DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0176-05.

考虑新能源发电不确定性的新型输电网自动化规划模型设计

杨 耀

(国网河南省电力公司,河南 郑州 450056)

摘 要: 由于新能源发电具有较强的随机性和不确定性,影响输电网稳定运行和调节控制,为提高输电网自动化规划配置效果,设计基于考虑新能源发电不确定性的新型输电网自动化规划模型。首先设置目标函数与约束条件,读取电力系统原始数据,采用前推回代法计算配输电网潮流,输出各个节点的电压,建立多目标优化配置模型,利用启发式搜索算法对该模型求解,输出最优解。通过实例分析表明,所提设计能够较为准确地计算出电压幅值分布情况、支路有功损耗情况以及不同新能源接入数量下的变化情况,计算出接入新能源后的输电网运行费用,提高输电网自动化规划配置效果。

关键词: 新能源;输电网规划;优化配置模型;目标函数;约束条件

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0176-05

Design of a New Transmission Network Automation Planning Model Considering the Uncertainty of New Energy Generation

YANG Yao

(State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450056 China)

Abstract: Due to the strong randomness and uncertainty of new energy generation, which affects the stable operation and regulation control of the transmission network, a new transmission network automation planning model based on considering the uncertainty of new energy generation is designed to improve the effectiveness of transmission network automation planning and configuration. First, it sets the objective function and constraint conditions, reads the original data of the power system, calculates the power flow of the distribution network by using the forward backward method, outputs the voltage of each node, establishes a multi-objective optimal configuration model, uses the heuristic search algorithm to solve the model, and outputs the optimal solution. Through example analysis, it is shown that this method can accurately calculate the distribution of voltage amplitude, the active power loss of branches, and the changes under different new energy access quantities. It can also calculate the operating costs of the transmission network after connecting to new energy, and improve the effectiveness of transmission network automation planning and configuration.

Keywords: new energy; transmission network planning; optimal allocation model; objective function; constraint condition

0 引言

随着可再生能源比重的增加,输电网的供电和负载端的不确定性越来越大,首先新能源本身存在不确定性、空间分布不均等特点,如果接入输电网,会导致系统运行特性的复杂性,运行环境的不可预测性;然后如新能源接入情况主动负载逐年增多,多样化负荷快速发展,负荷的长期增长趋势可预测性降低;受自然条件的影响,新能源发电具有较强的随机性和不确定性, 其高比例并网必将增加输电网稳定运行和调节控制的难度。其次,由于线路维修、机组运行状况等实际操作条件直接关系到输电网的规划,因而对新型输电网络规划在灵活性、可靠性等方面提出了更高的要求。

Aluisio B 等研究了供电基础设施直流微输电网配置的规划和可靠性模型[1],其针对电力系统的电力系统基础设施直流微网各种变流器和拓扑结构,进行了详细的设计。这个过程是由可靠度分析来实现的,采用多态矩阵模型进行规则裁减,以及在不同的能量整合程度下,估算了没有被供给的期望能对整体费用的影响。有学者研究了考虑需求侧响应的新能源接入下的配输电网无功规划模型[2],该模型充分考虑新能源接入后的出力波动情况,并建立了需求侧相应模型,从而完成了规划;有学者研究了面向高比例新能源接入的配输电网电压时空分布感知模型[3],该模型建立分布式能源与气象数据之间的映射关系,构建数据驱动节点功率与电压映射条件,建立了配输电网潮流模型,实现输电网优化[4]。

新型输电网自动化规划的主要目的是根据对输电网的负荷发展趋势和供电计划的预测,以此来优化现有的输电网结构和建设能力,提高供电的可靠性,为此设计基

*基金项目:国网河南电力有限公司科技项目(LJKIYC02135200479)

收稿日期:2023-11-22

于考虑新能源发电不确定性的新型输电网自动化规划模型，设定目标函数及约束条件，构建多目标优化函数，采用前推回代法计算输电网潮流，采用启发式算法进行最佳运行参数求解，经实验验证，在接入分布式电源后，运行费用不是很高，说明所提出的模型能够较为合理地配置分布式电源，带来一定的经济效益。

