

考虑动态载流特性的风电场储能优化配置

张成炜¹, 张锬恒², 刘泽槐²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012;
2. 智慧能源工程技术研究中心, 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 现有风电场储能优化配置方法并未充分考虑风速等微气象条件对风电场架空送出线路实时输电能力的影响,线路输电能力的潜力仍有进一步挖掘利用的空间。为了提高电力系统的清洁能源综合利用水平,本文基于Morgan公式,提出一种风电场储能系统优化配置方法,所提出方法综合考虑架空送出线路的动态增容效应和风电场出力特性的匹配,以风电场年净收益最大化为优化目标,建立风电场储能系统优化配置模型,根据地区历史气象数据等信息实现风电场储能系统容量和功率的优化配置。最后,通过算例分析验证了本文所提出的方法。算例结果表明,所提出优化配置方法能够进一步挖掘和利用风电场架空送出线路的输电能力,通过优化配置风电场储能系统,提高清洁能源利用水平,满足系统的经济性要求。

关键词: 动态载流量; Morgan公式; 架空线路; 储能; 风电场

DOI: 10.12067/ATEEE1907042 **文章编号:** 1003-3076(2019)09-0017-09 **中图分类号:** TM726.3

1 引言

随着风电装机容量的日益增加,风电接入也为电力系统带来了一系列的问题,其中风电消纳问题一直备受关注,而利用储能提高系统对风电的消纳,是实现风电等清洁能源大规模开发和利用的重要途径之一^[1]。

近年来,随着储能技术的发展,在风电场储能优化配置问题上已经取得了许多研究成果。例如文献[2,3]分别提出了一种风电场储能容量优化配置方法用于平抑风电功率预测误差和平滑风电出力波动。文献[4]基于模糊控制理论构建充放电策略抑制过度充放,并将其嵌入至风电场储能容量优化方法中。文献[5]依据风电场预测出力考虑配套储能容量最小化原则提出一种调度策略,并提出了不同可调度性置信度水平下储能系统容量配置方法。文献[6]提出一种计及电池使用寿命和更换成本的风电场储能容量优化配置方法,以满足电网对风电场功率变化率的要求。文献[2-6]从不同视角提出了风电场配套储能的优化配置方法,但线路的输送容

量作为影响风电场出力的关键因素之一,在现有多数相关研究中并未受到重点关注和充分挖掘利用^[1]。已有研究表明,充分利用架空输电线路的动态增容效应,能在不对已有线路进行增容改造的情况下,有效挖掘潜力,提高电力系统架空输电线路的输电能力和资产利用率。

目前已有一些关于架空输电线路动态增容效应方面的研究和应用,包括从采集风速、温度、光照辐射强度等气象数据的视角探索提高架空输电线路的输电容量^[7,8],为电力系统顺利迎峰度夏提供了新思路。也有不少研究进一步从热稳定约束视角出发,基于暂态热平衡方程开展,提出架空输电线路动态载流量的分析方法^[9-11]。上述研究均是从电力系统运行层面研究架空输电线路的动态增容问题,在风电场储能系统容量优化配置设计阶段考虑架空线路动态载流特性的研究还比较少。风电场通常位于风资源比较丰富的地区,架空输电线路的动态载流量与风速具有很强的正相关性^[12],充分考虑二者的匹配关系能够充分挖掘风电场外送通道输送清洁能源的潜力,为电力系统带来巨大的经济效率和环境

收稿日期: 2019-07-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(51777077)
作者简介: 张成炜(1992-),男,福建籍,助理工程师,硕士,研究方向为电力规划设计、电力需求响应和电力市场等;
张锬恒(1994-),男,浙江籍,硕士研究生,研究方向为配电网规划。

效益。文献[13,14]充分利用架空输电线路的动态载流量特性,提高电网可靠性和风电接入电力系统的比例。文献[15]结合风力发电机功率特性和输电线路最大载流量计算模型,探讨二者的最优匹配问题,从设计角度提出了风电场送出线路导线优化设计方法,结果表明风力发电出力特性、架空输电线路动态载流量均与风速呈非线性的正相关关系,从侧面论证了利用架空线路的动态载流量特性加大风电消纳的可行性。进一步地,若充分考虑上述因素,势必会对风电场储能系统优化配置决策产生重大影响。

为此,本文重点对综合考虑架空送出线路的动态增容效应和风电场出力特性匹配情况下的风电场储能系统优化配置问题进行研究,提出一种风电场储能系统优化配置模型,实现风电场储能系统容量和功率的优化配置,进一步挖掘和利用风电场架空送出线路的输送能力,提高电力系统的清洁能源利用率水平,可为电力系统带来巨大的经济效率和环境效益。

