

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210116

基于时序运行模拟的风火打捆最优容量配比整定

刘新苗¹, 卢洵¹, 娄源媛¹, 赵一帆², 魏利岫², 姚伟²

(1. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室
(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 风火打捆送出是提高风电消纳能力的重要方式, 其难点之一在于整定打捆的最优风火容量配比。提出了基于时序运行模拟的风火打捆容量最优配比整定方法。首先, 通过气象数据获取规划中风电的全年出力特性。然后, 以机组总运行成本最低及清洁能源消纳率最高为目标, 建立小时级时序运行模拟模型, 采用时序分解及自动回滚技术实现模型的快速求解。此外, 针对为期一年的模拟结果, 进一步利用暂态稳定约束进行校核与调整, 消除潜在的暂稳风险。最后, 以广东电网珠三角地区为例, 通过对比不同风火配比下的风电消纳能力及运行经济性数据, 给出了兼顾环保性、安全性与经济性的风火配比。运行结果可为地区的海上风电规划与建设、电力系统调度提供指导。
关键词: 风火打捆; 时序运行模拟; 配比整定; 海上风电; 暂态稳定

Optimal setting of wind-thermal-bundled capacity ratio based on chronological operation simulation

LIU Xinmiao¹, LU Xun¹, LOU Yuanyuan¹, ZHAO Yifan², WEI Lishen², YAO Wei²

(1. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Wind-thermal bundled transmission is considered an important way to promote wind power accommodation. One of the difficulties lies in setting the optimal bundled wind-thermal capacity ratio. This paper proposes a method for setting the optimal ratio based on chronological operation simulation. First, the annual output characteristics of the planned wind power are obtained through meteorological data. Then, an hourly chronological operation simulation model is established, aiming at the lowest total operating cost of the system and the highest clean energy accommodation rate. The simulation model is analysed with time domain partitioning and a rollback mechanism to accelerate the computation speed. One-year hourly simulation results are further checked and adjusted to avoid potential transient stability risks. Finally, taking the Northwest region of Guangdong Power Grid as an example, by comparing the wind power accommodation capacity and operating economic data under different wind-thermal ratios, the optimal setting of the wind-thermal-bundled capacity ratio is recommended considering the effects of environmental protection, safety and economy. The results of the simulation can provide guidance for the planning and construction of offshore wind power and power system dispatch.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52022035) and the Key Planning Thematic Project of Guangdong Power Grid Corporation (No. 030000QQ00190006).

Key words: wind-thermal-bundled; chronological operation simulation; capability ratio setting; offshore wind; transient stability

0 引言

为了应对环境污染问题, 构建清洁、可持续的能源格局, 以风电为代表的可再生能源在我国得到

了大力发展^[1-5]。随着大量陆上风电场建成并投入运行, 海上风电也开始得到广泛关注^[6-10]。以广东省为例, “十四五”规划装机海上风电约1 600万kW, 主要分布在粤东、粤西附近海面。然而, 粤东、粤西地区自身不具备消纳并网海上风电的能力, 盈余的海上风电需经远距离输电通道外送至珠三角地区消纳。“三北”地区陆上风电外送消纳的经验表明,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52022035); 广东电网有限责任公司重点规划专题项目资助(030000QQ00190006)

将火电与风电打捆后送出,可有效平抑风电波动性,提高外送输电通道的利用率^[11-13]。“十四五”期间,位于粤东、粤西的甲湖湾、博贺等大型煤电项目也将建成投产,这为采用“风火打捆”方式将部分海上风电送出提供了充分的客观条件。

对于“风火打捆”系统而言,首先要解决的问题便是以何种比例“打捆”风电与火电。对此,国内外已有学者进行了研究并取得了一些成果。文献[14]在考虑风电出力概率的基础上,从跟随风电功率变化的角度提出了风电与火电容量的不同配比方案,但该方法并未考虑风火打捆对火电经济性的影响。文献[15-17]则建立了风火打捆容量配置的优化模型,通过考虑火电机组运行成本,计算风电、火电利用小时数,从经济性角度给出了解决方案。然而,上述文献均不能准确刻画风电出力和负荷变化的全年时序特性。为了准确反映可再生能源的全年出力变化特点,文献[18]提出了一套基于气象数据的电力时序运行模拟框架,为优化风火配比提供了新的思路。

