AGC 30模型的最优负载调度的输入数据分析与研究

李东旭，王　佳，赵　崇，赵　芳，金　田

（广东电网有限责任公司广州供电局，广东 广州 510620）

摘要：近年来，太阳能或风力发电等可再生能源得到了推广。然而，可再生能源输出不稳定，因为受天气等因素的影响，会导致系统频率的波动。因此，有必要分析电力系统可再生能源对供需平衡和频率波动的影响。在不使用发电机调度工具和经济负荷调度控制（EDC）模型的情况下，提出了一种对AGC 30模型的单元承诺（UC）和经济负荷调度控制（EDC）输入数据进行外推的方法。在AGC 30电力系统模型上进行了数值模拟，验证了所提方法的有效性。AGC 30模型的开发是为了详细分析系统频率。

关键词：自动发电控制；发电机调度工具；经济负荷调度控制

Input data analysis and research on optimal load scheduling of AGC 30 model

LI Dongxu, WANG Jia, ZHAO Chong, ZHAO Fang, JIN Tian

(Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: In recent years, the use of renewable energy sources such as solar or wind power has been promoted. However, renewable energy output is not stable as it is affected by factors such as weather and can cause fluctuations in the system frequency. Therefore, it is necessary to analyze the impact of renewable energy in power systems on supply and demand balance and frequency fluctuations. This paper presents a method for extrapolating the cell commitment (UC) and economic load scheduling control (EDC) input data of the AGC 30 model without using generator scheduling tools and economic load scheduling control (EDC) models. Numerical simulations are carried out on an AGC 30-machine power system model to verify the effectiveness of the proposed method. The AGC 30 model was developed for a detailed analysis of system frequencies.

Key words: AGC; generator scheduling tool; economic load scheduling control

0　引言

在电力系统中，电力供需平衡是以系统频率作为参考值，通过调节发电机的输出，维持负荷需求的波动。负荷需求波动一般由长期波动、中期波动和短期波动三个分量组成，分别称为持续分量、边缘分量和循环分量。持续分量由经济负荷调度控制（EDC）调节，边缘分量由负荷频率控制（LFC）调节，循环分量由无调速器运行和发电机自控特性调节[1]。在这些控制措施中，LFC有望应对快速增长的风力发电机和光伏发电功率输出波动，因此，近年来关于电力系统负荷频率的分析越来越有必要。为了应对电力系统供需和频率模拟日益增长的需求，日本电气工程研究所（IEEJ）于2016年开发了自动发电机控制

30模型（AGC 30模型)。AGC 30模型是IEEJ根据日本电力公司和研究人员的调查问卷创建的标准模型，例如由发电厂和负荷频率组成的供需和频率分析模型[2]。新的供需控制技术包括发电机机组（UC）和最优负荷分配在内的供需规划等已经进行了许多研究，但同时分析和评估供需平衡和频率波动是非常重要的[3]。通过对 AGC 30模型的不同改进和应用，有望开发和完善这种供需控制技术。AGC 30模型需要设置UC和EDC的初始输入数据，UC和EDC数据分别通过执行AGC 30模型自带的发电机调度工具和EDC模型获得[4]。AGC 30模型是在使用发电机调度工具和EDC模型的前提下设计的，因此，UC或EDC的输入数据不能外部设置。此外，该模型只能分析一个给定的有30台发电机的电力系统的系统频率。换句话说，AGC 30可以用来理解供需和频率控制的基本响应，但不能用来验证或评估与其他UC/EDC控制方法或任意电力系统的频率关系。因此，开发了一种外推输入数据的方法，而不是使用发电机调度工具[5]。本文提出了一种EDC信号和发电机UC信息的数据输入方法。此外，还扩展了AGC 30模型，以考虑除30台发电机以外的其他电力系统，并通过数值仿真验证了所提方法和扩展模型的有效性。

世界各地的学者已经开展了许多基于AGC的工具在电力系统中使用的研究。随着近年来可再生能源的快速整合，这些研究得到了加强。文献[6]提出了一种预测控制技术，以优化AGC的性能。然而，该方法没有考虑大型和多样化的电力系统。相比之下，本文提出的研究扩展了AGC 30模型，以考虑不同的电力系统。文献[7]讨论了在互联电力系统中采用哈里斯霍克优化算法（HHO）对AGC进行优化的问题。在该研究中，作者使用HHO来确定LFC中使用的PID控制器的增益。然而，该研究没有考虑各种能源资源和储存问题。相比之下，本文的研究提出了一种外源外推输入数据和优化ACG性能的方法，可以推广到更多样化的电力系统中。