2 匹配特性分析

2.1 风电场外送功率载流量需求计算方法

参考文献[15],风力发电机组典型出力特性可以表示为:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in} \\ f(v) & v_{in} < v \leq v_r \\ P^{\max} & v_r < v \leq v_{out} \\ 0 & v > v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中, v 为风速; v_{in} 为风力发电机的切入风速; v_r 为风力发电机的额定功率风速; v_{out} 为风力发电机的切出风速; P^{\max} 为储能系统的额定功率; $f(v)$ 为风速在 $v_{in} \sim v_r$ 之间时,风力发电机输出功率与风速关系的函数,即输出特性,该特性可以用线性函数和幂函数表示。

根据风电场地区气象数据的历史典型场景,对照风力发电机出力特性及计算公式,模拟生成各典型场景下风电场中风力发电机的出力,即可得到各场景下风电场外送功率的载流量需求,计算方法如式(2)所示:

$$I_{s,t} = \frac{n^{\text{wind}} P(v_{s,t})}{\sqrt{3} U_n} \quad (2)$$

式中, $I_{s,t}$ 为场景 s 下时刻 t 的风电场外送功率所对

应的载流量需求; n^{wind} 为风电场风机数; $v_{s,t}$ 为场景 s 下时刻 t 的风速; U_n 为风电场外送输电线路的额定电压。

2.2 架空导线载流能力计算方法

目前,国际上用于计算架空导线最大允许载流量的方法主要为 IEEE 标准(IEEE 738-2006)^[16] 和 CIGRE 标准^[17]。结合我国线路运行的实际特点,根据《110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010)^[18]中所采用的 Morgan 公式计算导线载流量,当导线与外界的热交换达到或接近稳定状态时,导线载流量的计算公式为:

$$I = \left(\frac{Q_r + Q_c - Q_s}{\zeta R_d} \right)^{\frac{1}{\tau+2}} \quad (3)$$

式中, Q_r 为辐射散热; Q_c 为对流散热; Q_s 为日照辐射吸热; I 为导线载流量; R_d 为直流电阻; ζ, τ 均为常量,与导线型号相关。

辐射散热 Q_r 、对流散热 Q_c 和日照辐射吸热 Q_s 及相关过程变量的计算方法如下^[17]:

$$Q_r = \pi \sigma D k_e [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (4)$$

$$Q_c = \pi \lambda_f N_u (T_c - T_a) \quad (5)$$

$$Q_s = a J_s D \quad (6)$$

$$N_u = 0.65 R_e^{0.2} + 0.23 R_e^{0.61} \quad (7)$$

$$R_e = 1.644 \times 10^9 v_{\perp} D \cdot$$

$$[T_a + 273 + 0.5(T_c - T_a)]^{-1.78} \quad (8)$$

式中, σ 为斯特凡-玻尔兹曼常数,数值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; D 为导线外径; k_e 为导线表面的辐射散热系数,新线为 0.23~0.43,旧线为 0.9~0.95; T_c 为导线温度; T_a 为环境温度; λ_f 为导线表面空气层的传热系数,通常取值为 $0.02585 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; N_u 为欧拉数; R_e 为雷诺数; v_{\perp} 为垂直导线的风速; a 为吸热系数,新线为 0.35~0.46,旧线为 0.9~0.95^[13]; J_s 为日照强度。

在设计过程中,为了简化计算过程,可以将导线允许温度、日照强度设为定值,如一般取导线允许温度为 70℃ 或 80℃,取日照强度为 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$,也可以根据风电场和导线所在区域的历史气象数据生成的典型场景取动态数值。

2.3 风电场出力特性与线路动态增容效应匹配

根据 2.1 节和 2.2 节介绍的方法,分别绘制出风电外送载流量需求曲线和导线载流能力曲线,两者的匹配特性如图 1 所示。

由图 1 可知,当风速介于切入风速 v_{in} 和额定功

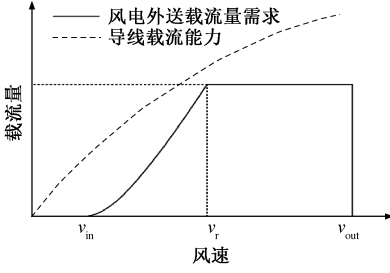


图1 匹配特性示意图

Fig.1 Sketch map of matching characteristics

率风速 v_r 之间时,此时随着风速的增大,风电场出力也随之增大,其外送载流量需求也越大,同时由于导线的对流散热加快,其送出线路的载流能力(即输电能力)也随之增大。此时若按现行设计标准 0.5m/s 的风速设定值整定导线的最大载流量,得到的结果势必较小,仍有优化的潜力和空间。上述分析表明,综合考虑架空送出线路的动态增容效应和风电场出力特性的匹配,能充分挖掘架空输电线路的输电能力,这为风电场储能的进一步优化配置提供了理论基础。