事实上,目前有关“风火打捆”系统的研究中,有相当数量集中在分析其暂态稳定性方面^[19-22]。而对于“风火打捆”远距离外送通道而言,其本身就存在受暂稳约束而利用率偏低的问题。根据现有研究结论,风火出力配比是影响“风火打捆”系统暂稳水平的关键因素,而不同的风火容量配比也直接关系到风火出力配比。因此,十分有必要在规划风火容量配置时将“风火打捆”外送通道的暂态稳定约束考虑在内。

针对以上问题,本文提出了基于时序运行模拟的风火打捆容量配置方法。首先阐述了容量配置的环保性、安全性和经济性原则;其次介绍了基于气象数据的电力系统时序运行模拟框架;然后给出了利用通道暂稳极限校核和调整时序运行模拟结果的思路,最后结合珠西北“风火打捆”外送的实例,验证了所提出方法的可行性和有效性。

1 风火打捆容量配置研究方法

1.1 配置原则

实际电网中,对于风电与火电打捆送出时各自容量的确定要做到兼顾环保性、安全性和经济性。下面分别从这三点进行分析:

(1) 环保性。根据相关政策,国家鼓励和支持可再生能源并网发电,电网企业有义务全额收购其电网覆盖范围内的可再生能源。风电作为一种可再生能源,应尽量提高系统对风电的消纳能力,减少弃风量。

(2) 安全性。风电与火电打捆送出的场景多为由能源中心向负荷中心的点对点、远距离、大容量送出,输电通道的输电能力决定了风火打捆送出的规模。对于输电通道来说,发生故障后的暂态稳定性是其安全运行的重要保证。因此,需要将输电通道的输送功率限制在其暂态稳定极限之下。此外,风电出力具有强波动性和随机性,日出力变化很大,风火打捆送出的一大好处就是可以利用火电的调频、调峰特性跟踪风电出力变化,平抑送出功率的波动。为保证系统运行安全性,配置的风电容量还应不能超过火电机组的调频、调峰能力。

(3) 经济性。在确保环保性和安全性的前提下,系统运行的经济性是不可或缺的因素。若一味提高风电消纳水平,在风电大发时退出部分火电,风电小发时又将火电开机,频繁的启停操作会产生大量费用,严重伤害火电厂和整个电网的运行经济性。同样地,如果为了规避系统故障后的暂态失稳风险而减少配置的风电与火电,输电通道的利用率会大打折扣。事实上,对于确定的输电通道,其暂态稳定极限大小与风电、火电机组的实际出力密切相关。根据现有研究^[23-24],当风火打捆送出时,在一定限度内提高风电机组出力可以提高送出通道的暂稳极限;当风电出力比例提高到一定程度时,输电通道的暂稳极限下降。而具体何种比例的风火出力下输电通道暂稳极限最高,并没有解析的分析方法,需要结合实际的电网拓扑和运行方式通过仿真获得^[21]。

值得注意的是,与输电通道暂稳极限相关的是风电、火电机组实时的出力大小,而非本文所关注的容量,但对于风电来说,在同样的气象条件下,大风量的风电场其出力也会更大。从经济性的角度来看,在某些极端情况下风火出力之和超过了输电通道的暂稳极限,应该考虑弃风、切机等紧急控制措施,而非从一开始便保守地规划更小容量的电厂。

1.2 方法思路

基于以上三方面的考虑,本文提出了考虑暂稳极限的时序运行模拟框架来整定风火打捆的容量配比。由于暂稳极限与实际出力相关且没有解析表达式,很难转化为数学约束体现在时序运行模型中。因此,本文首先仅考虑通道的静态稳定极限和调频、调峰约束,对所研究的点对点外送系统进行为期一年的时序运行模拟;之后,利用仿真得到的火电出力-暂稳极限对应曲线对时序运行模拟进行进一步的暂稳校核和调整,最终得到满足暂稳约束的机组组合方式。在此基础上,设置不同水平的火电与风电容量配比进行扫描仿真,以弃风率反映环保性指

标, 以火电机组年平均利用小时数、输电通道年均利用率反映经济性指标, 以输电通道暂稳受限小时数反映安全性指标, 比选出推荐的风火配置方案。具体流程如图 1 所示。

由于规划中的风电场缺乏实际出力数据, 难以直接在仿真工具中应用, 本文采用了基于气象数据的电力系统时序运行模拟方法, 该方法可利用气象数据, 结合机组特性, 直接生成风电出力时序曲线。