近年来开展的相关研究大多是基于人工智能（AI）技术与自动发电控制（AGC）的结合。文献[8]使用人工智能技术、强化学习和基于遗传算法的控制器来调整 AGC 的参数。该研究进一步比较了传统的AGC与基于强化学习和遗传算法的控制器的性能。文献[9]提出了一种新的AGC性能评估机器学习技术。该研究中提出的方法在哥伦比亚系统算子上进行了验证。相比之下，本文提出的方法仅用数值模拟方法进行了验证。

1 IEEJ标准型号（AGC 30型号）

1.1 AGC 30型号

图1显示了 AGC 30模型，该模型是用来分析电力系统供电需求和系统频率的标准模型。它包括发电厂模型、计算频率控制信号的 LFC[10] 和 EDC 模型以及设计发电机动力学的惯性模型。频率控制信号的响应速度取决于燃料的类型或发电机的额定输出[11]。因此，供需和频率仿真必须采用各种火电机组的单独模型。AGC 30模型由27个热电厂模型和3个水电厂模型组成。

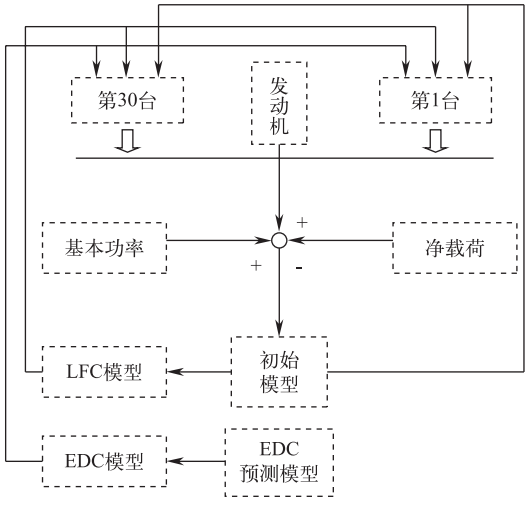


图 1 AGC 30 模型

Fig. 1 AGC 30 model

1.2 发电机调度工具

AGC 30模型的输入数据是由 MS- Excel 宏函数设计的发电机调度工具生成的。发电机调度工具由执行表、发电机设置表、负荷需求数据

表、光伏预测数据表、风力预测数据表、联络线潮流设置表、基本负荷电厂数据表和调度表组成。在执行表中设置了仿真的启动时间、运行备用容量和 LFC 调节容量。在发电机设置表[12]中，设置了发电机激活的优先级、控制方式、上下限输出和发电机的燃油成本函数。在负荷需求数据表中，光伏和风力发电预测数据表、联络线电力流量设置表和基本负荷电厂数据表分别用于设置预期负荷需求、光伏和风力发电输出、联络线电力流量、0～24 h内30 min间隔的核电和水电输出。按时间表模式运行的发电机的输出设置在发电机设置表中，从0～24 h每隔30 min设置一次[13]。通过读取上述时间序列数据，从执行表中设定的起始时间确定包括 UC 在内的3.5 h的生成器进度表。AGC 30型号的输入数据文件将基于 UC 自动生成，见表1。

表 1　发电机调度工具获取的 AGC 30 模型输入数据文件

Tab. 1 AGC 30 model input data file obtain-ed by generator scheduling tool

数据文件	概述
Load_Forecast	预测总负荷需求
PV_Forecast	预测的光伏总输出功率
WT_Forecast	预测 WT 功率输出
Tiline_Base	联络线潮流调度
Cost	发电机的增量燃料成本
G_Const_Out	基地电厂恒定输出
G_out	计划发电机输出
G_Mode	计划发电机模式
G_up_limit	发电机额定输出
G_down_limit	发电机最小输出
G_up_plan_limit	计划额定发电机输出
G_down_plan_limit	计划最小发电机输出
G_rate	发电机斜率
Inertia	惯性常数