3 风电场储能系统优化配置模型

3.1 目标函数

为更加合理地评估风电场储能系统优化配置的结果,本文建立的风电场储能系统优化配置模型以风电场年净收益最大为目标,年净收益由风电场年风电上网收入、年环境保护收入减去储能系统年投资费用获得,目标函数表示如下:

$$\max f = \max(R_w + R_{\text{co2}} - C_{\text{invest}}) \quad (9)$$

式中, R_w 为风电场年风电上网收入; R_{co2} 为风电场年环境保护收入; C_{invest} 为风机和储能系统的年投资费用^[19]。

风机和储能系统的年投资费用 C_{invest} 的计算公式为:

$$C_{\text{invest}} = c_m E^{\max} + c_p P^{\max} + c_w \cdot n g^w \quad (10)$$

式中, c_m 、 c_p 和 c_w 分别为折合到每年的储能系统单位容量投资费用、单位功率投资费用和每台风力发电机的投资费用; E^{\max} 和 P^{\max} 分别为储能系统的额定容量和额定功率; $n g^w$ 为风机数。其中,储能的单位功率投资费用主要用于表征储能系统逆变器或与功率大小相关的并网设备的投资费用。

风电场的年风电上网收入 R_w 和年环境保护收入 R_{co2} 的计算公式为:

$$R_w = 365 \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T p_s^{w,\text{disp}}(t) \lambda_e}{S} \quad (11)$$

$$R_{\text{co2}} = 365 \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T p_s^{w,\text{disp}}(t) \lambda_{\text{co2}} \eta_{\text{e2co2}}}{S} \quad (12)$$

式中, S 为考虑的各种场景总数; T 为考虑的日内时段总数; $p_s^{w,\text{disp}}(t)$ 为风电场在场景 s 下 t 时刻的调度出力值; λ_e 为风电上网电价; λ_{co2} 为 CO_2 在碳市场中的交易价格; η_{e2co2} 为燃煤发电机组的碳排放水平,不同等级的燃煤机组 η_{e2co2} 略有差别^[14]。

在本文模型中,风电场的调度出力为理论可挖掘的最大值,可以为电力调度指令的制定提供参考,并未考虑风电场出力与负荷的平衡以及储能参与电网调峰辅助服务的问题。

3.2 约束条件

(1) 风电场有功功率变化限值约束

随着风电渗透率的增加,风电波动性对电力系统运行可靠性和经济性的影响也越发突出,《风电场接入电力系统技术规定》对正常运行情况下不同装机容量的风电场在 1min 和 10min 内的有功功率变化限值做出了具体规定^[20]。本文模型借鉴文献^[21]所提出的反映风电输出功率平滑程度的比例函数,建立风电场有功功率变化限值约束,以此作为风电场储能系统优化配置的重要依据。同时,考虑到在少数极端情况下,风电场有功功率变化难以满足技术规定要求,随着灵活可调度资源(如需求响应资源)渗透率的提高,可以认为电力系统有足够的调节能力应对小概率极端事件。因此,本文模型定义风电场有功功率变化限值约束条件如下^[6]:

$$p(\Delta P_{1\text{min}}^{\text{sys}}(t) \leq \Delta P_{1\text{min},\text{max}}^{\text{sys}}) \geq \rho_{1\text{min},\text{min}} \quad (13)$$

$$p(\Delta P_{10\text{min}}^{\text{sys}}(t) \leq \Delta P_{10\text{min},\text{max}}^{\text{sys}}) \geq \rho_{10\text{min},\text{min}} \quad (14)$$

式中, $\Delta P_{1\text{min},\text{max}}^{\text{sys}}$ 和 $\Delta P_{10\text{min},\text{max}}^{\text{sys}}$ 分别为风电场在 1min 和 10min 内有功功率变化限值; $\Delta P_{1\text{min}}^{\text{sys}}(t)$ 和 $\Delta P_{10\text{min}}^{\text{sys}}(t)$ 分别为风电场在 1min 和 10min 内调度有功功率变化量; $\rho_{1\text{min},\text{min}}$ 和 $\rho_{10\text{min},\text{min}}$ 分别为风电场在 1min 和 10min 内的有功功率变化满足限值概率的置信度水平,典型取值为 90%、95% 和 99%; $p(\cdot)$ 表示对括号内公式求概率的函数。

(2) 风力发电机调度运行约束

$$0 \leq p_s^{w,\text{disp}}(t) \leq p_s^w(t) \quad (15)$$

式中, $p_s^w(t)$ 为风电场在场景 s 下 t 时刻的出力值,可根据风电场地区风速和 2.1 节所述风力发电机出

力特性计算得到。

(3) 风电场送出线路的输送容量约束

$$p_s^{w, \text{disp}}(t) \leq \sqrt{3} U_n \min \{ I_{s,t}, (1 - \varepsilon) I_{j,s,t} \} \quad (16)$$

式中, $I_{j,s,t}$ 为 j 型号的导线在场景 s 下 t 时刻的载流能力, 可通过 2.2 节的载流量计算公式得到; ε 为导线载流量裕度。

该约束通过综合考虑风电场外送功率需求和架空线路的动态载流能力对风电场调度功率的限制, 反映了本文第 2 节提及的线路动态增容效应与风电场出力特性的匹配问题。

(4) 清洁能源利用率水平约束

清洁能源利用率水平为一年中考虑各场景的风电场电能的利用率, 为了防止长时间的弃风现象, 造成清洁能源的浪费, 需要大于要求值, 表示如下:

$$\frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T p_s^{w, \text{disp}}(t)}{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T p_s^w(t)} \geq \beta \quad (17)$$