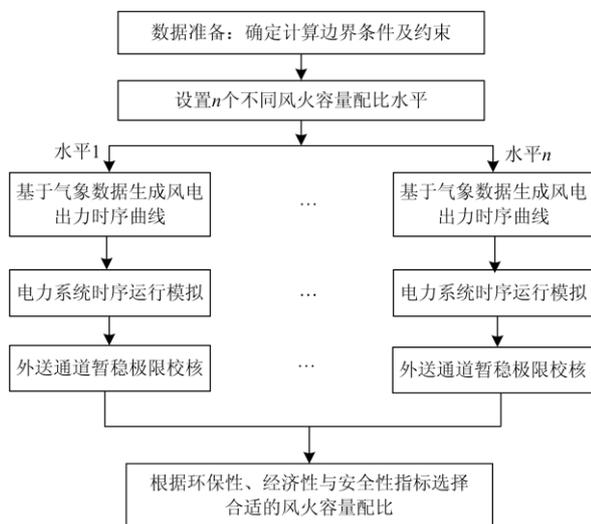


图 1 电力系统时序运行模拟确定风火容量配比流程图

Fig. 1 Diagram of power system chronological operation simulation to determine wind-thermal capacity ratio

2 基于气象数据的电力系统时序运行模拟

相较于目前在国际上广泛使用的 Balmorel、EnergyPLAN 等工具, 本文采用的基于气象数据的电力系统时序运行模拟工具^[18]具有两方面显著优势: 使用气象数据生成可再生能源出力, 摆脱了仿真工具对现场数据的依赖; 依靠时序分解和自动回滚技术, 克服了区域电力系统运行模拟时求解速度慢、易无解的问题。如图 2 所示, 该工具主要包括三个阶段: 数据准备、运行模拟以及结果输出。

(1) 数据准备: 计算之前首先要确定计算的各类边界条件, 将其作为电力运行模拟的输入数据。主要包括: 发电机参数、区域间联络线传输计划、全年负荷预测数据、可再生能源出力数据。其中, 对于规划中的、需经风火打捆送出的风电出力数据, 通过小时级气象数据中的风速获得。最后, 以待分析的风火打捆外送通道为分界点, 将区域电力系统划分为送端子系统和受端子系统, 并获得通道的静态稳定极限和调频、调峰约束。

(2) 运行模拟: 数据输入后, 本阶段建立小时级

的机组组合模型来模拟电力系统运行。将全年运行模拟分解为 12 个月进行并行计算, 同时每相邻月份间设置 5 天重叠时间, 以加快模型的求解速度。此外, 针对长时间运行时滚动间隔可能带来的无解问题, 引入无解自动回滚机制。有关时序分解与自动回滚技术的细节可参考文献[18]。

(3) 结果输出: 第二阶段运行结果仅为各月计算结果, 需将这些结果合并为全年的运行模拟结果, 之后统计得到可再生能源的接纳情况以及常规能源的全年运行情况, 并输出。

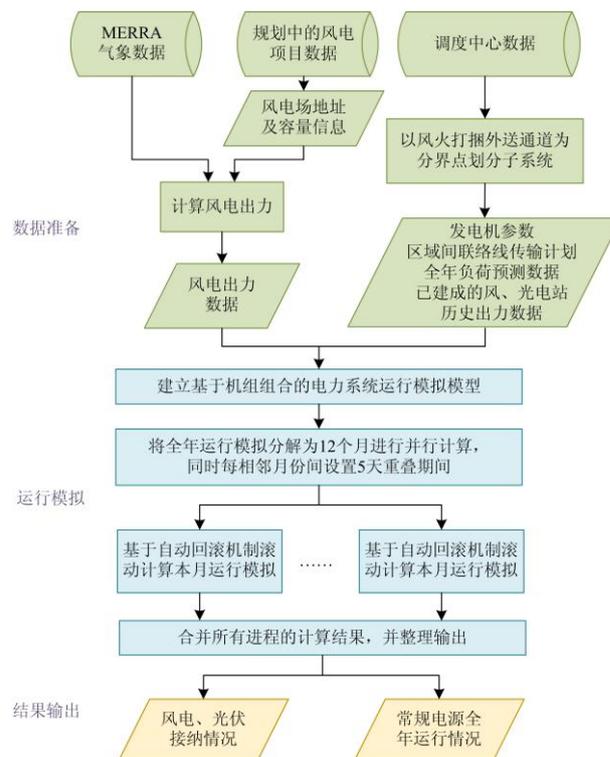


图 2 电力系统时序运行模拟的三阶段仿真框架

Fig. 2 Structure of the chronological operation three-stage simulation framework

2.1 数据准备

已建成新能源电站出力、用电需求、区域间联络线计划的全年时序数据可由历史数据结合经济发展预期折算生成^[25], 这里不再详述。本节主要介绍利用气象数据获取海上风电出力的方法。