1.3　EDC信号

AGC 30模型包括EDC预测模型和EDC模型，EDC信号（EDC _ Output）是调节发电机输出的控制信号。图2显示了计算EDC的预测模型，根据预测和实际负荷需求以及PV和WT功率输出得到预测发电机的总产量。T是一个时间常数（200 s），用于通过一阶滞后块消除短周期分量的影响。EDC模型通过考虑发电机的燃油成本增量，计算发电机在 EDC 运行模式下的 EDC 信号。根据图2可知，无须模拟AGC 30模型的所有组成部分即可计算出EDC预测结果。也就是说，只有利用EDC预测模型才能得到EDC预测。同样，EDC信号也只能通过EDC模型和EDC预测以及发电机参数来获得。

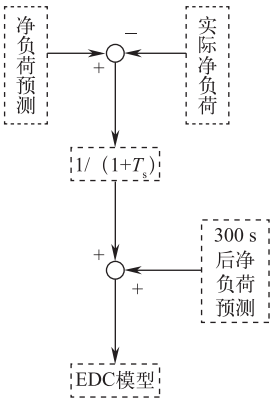


图 2　EDC 预测模型

Fig. 2 EDC prediction model

2　AGC 30模型的输入数据

在本节中，主要描述UC和EDC信号作为AGC 30模型的输入数据。本文利用独立程序对这些数据进行了外推计算，并对AGC 30模型的输入数据进行了外推，而负荷需求、可再生能源输出和发电机规格等数据需要根据电力系统模型进行分析。

2.1　机组组合（UC）

AGC 30模型火力发电机的日均功率密度决定了发电机在30 min间隔内的起动/停止时间，AGC 30模型火力发电机必须执行EDC/LFC。UC数据通常是由生成器调度工具生成的，但在本文中，UC数据是由外部创建的，并且不需要使用生成器调度工具进行输入。

2.2　火力发电机组控制模式（G_Mode）的确定

基于UC信息，在单位时间30 min的间隔内设置热力发电机控制模式（G _ Mode）的1 s值。本文假设发电机有两种运行模式：“模式=0”，停止或无控制运行；“模式= 3”，使用LFC和EDC运行。

2.3 EDC信号的确定

AGC 30模型发电机的EDC信号是每隔5 min向发电机分配负荷，AGC 30型号发电机必须根据确定的 EDC 信号输出。在AGC 30模型中，EDC信号一般由EDC模型产生，而本文的研究是在不使用EDC模型的情况下，对EDC信号进行外生产和输入。

在计算EDC信号之前，当发电机模式从0切换到3或从3切换到0时，模型会设置起动或停止期间的发电机输出。图3和图4显示了切换操作模式时起动/停止输出的概念图像。t'是从0到预定输出以及发生器输出的最大斜坡速率开始停止所需的时间。

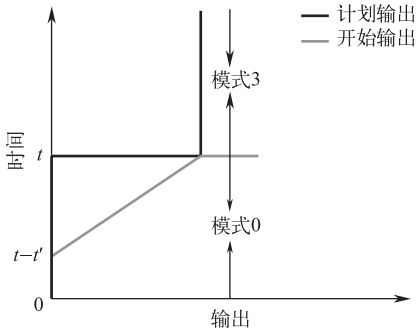


图 3 运行图像

Fig. 3 Image of run

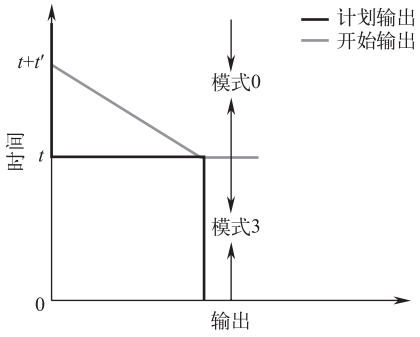


图 4 停止图像

Fig. 4 Image of stop

2.4 惯性常数（Inertia）的测定

总运行发电机的系统惯性常数M_{area}通过以下公式计算[14]

$$M_{\text{area}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(M_i G_{\text{MVA},i})}{1\ 000} \tag{1}$$

式中，M_{area}为系统惯性常数；$G_{\text{MVA},i}$为发电机i的额定容量；M_i为发电机i转换为系统容量基数（1 000 MV·A）的惯性常数。