式中, β 为要求的清洁能源利用率水平, 典型取值为 90%、95% 和 99%。

(5) 风电场储能系统运行约束

风电场储能系统运行特性约束为:

$$E_s(t) = (1 - \delta_s) E_s(t-1) + \left[\eta^{\text{ch}} p_s^{\text{ch}}(t) - \frac{p_s^{\text{dis}}(t)}{\eta^{\text{dis}}} \right] \Delta t \quad (18)$$

$$\underline{\gamma} E^{\text{max}} \leq E_s(t) \leq \bar{\gamma} E^{\text{max}} \quad (19)$$

$$0 \leq p_s^{\text{ch}}(t) \leq P^{\text{max}} \alpha_s^{\text{ch}}(t) \quad (20)$$

$$0 \leq p_s^{\text{dis}}(t) \leq P^{\text{max}} \alpha_s^{\text{dis}}(t) \quad (21)$$

$$\alpha_s^{\text{ch}}(t) + \alpha_s^{\text{dis}}(t) \leq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T \left[\eta^{\text{ch}} p_s^{\text{ch}}(t) - \frac{p_s^{\text{dis}}(t)}{\eta^{\text{dis}}} - \delta E_s(t) \right] \Delta t = 0 \quad (23)$$

$$P^{\text{max}} \leq \eta E^{\text{max}} \quad (24)$$

式中, $E_s(t)$ 为储能系统在场景 s 下 t 时刻的电能量; $p_s^{\text{ch}}(t)$ 和 $p_s^{\text{dis}}(t)$ 分别为储能系统在场景 s 下 t 时刻的充电、放电功率; δ_s 为储能系统自放电情况下的损耗系数; η^{ch} 、 η^{dis} 分别为储能系统的充放电效率; $\bar{\gamma}$ 、 $\underline{\gamma}$ 分别为储能系统 SOC 上、下限系数; $\alpha_s^{\text{ch}}(t)$ 、 $\alpha_s^{\text{dis}}(t)$ 分别为储能系统在场景 s 下 t 时刻的充、放电工作状态, 是 0-1 变量; η 为表示储能系统额定容量和额定功率关系的系数, 由储能电池的类型和制造水平决定, 不同类型的储能取值不同^[22]。

式(18)和式(19)为储能系统的能量约束, 式(20)和式(21)为储能系统的充、放电功率约束, 式(22)为储能系统工作状态约束; 式(23)为储能系统在考虑自放电情况下的充放电平衡约束, 式(24)表示储能系统额定容量和额定功率的关系。

上述目标函数与约束条件构成了本文所建立考虑动态载流特性的风电场储能系统优化配置模型。

3.3 模型求解

因为导线载流量的计算公式为非线性形式, 故本文所建立的优化模型也是非线性的, 但在导线参数已知的情况下该模型可以认为是线性的, 故可以利用商业优化软件 GAMS 调用 CPLEX 求解器求解所建立的模型。

4 算例分析

4.1 算例参数

以一座风电场为例, 该风电场配置有 125 台单机额定容量为 2000kW 的风力发电机, 假设风电场送出线路电压等级为 220kV, 线路全长为 10km, 采用双回路架空架设的方式接至变电站 A, 线路导线型号为 LGJ-240/30, 该型号导线能满足 80% 左右的风电外送载流量需求, 风电场外送载流量需求概率分布曲线如图 2 所示。导线外径为 21.6mm, 20℃ 的直流电阻为 0.1181Ω/km, ζ 取值为 0.8957, τ 取值为 0.01912, 线路每 5km 为一段并配 1 个气象观测点, 风电场及送出线路位置示意图如图 3 所示。风电场配置型号风力发电机切入风速 v_{in} 为 3m/s, 额定功率风速 v_r 为 10.5m/s, 切出风速 v_{out} 为 25m/s。假设风速在风力发电机切入风速到额定功率风速之间时, 风力发电机输出有功功率与风速的函数关系是线性的。图 4 为风电场所在区域典型风速曲线, 图 5 为对观测点 1 和 2 一年四季的风速及温度数据聚类后各季节场景下的相关数据(场景 1~4 分别表示春、夏、秋、冬)。本算例中, 辐射散热系数、吸热系数取值均为 0.9, 最大允许温度为 70℃, 日照强度取值为 1000W/m², 导线载流量裕度取 20%。

每台风力发电机的投资费用为 8.36×10⁶ 元, 寿命取 20 年。储能系统采用较为常用的锂电池, 其单位容量投资费用为 2.4×10⁶ 元/(MW·h), 单位功率投资费用为 1.0×10⁶ 元/(MW·h)。忽略储能系统的自放电效应, SOC 上、下限系数分别为 1 和 0.2, 初始 SOC 水平设为 0.5, 电池的寿命取 8 年。风电上网电价 λ_e 的取值为 540 元/(MW·h), CO₂ 在碳市