1 基于考虑新能源发电不确定性的新型输电网自动化规划模型

1.1 目标函数及约束条件设定

在新能源接入输电网后，由于新能源发电的波动性较强，其输出功率具有一定的随机性和不确定性，会对输电网的供电可靠性产生影响。在新能源接入输电网后，需要保证供电可靠，无功功率的改变影响到有功网损、电压质量等。为了保证输电网的经济性和可靠性，需要对输电网进行无功优化。其中，有功网损最小是无功优化的常见目标之一，也是输电网重要经济指标之一，则以有功网损最小为约束条件，则无功优化模型表达式为：

$$\min P_{loss}=\min\sum_{k=1}^{n}G_{ij}(U_i^2+U_j^2-2U_iU_j\cos\theta_{ij}) \tag{1}$$

式中，P_{loss}表示有功网损，G_{ij}表示节点i,j之间的电导，U_i，U_j表示节点对应的电压，θ_{ij}表示节点i,j之间的电压相角，n表示支路数量。

该模型的目标是最小化有功网损，同时满足节点电压、无功功率和视在功率等约束条件。通过对该模型进行求解，可以得到合理的无功功率分配方案，从而保证输电网的经济性和可靠性。

电压质量的衡量指标较为常见的是电压偏差。当无功功率过低或过高时，电压幅值会超出限定范围，导致电力系统输电不稳。以电压偏差最小为约束条件，则无功优化模型表达式为：

$$\min\Delta U=\sum_{i=1}^{n}\frac{|U_i-U_N|}{U_{\max}-U_{\min}} \tag{2}$$

式中，△U表示电压偏差，U_N表示节点电压额定值，U_{min}，U_{max}表示节点限定电压上下限。

该模型的目标是最小化有功网损，同时满足节点电压、无功功率和视在功率等约束条件，并以电压偏差最小为约束条件。通过对该模型进行求解，可以得到合理的无功功率分配方案，从而保证输电网的经济性和可靠性，并且保证节点电压的稳定性。

在新能源大规模接入后，为了保证供电的可靠性和电网的安全运行[6]，需要进行输电网规划优化。由于风电输出功率具有较大的随机性和不确定性，因此在输电网规划中，需要考虑这些不确定因素，以最小的有功网损和最小的电压偏差为约束条件，构建多目标优化函数：

$$\begin{cases}\min f_1=P_{loss}=\sum_{i=1}^{n_p}I_i^2R_i\\ \min f_2=\Delta U=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left|U_i-\frac{U_{\max}+U_{\min}}{2}\right|}{U_{\max}-U_{\min}}\right)^2\end{cases} \tag{3}$$

式中，n_p表示负荷节点数量，I_i表示各支路电流，R_i表示各支路电阻。

该多目标优化函数的目标是最小化有功网损和电压偏差，同时满足节点电压、无功功率和视在功率等约束条件，并考虑风电的随机性和不确定性。通过对该多目标优化函数进行求解，可以得到合理的无功功率分配方案和风电出力预测方案，从而保证输电网的经济性和可靠性。

1.2 潮流计算

并网后会增加输电网中电源数量，供电模式从单源供电转换为多源供电模式，从而会对配输电网潮流产生影响，为保证输电网的稳定运行，需要进一步对潮流计算[7]。传统模型对于输电网节点的处理较为简单，不能直接计算含有新能源接入的输电网潮流。配输电网大多为辐射式结构，为此将牛拉法应用到配输电网潮流计算中，采用前推回代法计算输电网潮流，具体过程如下所示：

(1) 在电力系统中，为了进行输电网规划和运行，需要对电力系统中的原始数据进行处理和分析。读取电力系统中的原始数据，形成恒定的新能源节点抵抗矩阵和纯环网的回路阻抗矩阵[8]；新能源节点抵抗矩阵的作用是在输电网规划和运行中，对新能源节点的电气特性进行描述和分析，从而保证新能源节点的电气安全和稳定性。纯环网的回路阻抗矩阵的作用是在输电网规划和运行中，对环网的电气特性进行描述和分析，从而保证环网的电气安全和稳定性；

