

[储能鲁棒优化]

面向高渗透率光伏并网的电力系统 储能鲁棒优化方法

文/傅春翔¹ 叶真¹ 汪志刚²

1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司；2. 中电建江苏勘测设计研究院有限公司

由于现有的电力系统储能鲁棒优化方法优化后最大偏差系数较高，均在0.5以上，出力结果与目标值相差较大。为此，研究面向高渗透率光伏并网的电力系统储能鲁棒优化方法。首先，对光伏阵列进行建模，通过发电机的转子运动方程进行计算，结合转速调整，得到模型的最优解。设置支路潮流约束，计算电力系统功率等效约束。通过计算风电功率均值出力水平下的系统功率平衡状态，将含随机变量的不等式约束组转化为鲁棒对等优化模型。将随机变量在确定性范围内变化的最低等场景导入模型中，确保最优解在整个随机变量确定性变化范围内的鲁棒性，从而完成优化。实验结果表明，在单目标方面，实验组能够更为贴近预测值，直观地展示储能配置的优化效果；在多目标方面，实验组得到电压波动改善值均在0.65~0.68之间，最大偏差系数为0.03，配置优化在规避风险方面的鲁棒性更强。

随着现代化社会的飞速发展，在电力系统中，负电力系统储能鲁棒优化方法对于保障电力系统的稳定运行具有重要意义。这样能够提高能源利用效率，促进可再生能源的广泛应用。通过储能系统的灵活充放电，可以有效平衡电力供需，缓解电网压力，提高系统运行效率。作为一种能够在不确定性环境下进行有效决策的优化技术，通过构建鲁棒优化模型，可以在考虑不确定性因素的同时，实现储能系统的最优调度和配置。不同的电力系统可能具有不同的结构，鲁棒优化方法作为一种通用的优化框架，根据具体的电力系统特点进行灵活调整和优化，以满足具体运行需求。不仅能够提高电力系统的鲁棒性，即抵御不确定性因素冲击的能力，还能在保证系统安全稳定运行的前提下，从而能够更好地实现经济效益的最大化。由于传统储能方法^[1]成本较高，导致在电力系统中的大规模应用受到限制。初始投资以及后续的维护成本提升，使得储能

技术在经济层面难以被广泛接受。传统储能方法^[2]在能量转换和储存过程中损失较大，这不仅影响了储能系统的整体性能，也限制其在电力系统中的实际应用效果。因此现阶段，以电力系统储能鲁棒优化方法为研究对象，面向高渗透率光伏并网，结合实际情况进行实验与分析。

电力系统储能鲁棒优化

1. 构建高渗透率下的光伏并网模型

首先对光伏阵列进行建模，针对电力系统灵活资源，分析其在不同时间下的调度能力。光伏阵列由光伏电池通过串联或并联的方式组合而成，将太阳能直接转化为电能，并输出为直流电。这些直流电经过光伏并网逆变器的转换，变成交流电，最后通过变压器被注入电网，从而构建一个光伏发电的系统^[3]。光伏并网模型中，光伏阵列满足的要求为

$$I = I_s [1 - v(\exp vt - 3)] \quad (1)$$

式中, I_s 为光伏电池电流; v_t 为端口电压; v 为光伏电池额定电压。

此处, 需要对光伏阵列的参数进行调整。在日照强度变化过程中, 获得光伏阵列中四个参数的关系。 I 、 I_s 、 v_t 、 v 这四个参数都是在日照强度为 $1\ 250\ \text{W/m}^2$ 的标准条件下进行获取。但是, 在实际应用中, 参数会因为环境条件的变化发生波动。因此, 需要对参数进行修正, 从而得到实际应用情况。通过建立光伏并网模型, 将日照强度分为两部分。通过拟合得到的初始日照强度 z 和日照影响 Δz 。在该模型中, 设置温度为固定值, 关注光伏电站在不同日照强度下的动态特性, 而暂时忽略温度变化的影响。光伏发电在接入电网过程中, 电网频率由发电机的转子转速决定, 所以, 通过大容量发电机来等效电网中的不同机组, 以此来获得光伏电站在不同日照强度下的动态特性^[4]。从旋转运动方程中能够获得发电机的转子运动方程为

$$\frac{dw}{dt} = \frac{w}{y}(p - p_t) \quad (2)$$

式中, w 为光伏额定角频率; p 为机械功率; p_t 为转动功率; y 为机组的惯性系数。

在高渗透率光伏发电接入的情况下, 需要灵活调节机组自身的出力。因此, 通过发电机的转子运动方程进行计算, 获得机组的转子转速, 结合转速调整, 对电力系统不同资源灵活调节, 得到模型的最优解 I_u 。模型的最优解 I_u 即为允许配置的储能节点的储能功率容量, 当 $I_u=0$ 时, 说明系统当前的风电接纳能力充足, 风电功率的波动较为稳定, 不需要配置储能装置^[5]。当 $I_u>0$ 或者 $I_u<0$ 时, 需要在相应的储能配置节点添加储能装置, 以此来提升系统对风电的接纳能力。