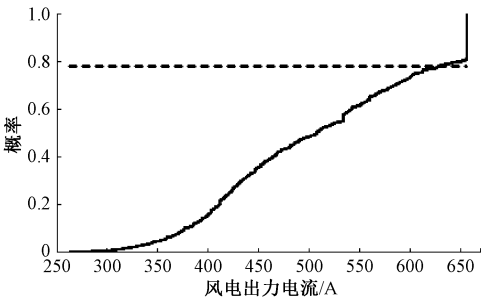


图2 风电场外送载流量需求概率分布曲线
Fig.2 Probability distribution curve of wind farm outgoing current

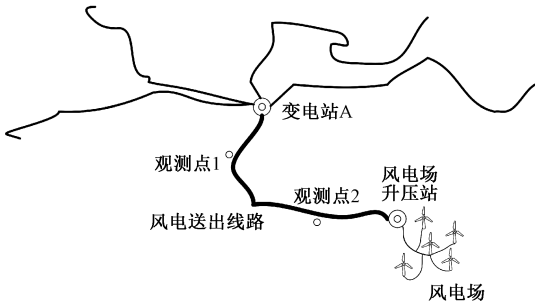


图3 风电场及送出线路位置示意图
Fig.3 Location of wind farm and overhead transmission lines

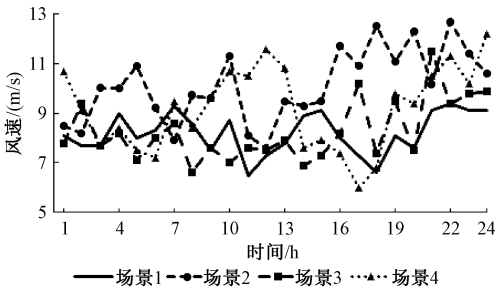
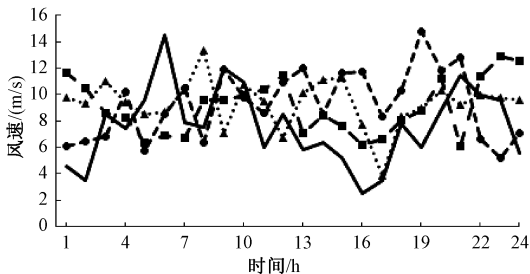
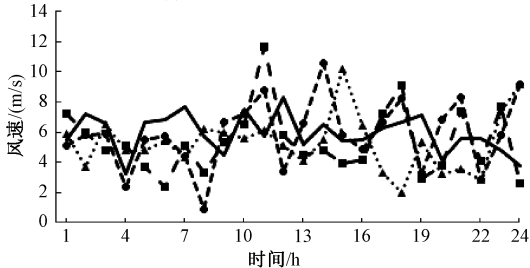


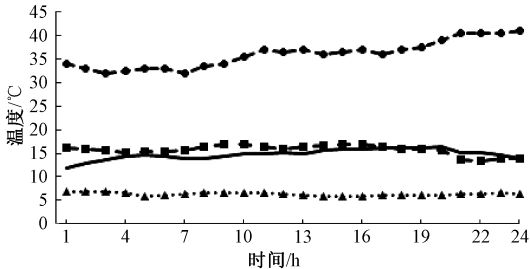
图4 风电场所在区域典型风速曲线
Fig.4 Typical wind speed curves for area of wind farm



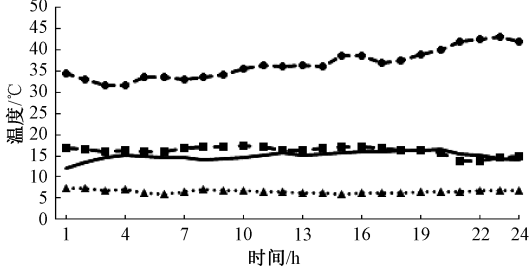
(a) 观测点1典型风速曲线



(b) 观测点2典型风速曲线



(c) 观测点1典型温度曲线



(d) 观测点2典型温度曲线

图5 典型风速曲线和温度曲线

Fig.5 Typical wind speed curves and temperature curves

场中交易价格 λ_{co_2} 的取值为40元/t;燃煤发电机组的碳排放水平 η_{e2co_2} 的取值为0.832t/(MW·h),清洁能源消纳水平设为95%^[19]。

算例考虑一年四季的风速及温度数据聚类后各季节场景下的相关数据,虽然仅考虑4个场景具有随机性,对风速、负荷数据的全年的日间变化情况反映不足,但数据获取更容易且计算量小。值得说明的是,算例数据的选择并不影响本文所提出风电场储能优化配置方法的有效性,故选择典型日数据分析以验证所提方法的有效性。为验证本文所提出模型的有效性,将考虑输电线路动态载流量(本文模型)和不考虑输电线路动态载流量(传统模型)时的