(2) 各种新型能源需要进行初始化处理，以确定电气特性和参数。初始化处理完成后，计算每一种新能源的注入电流，实现对输电网的供电。注入电流可通过仿真软件进行计算和模拟得到，也可通过实际测试和测量得到，计算公式如下：

$$\begin{Bmatrix}I_{ia}\\I_{ib}\\I_{ic}\end{Bmatrix}^{(k)}=\begin{Bmatrix}(S_{ia}/V_{ia}^{(k-1)*})\\(S_{ib}/V_{ib}^{(k-1)*})\\(S_{ic}/V_{ic}^{(k-1)*})\end{Bmatrix}-\begin{Bmatrix}Y_{ia}^{*}&&\\&Y_{ib}^{*}&\\&&Y_{ic}^{*}\end{Bmatrix}\cdot\begin{Bmatrix}V_{ia}\\V_{ib}\\V_{ic}\end{Bmatrix}^{(k-1)} \tag{4}$$

式中，I_{ia}，I_{ib}，I_{ic}表示节点i注入电流，S_{ia}，S_{ib}，S_{ic}表示节点i注入功率，V_{ia}，V_{ib}，V_{ic}表示电压相量，Y_{ia}^{*}，Y_{ib}^{*}，Y_{ic}^{*}，表示并联元件导纳；

(3) 在电力系统中，为了保证各节点的电气特性和稳定性，需要对各复合点的注入电流进行计算。通过计算，可以使各节点所加负载与所注入电流相等地叠加[9]，从而保证输电网的电气安全和稳定性。这些注入电流可以通

过仿真软件进行计算和模拟得到，也可通过实际测试和测量得到；

(4) 通过反向求出每个分支的电流，从馈线的末端计算出每个支路的电流，直到得到根节点，计算公式如下：

$$\begin{Bmatrix} I_{la} \\ I_{lb} \\ I_{lc} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{Bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{Bmatrix}^{(k)} + \sum_{m \in M} \begin{Bmatrix} I_{ma} \\ I_{mb} \\ I_{mc} \end{Bmatrix}^{(k)} \tag{5}$$

式中，I_{la}，I_{lb}，I_{lc}表示支路l的电流，M表示全部与节点r相连的下层支路集合；

(5) 根据一定的原理，将环路电流叠加到相应的分支上。若支路电流与回路的电流方向一致，则可直接相加，若支路电流与回路的电流方向相反，则将环电流设为负，再加上支路电流；

(6) 计算节点电压，从系统的源点开始向后推算，推算过程中不断修正各个节点的电压值[10]，直到完成馈线最末端的电压推算，计算公式如下：

$$\begin{Bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{Bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{Bmatrix}^{(k)} - \begin{Bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ba,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ca,l} & Z_{cb,l} & Z_{cc,l} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{la} \\ I_{lb} \\ I_{lc} \end{Bmatrix}^{(k)} \tag{6}$$

式中，s表示根节点，Z表示环路自阻抗；

(7) 计算注入无功，判断是否有越限情况，并对各结点进行迭代，确定各结点的电压幅度，确定初始电压的差值是否符合收敛性要求，如果不满足则返回步骤(3)。收敛判据计算公式如下：

$$\max \begin{Bmatrix} \left| V_{ia}^{(k)} - V_{ia}^{(k-1)} \right| \\ \left| V_{ib}^{(k)} - V_{ib}^{(k-1)} \right| \\ \left| V_{ic}^{(k)} - V_{ic}^{(k-1)} \right| \end{Bmatrix} < \delta \tag{7}$$

式中，δ表示收敛判定值；

(8) 更新开环点的电压差；

(9) 计算纯环状网络的回路电流，所有计算完成后停止计算，输出各个节点的电压。

1.3 采用启发式算法进行最佳运行参数求解

通过上述过程确定目标函数，并对输电网接入后的潮流进行计算，在此过程中，在考虑新能源发电不确定性的背景下，使用启发式算法可以有效地探索和优化输电网的最佳运行参数，启发式算法是一种基于经验和规则的搜索和优化方法，其灵活性和高效性适用于处理复杂的问题，对输电网规划[11]，满足电力输送的需求，主要内容为：

(1) 选择配电方式和配电电压。配电方式和配电电压的选择是输电网规划的基础。根据不同的电力输送需求和电力负荷特点，可以选择不同的配电方式和配电电压。常见配电方式有单回线制、双回线制、环网制等，而常见的配电电压有110 kV、220 kV、500 kV等。通过合理的配电方式和配电电压选择，可以实现输电网的经济性、可靠性和安全性；

