文从受端特性、新能源发展、净负荷波动、以及电力市场化改革需求等方面分析了新型电力系统发展下华东电网运行备用体系构建的必要性,提出了新形势下华东电网的运行备用建议体系,对备用的分类、响应时间和最小备用配置原则进行了重新梳理并给出修订建议.通过对华东电网实际运行数据的测算分析,验证了本文所建议的运行备用体系的有效性.随着华东区域内电力现货市场的不断推进,本文所提出的运行备用建议体系将为华东电网备用辅助服务市场的开展提供参考。

参考文献:

[1] 杨迎, 黄海煜, 夏少连, 等. 大电网一体化趋势下动态运行备用管理方法[J]. 电气自动化, 2020, 42(1): 102-104.
YANG Ying, HUANG Haiyu, XIA Shaolian, et al.

- Dynamic operation reserve management method in the integration trend of large power grids[J]. **Electrical Automation**, 2020, 42(1): 102-104.
- [2] DING Y, CUI W Q, ZHANG S J, *et al.* Multi-state operating reserve model of aggregate thermostatically-controlled-loads for power system short-term reliability evaluation[J]. **Applied Energy**, 2019, 241: 46-58.
- [3] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(13): 101-107.
- WU Ju'ai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, *et al.* Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(13): 101-107.
- [4] 郑秀波, 夏春, 林勇, 等. 中国电网运行事故备用标准建议[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(1): 151-159.
- ZHENG Xiubo, XIA Chun, LIN Yong, *et al.* Suggestion on operation contingency reserve standards for power grid of China[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(1): 151-159.
- [5] 刘建涛, 朱炳铨, 马经纬, 等. 计及可靠性的日前旋转备用容量评估指标[J]. **电网技术**, 2019, 43(6): 2147-2154.
- LIU Jiantao, ZHU Bingquan, MA Jingwei, *et al.* Study on evaluation indexes of spinning reserve capacity considering reliability in day-ahead schedule[J]. **Power System Technology**, 2019, 43(6): 2147-2154.
- [6] 周霞, 李威, 唐静, 等. 基于风险量化的事故备用容量协调分配方法[J]. **电网技术**, 2015, 39(7): 1927-1932.
- ZHOU Xia, LI Wei, TANG Jing, *et al.* Risk quantification based coordinative allocation of emergency reserve[J]. **Power System Technology**, 2015, 39(7): 1927-1932.
- [7] 裴哲义, 郭国梁, 胡超凡. 富余可再生能源跨区电力现货交易的探索与实践[J]. **中国电力**, 2018, 51(1): 16-21.
- PEI Zheyi, GUO Guoliang, HU Chaofan. Exploration and practice of transregional electricity spot trading of surplus renewable energy[J]. **Electric Power**, 2018, 51(1): 16-21.
- [8] 胡佳怡, 李亦言, 周云, 等. 考虑新能源出力特性的华东电网新能源消纳承载能力分析[J]. **水电能源科学**, 2018, 36(11): 212-216.
- HU Jiayi, LI Yiyang, ZHOU Yun, *et al.* Analysis of East China power grid's ability of admitting new energy resources considering output characteristics of new energy[J]. **Water Resources and Power**, 2018, 36(11): 212-216.
- [9] 李恒, 孙伟卿, 向红伟, 等. 影响区域电网可再生能源消纳能力的边界条件分析[J]. **太阳能学报**, 2020, 41(8): 108-114.
- LI Heng, SUN Weiqing, XIANG Hongwei, *et al.* Analysis on boundary conditions affecting consumption ability of renewable energy in regional power grid[J]. **Acta Energetica Sinica**, 2020, 41(8): 108-114.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 电力系统技术导则. GB/T 38969-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Guide on technology for power system. GB/T 38969-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [11] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议[J]. **中国电机工程学报**, 2020, 40(10): 3172-3187.
- SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, *et al.* Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(10): 3172-3187.
- [12] 胡朝阳, 毕晓亮, 王珂, 等. 促进负备用跨省调剂的华东电力调峰辅助服务市场设计[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(5): 175-182.
- HU Zhaoyang, BI Xiaoliang, WANG Ke, *et al.* Design of peak regulation auxiliary service market for East China power grid to promote inter-provincial sharing of negative reserve[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(5): 175-182.
- [13] 胡朝阳, 冯冬涵, 滕晓晔, 等. 关于浙江电力现货市场若干关键问题的思考[J]. **中国电力**, 2020, 53(9): 55-59.
- HU Zhaoyang, FENG Donghan, TENG Xiaobi, *et al.* Key issues of Zhejiang electricity spot market[J]. **Electric Power**, 2020, 53(9): 55-59.
- [14] 韩彬, 燕京华, 孙振, 等. 福建电力现货市场初期模式探析[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(7): 170-175.
- HAN Bin, YAN Jinghua, SUN Zhen, *et al.* Analysis on initial mode of electricity spot market in Fujian of China[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(7): 170-175.
- [15] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场

产品研究及对中国的启示[J]. **电网技术**, 2018, 42(9): 2915-2922.

HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, *et al.* Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. **Power System Technology**, 2018, 42(9): 2915-2922.

[16] 张子泳. PJM 备用体系及其对广东电力市场的启示[J]. **云南电力技术**, 2019, 47(1): 47-50.

ZHANG Ziyong. System of power reserve in PJM and its inspiration to Guangdong power market[J]. **Yunnan Electric Power**, 2019, 47(1): 47-50.

[17] 朱继忠, 叶秋子, 邹金, 等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(17): 1-8.

ZHU Jizhong, YE Qiuzi, ZOU Jin, *et al.* Short-term operation service mechanism of ancillary service in the UK electricity market and its enlightenment[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(17): 1-8.

[18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 电力系统安全稳定导则. GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China; Code on security and stability for power system. GB 38755—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[19] AHMADI A, MOGHIMI H, NEZHAD A E, *et al.* Multi-objective economic emission dispatch considering combined heat and power by normal boundary intersection method [J]. **Electric Power Systems Research**, 2015, 129: 32-43.

(本文编辑:石易文)