2.5 输入数据外推

在不使用发电机调度工具的情况下，将得到的“G _ Mode”和“Inertia”分别外推到 MAT文件“g _ mode _ input”和“Inertia_ input”中，并作为AGC 30模型的输入数据。图5显示了改进后的AGC 30模型图。从AGC 30模型中删除EDC 预测模型和EDC模型，从工作空间块中取代“EDC _ Output”模型。此外，用前文提出的方法获得的EDC信号将被外推到MAT文件“EDC _ Output”中。

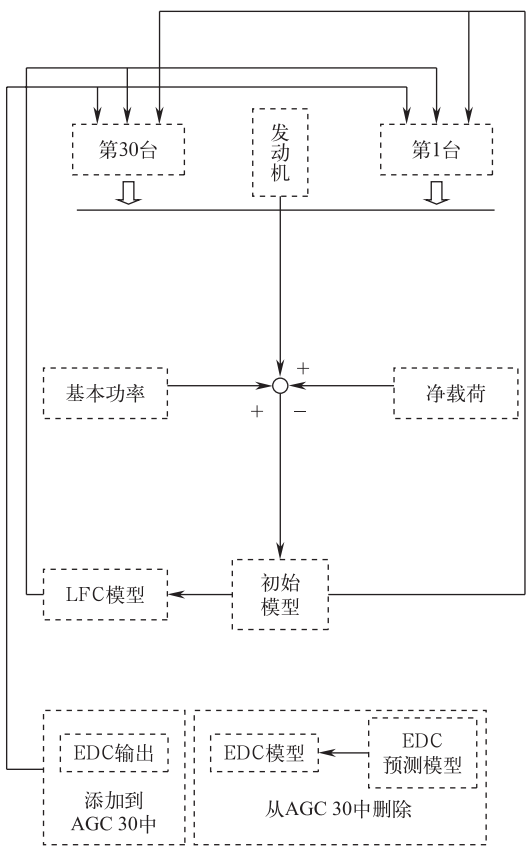


图 5 改进的 AGC 30 模型

Fig. 5 Improved AGC 30 Model

3 案例分析

3.1 模拟案例

上文给出了动力学的自动发电控制

（AGC）系统电网调度分析，在本节中，考虑了使用生成器调度工具和EDC模型创建数据的情况，以及在不使用它们的前提下创建数据的情况，所用的方法如下所述：

1）标准方法。在这种情况下，使用发电机调度工具和AGC 30模型附带的EDC模型分析频率。

2）外源输入数据的方法。在这种情况下，UC数据和EDC数据被外源输入到AGC 30模型。

3）机组组合（UC）。在本文中，使用目标函数最小化的动态规划，以30 min的间隔确定火力发电的每日机组组合。

$$f=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{T}\left\{u_{i,j}\cdot \mathrm{FC}_i(P_{i,j})\cdot\Delta T+u_{i,j}\ (1-u_{i,j-1})\cdot \mathrm{SC}_i\right\} \tag{2}$$

式中，N为火力发电机组的总数；T为调度的时段数；ΔT为单位时间(ΔT=0.5 h)；$u_{i,j}$为在时间j时热发电机i的激活（$u_{i,j}$=1时运行，$u_{i,j}$=0时停止）；$P'_{i,j}$为时间j时热发电机i的输出；FC_i（$P'_{i,j}$）为发电机组i的燃料成本函数；SC_i为热发电机i的起动成本。

根据额定输出下的燃料成本，发电机将按优序运行。制约因素包括电力供需平衡、输出上限和下限、LFC调节容量和运行备用容量。在电力供需平衡的约束条件下，将使用最初在发电机调度工具中设置的预测负荷需求。

经济负荷调度控制（EDC）：通过求解目标函数最小的二次规划，对模式3发电机的最优负荷进行分配，表达式为

$$f=\sum_{i=1}^{N}u_{i,j}\cdot \mathrm{FC}_i(P'_{i,j}) \tag{3}$$

式中，f为时间j时运行发电机的总燃料成本。

考虑了供需平衡和发电机输出上限和下限的约束，供需平衡的约束条件为

$$\sum_{i=1}^{N}P_{i,j}+P_{\mathrm{B}}=P_{\mathrm{D},j} \tag{4}$$

式中，$P_{i,j}$为第j时刻火电机组i的EDC信号；P_{B}为基本负荷发电厂的总输出；$P_{\mathrm{D},j}$为在第j时刻预测的EDC值；$P_{\mathrm{D},j}$通过之前单独执行EDC预测模型获得。