(2) 确定合理的变电站布局以及规模。根据输电网的负荷特点、电力输送距离、电力质量要求等因素，可以确定合理的变电站布局和规模；

(3) 无功设备配置。无功设备包括电容器、电抗器等，通过合理的无功设备配置，有效地提高输电网的电气稳定性和运行效率。

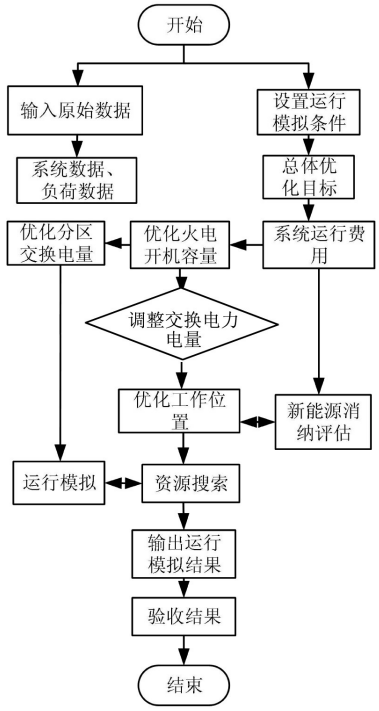


图1 最佳运行参数求解

采用启发式算法中的NSGA－Ⅱ算法[13]，通过NSGA－Ⅱ获得帕累托的最优解，然后通过模糊逼近度对其优化，NSGA－Ⅱ求解RDG多目标优化配置模型主要步骤如图1所示。具体步骤如下：

(1) 将所选择的新能源接入节点和新能源网络的最大接入站数目作为模型，利用二进制数字对节点进行编码，并在编码后生成初始群体，计算相应的时间序列场景的注入功率；

(2) 当个体在时间间隔内进行迭代时，必须满足一定的限制，并根据个体的具体情况来确定相应的目标函数。以比赛的形式选择优秀个体，交叉变异处理子代群体；

(3) 由以上步骤进行运算，得到各个体的时间间隔，判定是否符合限制条件，满足目标函数值时，停止计算，如不符合，再进行计算；

(4) 使用最优方法来产生下一代的父代群体。基于目标函数的数值对新群体中的每一个新群体排序，对每个未占优势的解集合进行拥挤距离排序，并依据具有较高的优势度和较大的拥挤距离来确定下一次迭代的父代群体；

(5) 如果没有,则返回到步骤(2),则输出新能源配置结果,也就是Pareto最佳解集。

2 实例结果与分析

采用典型的配网系统作为测试对象,配网系统现有1个充电站、4个变电站和17个负荷节点,其拓扑结构如图2所示。该系统最高负荷达到16.18 MVA,节点的电阻为0.169 Ω/km,电抗为0.418/km,配网系统的输出功率波动范围为0−100 MW,波动频率为10 s,基于100个历史数据采用NSGA−Ⅱ算法得到时间序列场景。设定典型场景数量K=8,置信度为98.89%。系统的总装机容量为1 200 MW。

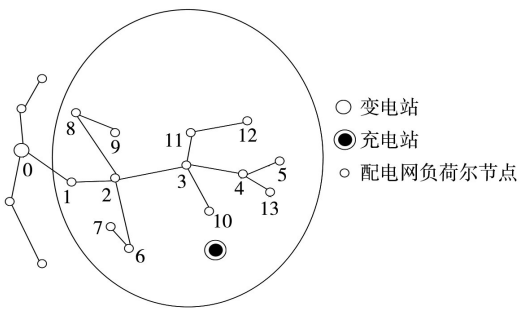


图2 某地配输电网拓扑结构图

采用MATLAB编写模型程序,调用CPLEX求解器进行求解。运行环境为Core i5−8250U 1.60 GHz,内存为8 GB。除此之外,还包含5个联络开关,采用所研究模型判断在新能源接入后的电压幅值,结果如表1所示。从表1可知,新能源接入后,所研究的模型能够有效控制电压变化,使得各个节点整体电压幅值处于0.82~0.99之间。