2. 储能配置并网模型鲁棒对等优化

在保证整个系统功率平衡条件下, 为了使得风电功率被接纳, 需要运用鲁棒对等优化的方式对光伏阵列中四个参数进行对称设定^[6]。在鲁棒性的控制下, 能够通过设定约束来使得最优解 I_u 更具鲁棒性。因此, 鲁棒转化过程中, 需要引入新的随机变量, 协调最优解的鲁棒程度, 保证最优解 I_u 在整个随机变量确定性变化范围内的鲁棒性。首先, 设置支路潮流约束, 使得支路潮流变化范围能够在线路传输容量允许范围内, 这样能够保证电力系统的稳

定性。因此, 将随机变量代入支路潮流约束中, 通过消除支路中不同节点相角变量, 得到不同节点注入功率^[7]。根据支路潮流的变化趋势, 计算电力系统功率等效约束, 其计算公式为

$$G = se + g(g + \Delta g) + w + y \quad (3)$$

式中, se 为输电线路中的线路潮流值; g 为可调机组的出力; Δg 为可调机组的平均出力。

通过计算可以获得电力系统的功率等效约束, 这样通过约束等式, 时刻校正支路传输能力^[8]。同时, 还需要计算不含随机变量的确定性系统功率等效约束, 从而能够在风电功率均值出力水平下的系统功率平衡状态。其计算公式为

$$\sum Gn = \sum g + \sum gn + \sum \mu wi \quad (4)$$

式中, n 为风电场单位内波动量的能力; μ 为风电场接入节点集合; i 为可调机组数量。

根据TOL理论, 风电波动功率 Δq 为储能系统中存在的主动性变量^[9]。在可调机组的运行过程中, 线路潮流等均受到该功率的影响, 所以, 将 Δq 描述为一个鲁棒区间集合, 则含随机变量的不等式约束组可以转化为鲁棒对等优化模型。其计算公式为

$$B(I') = \{\Delta q \mid \Delta q w_j \in [0, 1]\} \quad (5)$$

式中, Δq 为风电波动功率; I' 为鲁棒性指标在风电场中接入个数。

最终, 含多风电场的电力系统储能配置模型被整理为由确定性等式约束和鲁棒对等不等式约束组成的优化模型, 实现了随机变量的确定性优化^[10]。至此, 获得优化模型新增变量为 $2I(1+I_u)$ 。经过鲁棒线性优化后, 将随机变量在确定性范围内变化的最低等场景导入模型中, 确保最优解在整个随机变量确定性变化范围内的鲁棒性, 即 $I_u \in 2I(1+I_u)$ 时, 满足配置优化的求解问题, 消除模型转化过程中对风电功率分布的依赖性, 使得风电功率随机变量能够约束为出力均值, 直观反映出风电功率变化情况, 为储能配置提供更为具体的规划。

实验测试与分析

1. 搭建实验环境

针对IEEE-33节点配电系统, 使用本文方法进行储能配置优化的仿真分析。为验证多目标优化性, 需要根据电压波动指标进行目标仿真。首先, 确定风电及光伏位置, 风电的节点为12、13进行接

入，光伏节点在15、20进行接入。电力系统储能过程的相关参数设置见表1。

表1 相关参数

参数	数值
单位功率成本/元/kW	1 500
单位容量成本/元/kW·h	1 200
功率成本系数/元/kW	1 200
电量成本系数/元/kW·h	1 000
充电效率	0.98
放电效率	0.93
最大SOC限制	0.7
最小SOC限制	0.1
储能额定容量范围/kW·h	[1 000, 2 500]
储能额定功率范围/kW	[200, 1 500]
切入风速/(m/s)	3
额定风速/(m/s)	23
切出风速/(m/s)	24

考虑到风电和光伏的装机容量均为3.6 MW，同时系统允许安装的储能数量为3。由于电力负荷具有多种类型，特别选取具有代表性的负荷类型进行深入分析。将配电系统的节点进行划分，对各类数据进行分时段的详细统计分析，得到不同时段内的分布函数。为了使这些数据更适合后续的计算分析，对其进行归一化处理。设置三个小组，其中运用优化方法的小组为实验组，运用传统方法的两个小组为对照1~2组。下面对单目标和多目标进行仿真实验。