当发电机i的模式为0时，$P_{i,j}$恒定为0。当发电机i从0切换到3或从3切换到0时，起动或停止输出。当生成器i的模式为3时，$P_{i,j}$可表示为一个决策变量。

3.2 模拟条件

系统1（AGC 30模型的系统）：假设与AGC 30模式相同的负荷需求和电力系统条件，本文针对两种不同情况进行了仿真。在案例1中，使用发电机调度工具和EDC获取UC和EDC的输入数据；案例2则使用本文所介绍的方法。仿真的模拟周期延长至24 h，案例1使用原始AGC 30模型，而案例2中使用不带EDC预测模型的AGC模型。

系统2（其他系统）：考虑到除AGC 30模型外的负荷需求和电力系统条件，本文利用UC和EDC信号的外推输入数据进行频率分析仿真。仿真中采用了两种不同的电力系统模型。模型1和2分别代表不同地区的电力系统。通过修改AGC 30模型，按照表2和表3的电力系统配置，设计了频率分析模型。负荷需求数据参照2022年某日的实际数据，并将数据线性转换为瞬间变化值。

表2 案例1的电力配置

Tab. 2 Power configuration of case 1

（单位：MW）

配置	额定产量	最低下限	总容量
煤炭	1 000	300	2 000
	700	105	2 100
	200	40	800
酒精	250	63	5 000
	100	30	200
天然气	700	140	1 400
	200	80	1 000
油	700	175	2 800
	500	100	3 000
	250	50	3 750
总计			14 950

表 3　案例 2 的电力配置

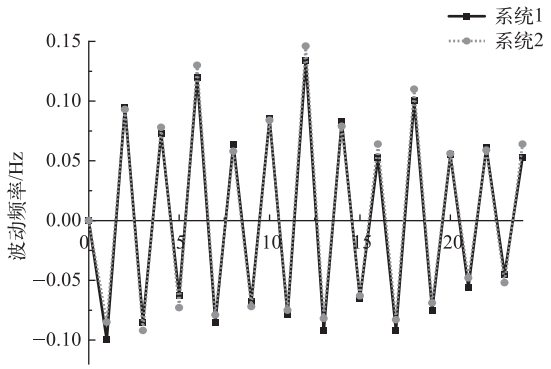
Tab. 3 Power configuration of case 2

（单位：MW）

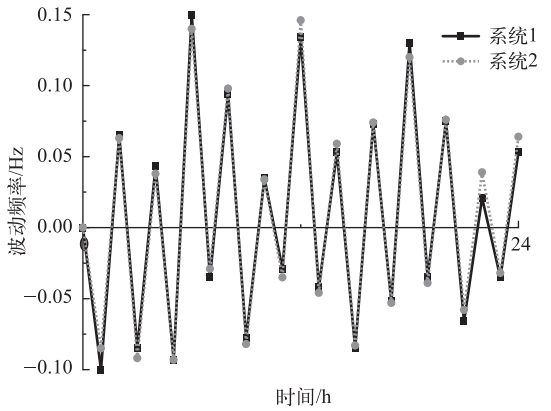
配置	额定产量	最低下限	总容量
煤炭	1 000	300	12 000
	700	105	2 800
酒精	250	63	18 500
	100	30	2 100
天然气	700	140	13 300
	200	80	2 600
油	700	175	2 800
	500	100	300
氢气	6 000	0	6 000
总计			64 300

3.3　模拟结果

不同系统预测波动情况如图6所示。



（a）案例1的系统预测波动情况



（b）案例2的系统预测波动情况

图 6　不同系统预测波动情况

Fig. 6 Different systems predict volatility

由图6可得，针对两个不同地区的电力系统模拟情况，两种预测系统均存在一定的系统频率偏差，并且可以观察到两者的波动幅度几乎相同，说明AGC 30模拟系统与复合系统的模拟偏差方面大致是相同的。