表2 新能源接入后电压幅值分布情况

节点编号	接入时间	节点电压幅值/p.u
1	2:00	0.99
2	2:10	0.98
3	2:20	0.95
4	2:30	0.98
5	2:40	0.96
6	2:50	0.98
7	3:00	0.95
8	3:10	0.93
9	3:20	0.92
10	3:30	0.89
11	3:40	0.88
12	3:50	0.95
13	4:00	0.92
14	4:10	0.88
15	4:20	0.82
16	4:30	0.89
17	4:40	0.88

接下来分析在新能源接入后支路损耗的情况,如图3所示。从图3可知,在新能源接入后,部分支路的有功损耗也得到了降低,说明该模型对输电网的电压质量以及网络损耗调节效果较好。

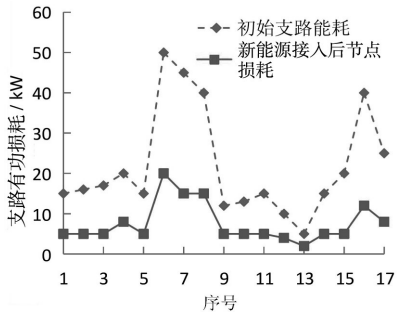


图3 节点有功损耗

新能源接入后,功率变化情况如图4所示。从图4的数据可知,在不同时间,功率有高低峰情况。

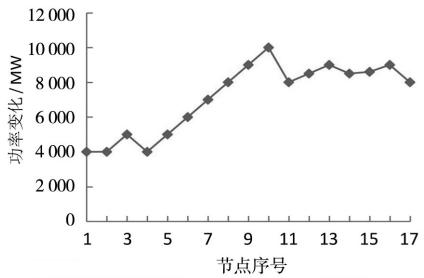


图4 功率变化情况

接下来分析不同新能源接入数量下最大充电功率与放电功率变化情况,结果如表2所示。

表2 不同新能源接入数量下变化

新能源接入数量	有无容量限制	最大充电功率/kW	最大放电功率/kW
4	有	178	115
4	有	20	135
5	无	175	124
6	无	145	123
7	无	148	148
8	有	175	136
9	有	125	148

各种运行方案也是衡量模型效果的重要指标之一,各项运行费用如图5所示。从图5可知,在接入分布式电源后,运行费用不是很高,说明所提出的模型能够较为合理地配置分布式电源,带来一定的经济效益。

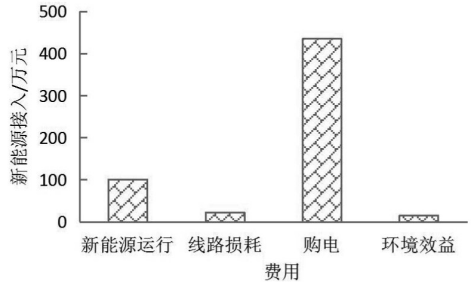


图5 输电网运行费用

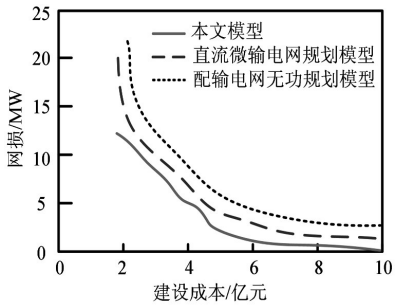
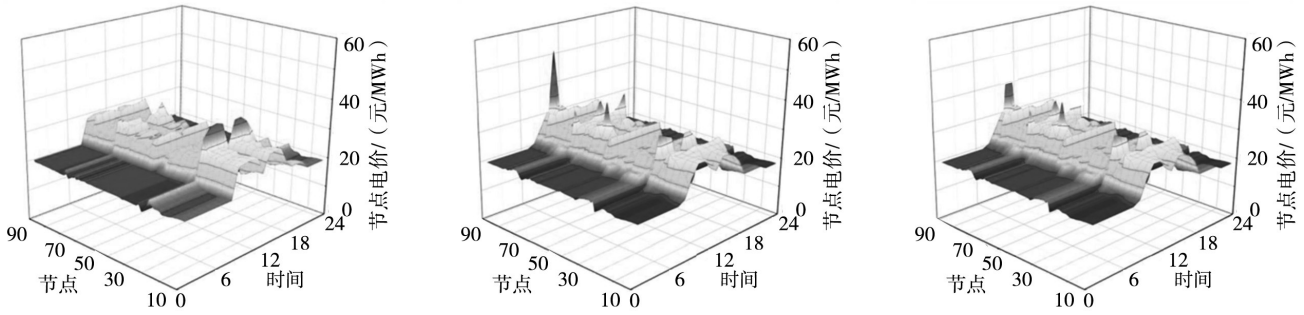