风电场储能优化配置结果作为对比。

4.2 结果分析

表1为优化配置结果对比,从表1可以看出,在清洁能源利用率水平同为95%且风电装机容量一致的情况下,本文模型相比传统模型年净收益高出约0.87%,虽然年净收益提升不明显,但能减少约86.23%的所配置储能系统的额定容量,进一步节省储能系统的投资,体现了本文模型的有效性和经济性。虽然本文模型和传统模型所配置储能系统的额定功率一致,但储能系统容量的不同可以反映出所需要的储能类型亦不相同,即本文模型需要的是功

率型储能,传统模型需要的是能量型储能。造成这一结果的原因是在场景 4 中,倘若仅考虑静态输送容量,为了满足 95%的清洁能源消纳水平,需要配置储能系统吸纳过剩的风电出力,如图 6 所示,进而导致储能系统需要配置更大的额定容量,如图 7 所示。相反,在考虑了架空输电线路的动态载流特性后,在风速较高时风电出力也较大,输电线路的载流能力也相应提高,充分利用这一特性,能够在满足电力系统对风电场有功功率变化限值要求的情况下尽可能地为系统输送更多的风电,进而减少风电场储能系统的容量配置需求。

表 1 优化配置结果对比

Tab.1 Comparison between optimal configuration results

模型	本文模型	传统模型	本文模型 (最优风电 装机扩容)
年净收益/万元	584680	579640	1200100
年风电上网 收入/万元	551269.2	548029.5	1148090
年环境保护 收入/万元	33984.15	33814.97	70756.14
储能系统容量 年投资费用 /万元	260.55	1891.786	6369.0
储能系统功率 年投资费用 /万元	312.984	312.984	1481.2
风电装机增加 年投资费用 /万元	-	-	10923.95
风电装机 数量/台	125	125	275
储能系统 容量/(MW·h)	6.75	49.01	165
储能系统 功率/MW	19.44	19.44	92

注:“-”表示不适用。

同时,本文模型还可以用于风电场最优风电装机扩容的评估与分析,其结果如表 1 第 3 列所示。图 8 为利用本文模型在最优风电装机扩容情况下场景 4 所对应的风电调度情况,其中线路动态和静态输送容量曲线分别为根据本文方法和传统方法计算得到的线路输电能力。从图 8 可知,考虑 20%裕度的情况下线路动态输送容量在绝大多数时刻也远大于线路静态输送容量,可见考虑动态载流特性能够充分挖掘风电场外送输电线路的输电能力。在充分

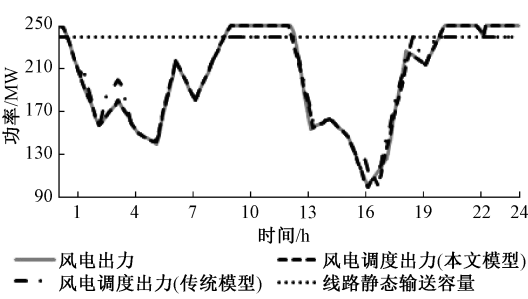


图 6 场景 4 风电调度情况

Fig.6 Wind power dispatching situation in scenario 4

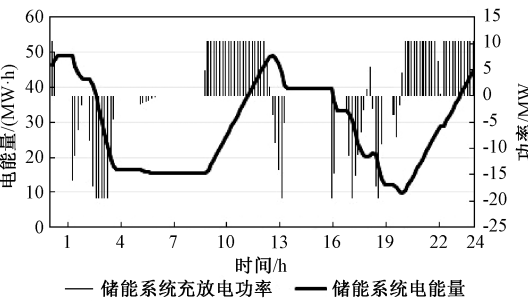


图 7 传统模型场景 4 储能系统运行状况

Fig.7 Energy storage system operation situation in scenario 4 by using traditional method

运用这一特性后,算例所示电力系统中所研究线路可接入风电场的最优风机总台数为 275 台,即 550MW 风电装机容量。对于该风电场仍可以扩建 150 台风力发电机,配置额定容量为 165MW·h、额定功率为 92MW 的储能系统后即可达到 95%的清洁能源利用率水平。

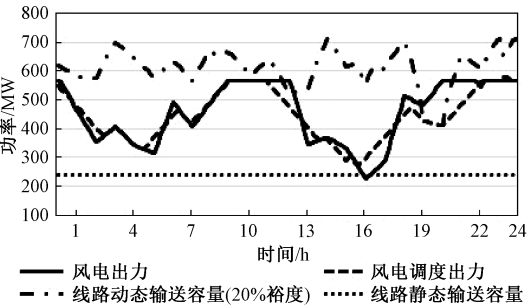


图 8 最优扩容时场景 4 风电调度情况

Fig.8 Wind power dispatching situation in scenario 4 under optimal expansion scheme

图 9 为对应场景 4 情况下储能系统运行状况。对照图 8 和图 9 可知,风电场出力大于线路动态输送容量时储能充电吸收电能,风电场出力小于线路动态输送容量时储能放电释放电能,由此实现风电