现代反演气象数据库(Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, MERRA)收录了美国国家航空航天局通过气象模型反演得到的全球各地区从 1979 年至今的小时级气象数据, 包括风速、风向、太阳辐照强度、气温等各类数据。其中, 风速主要为距地面/海面 10 m 和 50 m 高度的数据。考虑到大多数风机轮毂高度距地面高度已经超

过 60 m, 本文采用最小二乘指数定律(Least Square Power Law)^[26]由 10 m 和 50 m 高度的风速外推轮毂处风速:

$$S_x = S_R \left(\frac{D_x}{D_R} \right) \alpha^{LS} \quad (1)$$

式中: D_x 为风机轮毂高度; S_x 为 D_x 处的风速; D_R 为参考高度; S_R 为 D_R 处的风速; α^{LS} 为最小二乘的摩擦系数, 可由式(2)得到。

$$\alpha^{LS} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{S_i}{S_R}\right) \ln\left(\frac{D_i}{D_R}\right)}{\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{D_i}{D_R}\right)^2} \quad (2)$$

式中: S_i 为 D_i 高度下的风速; n 为参考高度之外其他高度风速的总数, 由于 MERRA 仅提供了 10 m 和 50 m 处的风速, 选择其中一组为参考高度风速数据后, 仅剩一组数据, 即 $n=1$ 。

由式(1)、式(2)得到轮毂高度处的风速数据后, 结合规划风电场使用的风机型号所对应的风速-功率曲线即可得到风机的输出功率。考虑某个风电场各台风机风速相近, 整个风电场出力 P_{wind} 可由所有风机出力加和并叠加尾流效应得到。

$$P_{wind} = \beta \sum_{k=1}^N p_{wind,k} \quad (3)$$

式中: $p_{wind,k}$ 为风电场中第 k 台风机输出功率; N 为风电场中风机总台数; β 为尾流效应带来的折扣因子, 本文中取为 0.95^[27]。

2.2 机组组合模型

时序运行模拟使用小时级的机组组合模型, 以总运行成本最小为目标安排各个时段的机组启停和出力情况以平衡负荷需求。为了兼顾环保性与经济性, 模型还在目标函数中叠加了弃风、弃光惩罚。需要说明的是, 考虑到受端系统自身可能已经装机部分风电与光伏, 因此模型中依然保留了光伏部分。但本文关注的是风火打捆容量配比的整定问题, 因此后文的相关分析仅围绕送端部分的风电与火电展开。

(1) 目标函数

本文使用的电力时序运行模拟框架将电网分成 j 个子系统, 可以建模为一个混合整数线性规划模型(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)。目标函数主要由四部分组成: 开机成本 $O_i^{SU}(t)$ 、停机成本 $O_i^{SD}(t)$ (线性函数建立)、发电成本 $O_i^G(t)$ (分段线性形式表示以降低煤耗误差)以及弃风、弃光惩罚。

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^H \sum_{i \in G_j} [O_i^G(t) + O_i^{SU}(t) + O_i^{SD}(t)] + \\ & \gamma^{\text{solar}} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^H [\bar{p}_{\text{solar},j}(t) - p_{\text{solar},j}(t)] + \\ & \gamma^{\text{wind}} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^H [\bar{p}_{\text{wind},j}(t) - p_{\text{wind},j}(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: G_j 是第 j 个子系统的发电机总数; H 表示总运行时间, 此处为一年, 即 8760 h; γ^{solar} 和 γ^{wind} 表示弃光、弃风电量带来的经济惩罚; 单位元/MW; $\bar{p}_{\text{solar},j}(t)$ 、 $\bar{p}_{\text{wind},j}(t)$ 表示子系统 j 光伏、风电在 t 时刻的最大可出力; $p_{\text{solar},j}(t)$ 、 $p_{\text{wind},j}(t)$ 表示子系统 j 光伏、风电在 t 时刻的实际出力。