2. 结果与分析

以夏季为例，在置信水平为0.90的条件下，对风电、光伏在不同置信水平下的日出力图，具体如图1、图2所示。

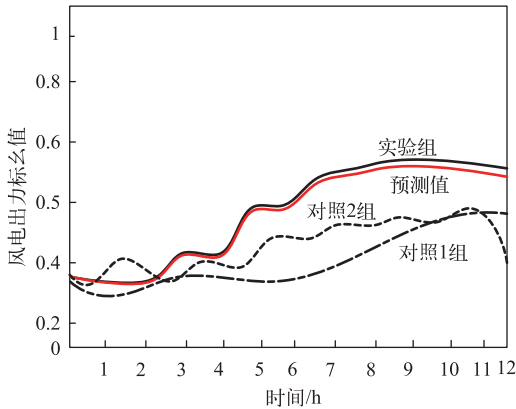


图1 风电日出力图

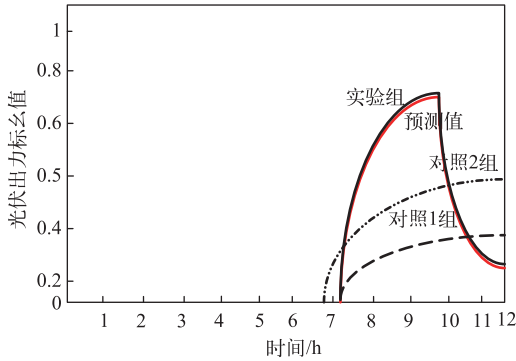


图2 光伏日出力图

图1中结果显示，在置信水平为0.90的条件下，在12 h时，风电出力达到0.5，光伏出力达到0.3。两个对照组的出力结果均与目标值相差较多。而实验组能够更为贴近预测值，说明运用本文优化方法在规避风险方面表现更为出色。为了更直观地展示储能配置的优化效果，选取第45时刻，加入储能前后节点的电压，根据得到的实验组结果来看，储能的配置有效缓解了风电、光伏并网后的电压波动。因此，能够将本文优化方法应用到不同的风光荷场景中，使得电压波动改善，提升了在应对风光荷不确定性方面的能力。

同时，针对本文所建模型进行多目标仿真。未来计算不同目标置信水平下的配置优化结果，设置分割比为1：1，最大迭代次数为1 000，变异概率为0.2。计算配电网系统储能多目标优化配置的优化模型，得到目标函数值，将其代入配置模型中得到在目标置信水平为0.90时，不同方法的电压波动改善值。具体见表2。

表2 电压波动改善值计算结果

方案	安装节点	电压波动改善值
实验组	12	0.65
	13	0.66
	15	0.68
	20	0.65
对照1组	12	0.41
	13	0.54
	15	0.75
	20	0.54
对照2组	12	0.54
	13	0.34
	15	0.87
	20	0.48

由表2中结果可知,实验组在多目标优化后得到电压波动改善值均在0.65~0.68之间,最大偏差系数为0.03。而两个对照组多目标优化得到的最大偏差系数均在0.5以上。经过对比发现实验组的配置优化在规避风险方面的鲁棒性更强。说明本文方法能够保证电压稳定性和经济性,更符合实际的需求。

通过本文方法能够使得电压波动改善值最优解的分布更为均匀,体现了该方法在优化问题上的优越性。

综上所述,本文方法通过采用不确定性集合来描述光伏的不确定性,并保证在不确定性集合内的任何波动下,都能找到可行的调度解决方案。这使得电力系统在面对光伏出力的不确定性时,能够保持较高的安全性和稳定性。在不确定性集合内的任意元素下,电压波动改善值最优解都保持约束可行性。适用于大规模电力系统的优化调度,提高电力系统的经济效益。

结束语

本文从电力系统储能鲁棒优化入手,并运用了光伏并网,探究面向高渗透率光伏并网的电力系统储能鲁棒优化方法。该方法在实际使用过程中能够使得储能系统在不确定性日益增加的电力系统中,保持其优化性能的稳定性,从而有效应对多种不确定性因素。但是该方法中还存在着不足,例如电力系统的稳定性问题、出力波动问题和负荷变化问题等。

在今后的研究中,电力系统将能够更好地适应高渗透率光伏并网的发展趋势,实现清洁能源的高效利用和电力系统的优化运行。这不仅有助于推动能源结构的转型升级,实现绿色低碳发展,更将为实现全球可持续发展目标提供助力。EA

(收稿日期: 2024-04-30)

参考文献

[1] 李鹏,王加浩,徐贤,等.面向新型电力系统潮流频繁波动的无功鲁棒分区方法[J].电力系统自动化,2022,46(11):102-110.

[2] 黄梦旗,李勇汇,曾海燕,等.计及高渗透率分布式电源的韧性配电网数据驱动鲁棒规划方法[J].电力建设,2023,44(6):79-90.

[3] 童宇轩,胡俊杰,刘雪涛,等.新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(15):80-90.

[4] 艾永乐,张鑫,李星,等.高渗透率光伏混合发电系统的频率控制方法研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(3):269-274.

[5] 杨明,赵月圆,杨杰,等.高渗透率下一种提高LCL滤波并网逆变器鲁棒性的新型锁相环设计方案[J].中国电机工程学报,2023,43(10):3938-3949.

[6] 顾雪平,白岩松,李少岩,等.考虑风电不确定性的电力系统恢复全过程两阶段鲁棒优化方法[J].电工技术学报,2022,37(21):5462-5477.

[7] 张智,周明,朱凌志,等.风电场协同参与的电力系统发电-备用鲁棒优化运行方法[J].电网技术,2022,46(4):1316-1325.

[8] 叶琳浩,申展,许峰,等.考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J].南方电网技术,2023,17(4):132-143.

[9] 赵毅,王维庆,闫斯哲.考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):127-136.

[10] 茹秋实,米雪峰,宋志刚,等.考虑储能-智能软开关的主动配电网混合时间尺度鲁棒优化[J].中国电力,2022,55(9):129-139.