场的经济运行,保证了清洁能源的消纳。同时,在部分时段储能系统还能够平滑风电调度出力曲线,使之满足风电场并网的功率波动要求。

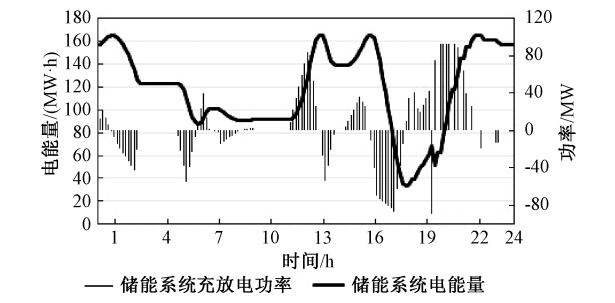


图9 最优扩容时场景4 储能系统运行状况

Fig.9 Energy storage system operation situation in scenario 4 under optimal expansion scheme

表2 为利用本文模型在95%的清洁能源消纳水平下不同风电装机容量时风电场最优储能优化配置结果。可以看出,在不同风电装机容量下风电场储能优化配置结果有显著区别。风电装机容量从250MW 逐步提高至550MW 时,所配置储能系统的额定容量也随之提高,且增速逐渐加快。同时,在这一过程中储能系统的额定功率也随之提高,但增速总体不如储能容量的增速。故随着风电装机容量的不断提高,所需的储能类型也逐渐从功率型变为能量型。值得注意的是,倘若进一步加大风电装机容量,风力发电水平已整体超越线路的动态输送容量,则此时为了达到95%的清洁能源消纳水平的要求,需要配置更大额定容量和额定功率的储能系统,这是不符合实际的,故不对此情况做进一步分析。

表2 优化结果							
Tab.2 Optimization results							
风电装机容量/MW	250	300	350	400	450	500	550
储能系统容量/(MW·h)	7	14	25	34	47	128	165
储能系统功率/MW	19	32	39	49	57	73	92

所需的储能类型逐渐从功率型变为能量型是因为在风电装机容量水平较小时,储能系统的作用主要在于平抑风电调度出力波动,使之达到风电并网的要求。随着风电装机容量的增加,风电出力水平逐步增加,逐渐接近甚至超越线路的动态输送容量,此时储能系统的作用逐渐变为满足电力系统对风电场运行要求的同时尽可能地增加风电场风电上网收

入和环境保护收入。而风电上网电价和CO₂在碳市场中的交易价格均比较高,此时存储风电是有利可图的,故此时所配置储能系统的额定容量迅速提高,导致储能系统的类型也随之发生了变化。

本文所建立的风电场储能优化配置模型综合考虑架空送出线路的动态增容效应和风电场出力特性的匹配,更符合实际情况,该研究成果能够应用于风电场最优风电装机扩容的评估与分析,给出配套储能系统额定容量、额定功率的配置建议,同时为风电场配套储能系统优化配置设计提供了新的方法。

5 结论

本文提出了一种风电场储能系统优化配置方法,该方法综合考虑架空送出线路的动态增容效应和风电场出力特性的匹配,通过优化配置风电场储能系统容量和功率,进一步挖掘和利用风电场架空送出线路的输送能力,提高电力系统的清洁能源利用率水平。同时,本文方法还可以应用于电力系统可接入风电容量的评估与分析,优化配置配套储能系统的容量和功率。

需要说明的是,本文未考虑受端电网负荷情况和风电场所接受调度指令值的影响,即是在尽可能充分利用线路输电能力实现对风电的消纳这一背景下开展的,但并不影响研究成果及思路在更广领域的应用。例如,研究成果可为电力系统调度提供新的风电场出力调度计划制定方法,在进一步挖掘电力系统清洁能源消纳能力方面有巨大的应用空间,具有显著的经济和环境效益。

未来我们将继续完善和扩展本文所提出的方法,研究如何在满足辅助服务准入门槛的情况下实现风电场自身利益的最大化。

参考文献 (References):

[1] 李丹丹, 苏小林, 阎晓霞, 等 (Li Dandan, Su Xiaolin, Yan Xiaoxia, et al.). 储能优化配置关键问题分析 (Principal problems of energy storage optimization allocation) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2016, 37 (9): 70-78.

[2] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等 (Yang Shuili, Li Jianlin, Hui Dong, et al.). 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置 (Optimal capacity configuration of battery energy storage system to track planned output of wind farm) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (6): 1485-1491.