(2) 约束条件

考虑的约束条件包括功率平衡约束、备用约束、子系统间输电通道静态稳定极限约束、发电机爬坡约束以及最小启停时间约束。

每个子系统的功率平衡约束为

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i \in G_j} p_{G,i}(t) + p_{\text{wind},i}(t) + p_{\text{solar},i}(t) + p_{\text{TL},j}(t) - p_{\text{TO},j}(t) &= P_{L,j}(t) \\ \forall t, j \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: $p_{G,i}(t)$ 表示发电机 i 在 t 时刻的输入功率; $p_{\text{TL},j}(t)$ 、 $p_{\text{TO},j}(t)$ 分别表示子系统间联络线的流入和流出功率。

每个子系统的安全备用约束为

$$\begin{aligned} \sum_{i \in G_j} [u_i(t) \bar{p}_{G,i} - p_{G,i}(t)] + [(1 - \mu_{\text{wind},j}) \bar{p}_{\text{wind},i}(t) - p_{\text{wind},j}(t)] + \\ [(1 - \mu_{\text{solar},j}) \bar{p}_{\text{solar},i}(t) - p_{\text{solar},j}(t)] \geq \eta_{L,j} P_{L,j}(t) \quad \forall t, j \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\bar{p}_{G,i}$ 表示发电机 i 的额定容量; $u_i(t)$ 取 0 或 1, 分别表示发电机 i 的运行、停机状态; $\mu_{\text{wind},j}$ 和 $\mu_{\text{solar},j}$ 分别表示子系统 j 的风电、光伏出力预测的最大误差, 由于目前电力系统最小开机方式下一般不考虑可再生能源出力, 因此取为 100%; $\eta_{L,j}$ 取 5%, 表示最大备用需求系数。

子系统间输电通道静态稳定极限约束为

$$-\bar{p}_{ji}(t) \leq p_{ij}(t) \leq \bar{p}_{ij}(t) \quad (7)$$

式中: $p_{ij}(t)$ 表示子系统 i 向子系统 j 传输的功率; $\bar{p}_{ij}(t)$ 、 $\bar{p}_{ji}(t)$ 分别表示由子系统 i 向子系统 j 送电、子系统 j 向子系统 i 送电的通道静态稳定极限。

电源出力范围约束。对于火电和水电机组来说, 开机时出力应不小于最小技术出力, 即其出力在额定容量与最小出力之间变化; 对于光伏、风电来说,

t 时刻的出力不能超过风速、光照决定的最大出力, 因此:

$$\begin{cases} u_{G,i}(t)p_{G,i} \leq p_{G,i}(t) \leq u_{G,i}(t)\bar{p}_{G,i} & \forall t, i \\ 0 \leq p_{\text{solar},j}(t) \leq \bar{p}_{\text{solar},j} & \forall t, j \\ 0 \leq p_{\text{wind},j}(t) \leq \bar{p}_{\text{wind},j} & \forall t, j \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\underline{p}_{G,i}$ 表示发电机 i 的最小技术出力。

发电机爬坡约束为

$$\begin{cases} p_{G,i}(t) - p_{G,i}(t-1) \leq e_{A,i}\bar{p}_{G,i} + K[(1-u_i(t-1))] + \\ \quad K[(1-u_i(t))] & \forall t, i \\ p_{G,i}(t-1) - p_{G,i}(t) \leq e_{B,i}\bar{p}_{G,i} + K[(1-u_i(t-1))] + \\ \quad K[(1-u_i(t))] & \forall t, i \end{cases} \quad (9)$$

式中: $e_{A,i}$ 和 $e_{B,i}$ 分别表示发电机 i 的最大上爬坡速率、最大下爬坡速率; K 为常数, 设置的目的是避免 $u_i(t)$ 或 $u_i(t-1)$ 不全为 1 时式(9)不成立。当发电机启停时, 爬坡约束变为

$$\begin{cases} p_{G,i}(t) \leq e_{A,i}\bar{p}_{G,i} + Ku_i(t) & \forall t, i \\ p_{G,i}(t) \leq e_{B,i}\bar{p}_{G,i} + Ku_i(t+1) & \forall t, i \end{cases} \quad (10)$$

最小启停机约束。一般来说, 发电机组应避免频繁启停机, 每两次相邻停机之间、每两次相邻开机之间都应该留有一定的时间间隔, 故有

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^{t+T_{A,i}(t)-1} u_i(\tau) \geq T_{A,i}(t)[u_i(t) - u_i(t-1)] & \forall t, i \\ \sum_{\tau=t}^{t+T_{B,i}(t)-1} [1-u_i(\tau)] \geq T_{B,i}(t)[u_i(t-1) - u_i(t)] & \forall t, i \end{cases} \quad (11)$$