方案1和方案2的最大偏移频率差如图7所示。

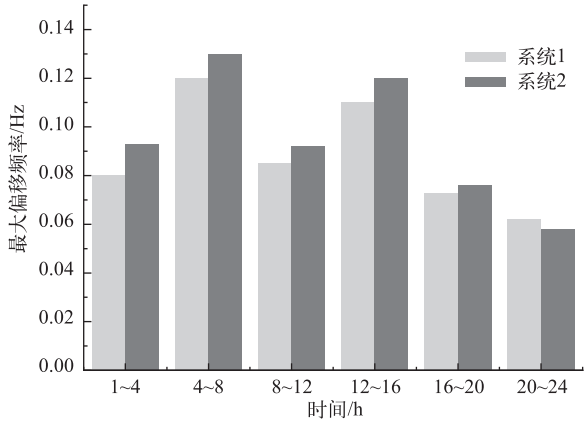


图 7　方案 1 和方案 2 的最大偏移频率差

Fig. 7 Maximum frequency deviation in case 1 and case 2

由图7可以看出，对于方案1和方案2，当负荷需求大时，频率波动小。这是因为在重负荷期间，可用于LFC抑制频率波动的运行发电机的数量很大。同时，可以观察到，二者的偏移频率相近，所以AGC 30模型也可以验证该系统预测的准确性与稳定性，但是整体上还是使用AGC 30模型效果更佳。

4　结束语

在本文中，提出了一种在没有发电机调度工具和EDC模型的情况下外推AGC 30模型的UC和EDC的输入数据的方法。

在ACG 30系统模型上进行了数值仿真，验证了所提方法的有效性。此外，将该方法应用于其他电力系统模型进行了验证。在未来的工作中，将分析含可再生能源和电池储能系统的电力系统的系统频率。

参考文献

[1]　焦晓佑．智能工程推理机制研究及其在电力供需

平衡复杂性分析中的应用[D]．北京：北京交通大学，2009．
[2] 黄强．电力供需综合资源的全过程协调管理[J]．华东电力，2004(5)：42-44．
[3] 谢学渊，刘潇潇，李超，等．智慧城市综合能源系统供需双侧负荷自动化控制技术[J]．自动化与仪器仪表，2021(10)：97-100．
[4] 李璐．电力市场环境下AGC的若干问题研究[D]．南京：东南大学，2016．
[5] 王成山，魏炜，徐德儒，等．考虑发电机调度的电力系统输电能力的计算[J]．电网技术，2001(9)：21-23，27．
[6] ERSDAL L I A M，UHLEN K，Model predictive load-frequency control[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(1)：777-785．
[7] SOBHY M A，EZZAT M，HASANIEN H M，et al．Harris hawks algorithm for automatic generation control of interconnected power systems[J]．2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)，Cairo，Egypt，2019：575-582．
[8] REKHASREE R L，JALEEL J A．A comparison of AGC of power systems using reinforcement learning and Genetic algorithm with a case study[J]．2014 International Conference on Circuits，PowerandComputingTechnologies[ICCPCT-2014]，Nagercoil，2014：34-38．
[9] Villa Sierra J F，Paez Mendez G F, Perez Arenas J.A．Angle controlled power plants for PMU based AGC．A new AGC thecnology，based on the äV and äQ controlled nodes concept and PMU triggered load shedding[J]．2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition，Chicago，IL，2014：1-1．
[10] 龚文涛，魏秀英，肖天航，等．一种基于LEC的网络故障风险评估与分析策略[J]．计算技术与自动化，2022，41(2)：147-152．
[11] 张刚，胡韬，张天骐．基于频率控制的自适应随机共振系统研究[J]．振动与冲击，2016，35(2)：91-96．
[12] 饶伯轩，朱慧．水电站发电机设置GCB有关问题的分析[J]．四川水力发电，2016，35(6)：130-131．
[13] 刘晓琴，李强，孙海军，等．基于分布参数模型的互联电力系统输电线路故障定位[J]．辽宁石油化工大学学报，2020，40(3)：91-98．
[14] 曾繁宏．电力系统惯性常数及惯性时空特性辨识方法研究[D]．广州：华南理工大学，2020．

作者简介

李东旭 （1985—），男，工程师，硕士，主要研究方向：调度自动化系统及数字电网技术。

王佳（1990—），女，工程师，主要研究方向：调度自动化。

（收稿日期：2022-09-12）