- [3] 冯江霞, 梁军, 冯益坤 (Feng Jiangxia, Liang Jun, Feng Yikun). 基于风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化计算 (Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (3): 1-6.
- [4] 张峰, 梁军, 张利, 等 (Zhang Feng, Liang Jun, Zhang Li, et al.). 考虑最佳期望输出与荷电状态的风电场储能容量优化方法 (Energy storage capacity optimization for wind farms considering optimal expected output and SOC) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (24): 12-19.
- [5] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等 (Shi Lin, Luo Yi, Tu Guangyu, et al.). 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法 (Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 120-127.
- [6] 沈子奇, 裴玮, 邓卫, 等 (Shen Ziqi, Pei Wei, Deng Wei, et al.). 考虑电池寿命和运行策略影响的风电场储能容量优化配置 (Storage capacity optimization for wind farm considering the impact of battery lifetime and control strategy) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (7): 2236-2244.
- [7] 周海松, 陈哲, 张健, 等 (Zhou Haisong, Chen Zhe, Zhang Jian, et al.). 应用气象数值预报技术提高输电线路动态载流量能力 (Application of meteorological numerical forecast technology for improving transmission line capability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 40 (7): 2175-2178.
- [8] 张斌, 林章岁, 叶荣, 等 (Zhang Bin, Lin Zhangsui, Ye Rong, et al.). 随环境条件变化的输电线路输送容量概率建模研究 (Application of meteorological numerical forecast technology for improving transmission line capability) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (12): 46-52.
- [9] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等 (Ma Xiaoming, Fan Chunju, Hu Tianqiang, et al.). 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究 (Calculation of current carrying capacity of overhead transmission line based on thermal stability constraint) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (14): 86-91.
- [10] 李天助, 汪泓, 牛雪松, 等 (Li Tianzhu, Wang Feng, Niu Xuesong, et al.). 架空导线动态载流量的分析及改进算法 (Analysis and improved method for overhead conductor dynamic ampacity) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 59-64.
- [11] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等 (Fan Jingyi, Mao Anjia, Liu Yan, et al.). 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析 (Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (1): 116-121.
- [12] 王天正, 朱石晶, 郭瑞宙, 等 (Wang Tianzheng, Zhu Shijing, Guo Ruizhou, et al.). 山西平鲁败虎堡风电场并网线动态载流量研究 [J]. (Study on dynamic line rating of Baihubao wind farm outgone lines) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (5): 1400-1405.
- [13] Teh Jiashen, Cotton Ian. Reliability impact of dynamic thermal rating system in wind power integrated network [J]. IEEE Transactions on Power Reliability, 2016, 65 (2): 1081-1089.
- [14] Carl J W, Yalin H, Lennart S. Impact from dynamic line rating on wind power integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (1): 343-350.
- [15] 秦佳南, 房岭峰, 盛戈皞, 等 (Qin Jianan, Fang Lingfeng, Sheng Gehao, et al.). 基于风机功率和导线载流特性动态匹配的风电场出线增容 (Wind farm outgoing transmission line dynamic rating based on dynamic matching of wind turbine power characteristic and conductor permissive carrying current) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (6): 9-19.
- [16] IEEE Standard 738-2006, IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors [S].
- [17] CIGRE WG 22.12-2002, The thermal behavior of overhead conductor [S].
- [18] GB 50545-2010, 100~750kV 架空输电线路设计规程 (Code for designing 110-750kV overhead transmission line) [S].
- [19] 熊猛, 高峰, 张海峰, 等 (Xiong Meng, Gao Feng, Zhang Haifeng, et al.). 考虑调度计划的风电场复合储能装置优化设计 (Optimization design for hybrid energy storage device in wind farm taking scheduling into account) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (7): 1853-1860.
- [20] GB/T 19963-2011, 风电场接入电力系统技术规定 (Technical rule for connecting wind farm to power system) [S].
- [21] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等 (Zhang Kun, Mao Chengxiong, Xie Junwen, et al.). 风电场复合储能系

统容量配置的优化设计 (Optimal design of hybrid energy system capacity for wind farms) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (25): 79-87.

[22] 朱永强, 郝嘉诚, 赵娜, 等 (Zhu Yongqiang, Hao Ji-acheng, Zhao Na, et al.). 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式 (Demands, functions and action manners of energy storage in Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 68-75.

Optimal configuration of energy storage system for wind farms considering dynamic transmission ampacity characteristic

ZHANG Cheng-wei¹, ZHANG Si-heng², LIU Ze-huai²

- (1. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350012, China;

2. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Currently, the optimal configuration method of energy storage system for wind farms neglects the influence from microclimate factors (such as wind speed and so on) to overhead transmission lines real-time transmission capabilities and there still are potentials to dig out and utilize transmission capabilities. In order to increase the clean energy utilization level of power system, this paper proposes an optimal configuration method of energy storage system for wind farms based on Morgan formula, in which, the match between dynamic ampacity increasing of overhead transmission lines and wind farm output characteristics are considered. Then, an optimal configuration model of energy storage system for wind farms is established to optimize the configuration of capacity and power on the basis of regional historical meteorological data, in which the objective is to maximize net profit of wind farm. Finally, the proposed method is verified by case study. The results of case study indicate that the proposed optimal configuration method is able to further explore and utilize the transmission ampacity potential of output transmission lines for wind farms. The clean energy utilization level increases and the economic requirement of power system is satisfied by optimally configuring storage system of wind farms.

Key words: dynamic transmission ampacity; Morgan formula; overhead transmission line; energy storage; wind farms