图6 同等建设成本下网损对比

为验证本文模型的优越性，与直流微输电网规划模型和配输电网无功规划模型进行对比测试，对同等投资建设成本下的网损进行对比实验，具体如图6所示。分析图6可知，在同等建设成本下，本文模型得到的网损都要优于其他两种模型。当建设成本在6−10亿元范围变动时，本文模型得到网损更具决策优势。这表明，本文模型得到的规划方案更适用于实际应用。

进一步对比不同规划模型下典型配网系统内部节点的边际节点价格，结果如图7所示。分析图7可知，三种不同规划模型下的系统节点电价均有不同程度的提升，但本文模型下的平均边际节点电价较直流维输电网规划模型、配输电网无功规划模型低约1.52元/MWh、0.52元/MWh。且随着负荷率的增加，系统阻塞现象明显，不同节点的节点电价出现波动，本文模型节点电价最高可达51.501元/MWh，直流维输电网规划模型、配输电网无功规划模型下的节点电价波动明显较低。



(a) 本文模型 (b) 直流维输电网规划模型 (c) 配输电网无功规划模型

图7 不同规划模型下典型配网系统节点电价

3 结束语

在新能源大规模接入后，传统的输电网规划方法难以满足需求。新能源发电存在随机性和间歇性，会对输电网负载产生影响，可能导致输电网过载或者不稳定。因此，设计一种新型的输电网自动化规划模型，该模型结合了传统的输电网规划方法和新能源发电的特点，能够更加准确地预测输电网的潮流分布情况，并且具有较高的安全性和灵活性。通过实验表明，所研究的模型能够改变输电网潮流分布情况，提高输电网的安全运行能力。

参考文献：

[1] Aluisio B,Dicorato M,Ferrini I,et al.Planning and reliability of dc microgrid configurations for electric vehicle supply infrastructure[J].International Journal of Electrical Power&Energy Systems,2021,131(5):107104.

[2] 王樊云，刘敏，李庆生，等.新型电力系统下电力用户的需求响应潜力评估[J].电测与仪表，2023，60(8)：105−113，132.

[3] 张天策，王剑晓，李庚银，等.面向高比例新能源接入的配输电网电压时空分布感知方法[J].电力系统自动化，2021，45(2)：37−45.

[4] Khalid,M.Discussion on short−term reactive power planning to minimize cost of energy losses considering pv systems[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2021,11(2):1812.

[5] 王世君，夏革非，陈广宇，等.一种考虑线损最优的配输电网新能源聚类规划方法[J].输电网与清洁能源，2021，37(2)：132−138.

[6] 李旸，唱友义，梁晓赫.新能源接入的配输电网效益最优重构方法研究[J].控制工程，2021，28(5)：931−937.

[7] 俞智鹏，叶荣，唐雨晨，等.含高渗透率海上风电输电网的DSSC优化配置与运行控制策略[J].可再生能源，2020，38(6)：837−845.

[8] 王献志，赵宇皓，周雪青，等.考虑新能源接入的配输电网继电保护研究[J].电子器件，2021，44(2)：339−345.

[9] 龚浩岳，周勤勇，郭强，等.高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用[J].输电网技术，2021，45(12)：4603−4611.

[10] 孙蓉，张诚之，陈兵，等.规模化新能源接入下受端输电网调峰方式综合评估研究[J].电力自动化设备，2021，41(6)：149−155.

[11] 王少林，韩鑫磊，王海磊.新能源场站储能系统的鲁棒优化配置策略[J].现代电力，2021，38(6)：636−644.

[12] 贺海磊，张彦涛，孙骁强，等.考虑频率安全约束的西北输电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J].中国电机工程学报，2021，41(14)：4753−4762.

[13] 李傲伟，柳璐，程浩忠，等.高比例可再生能源接入下考虑输配协同的新型输电网规划测试系统[J].电力系统自动化，2021，45(11)：19−27.

作者简介：杨耀(1982-)，男，硕士，高级工程师，研究方向：电力系统分析，运行与控制。