式中, $T_{A,i}(t)$ 和 $T_{B,i}(t)$ 表示发电机 i 在 t 时刻需要继续保持运行或停机状态的时间, 可由式(12)计算得到。

$$\begin{cases} T_{A,i}(t) = \min\{I_{A,i}, T - t + 1\} \\ T_{B,i}(t) = \min\{I_{B,i}, T - t + 1\} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $I_{A,i}$ 和 $I_{B,i}$ 分别表示两次停机之间的最小运行时间以及两次启动之间的最小停机时间。

3 暂稳极限校核与调整

为了方便计算, 在电力系统时序运行模拟中, 将风火打捆外送通道的静态稳定极限作为通道输电能力的约束条件。然而, 在电力系统实际运行中, 通道输电能力经常受到暂稳极限约束而无法充分利用, 因此需要结合通道的暂稳极限对时序模拟的运行结果进一步调整与校核, 以使其满足暂稳约束。

为了保证风电的充分消纳, 本文考虑不改变各个时刻的风电出力, 而仅降低火电出力。前文已经提到, 在风火容量一定的前提下, 输电通道的暂稳极限与风火出力配比相关, 但影响规律仅有定性的

结论而缺乏定量的表达。本文假设输电通道暂稳极限仅与火电出力相关。选择火电出力从其最小技术出力到额定容量之间等间隔的一系列典型值, 在每种火电出力水平下, 不断提高风电出力, 直至达到输电通道暂稳极限。由此可得到每种典型火电出力值下的输电通道暂稳极限。最后, 通过分段线性插值可求出任意火电出力下的通道暂稳极限。对于时序模拟运行结果的调整即依此进行, 具体方法如下:

(1) 首先通过暂态仿真软件寻找到不同风火出力配比下的输电通道暂稳极限, 分段线性插值后获得火电出力-通道暂稳极限对应曲线。

(2) 输入时序模拟的运行结果, 由全年火电出力时序曲线求得全年暂稳极限变化曲线, 之后与通道全年实际的输送功率对比, 筛选出存在暂稳受限的时刻。

(3) 针对受限的时刻, 按同一比例 λ 调低所有火电出力, 因调低火电出力造成的缺口考虑由风火打捆受端系统自行平衡。

(4) 调低后的火电出力替代时序运行模拟的数据, 得到更新后的时序模拟结果; 根据火电出力-暂稳极限对应曲线, 获取新一轮的外送通道全年暂稳极限曲线。

(5) 利用更新后的时序模拟结果和全年暂稳极限曲线重复步骤(2)一步骤(4), 直至全年受限时刻数为 0 或火电出力降至最小技术出力。

每次调低的步长 λ 决定了校核结果的精度, 步长越小, 最终校核的结果与暂稳极限越贴合, 通道的利用率越高。但与此同时, 需要调整的次数也会越大, 耗时增加。上述调整过程可以用图 3 表示。

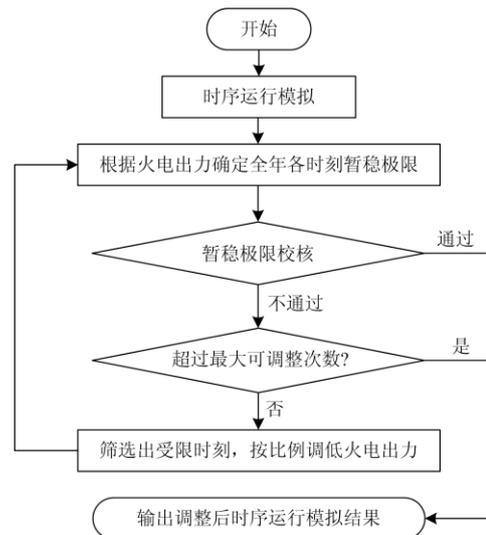


图 3 暂稳校核与调整流程图

Fig. 3 Diagram of transient stability check and adjustment

4 算例分析

下面以珠西北地区“风火打捆”外送场景为例，验证所提方法的有效性。根据广东电网“十四五”规划，阳江附近海面共规划海上风电约 6 600 MW，其中部分风电计划与博贺电厂、阳西 B 厂共 4 台机组、4 480 MW 大型煤电打捆，通过粤西开关站-卧龙 500 kV 交流通道送往珠西北地区消纳，因此需要为煤电配置合适比例的海上风电。利用 Matlab 平台建立珠西北地区的小时级时序运行模拟模型，求解步长设置为 1 h，调用优化软件 Cplex 对模型进行求解。

考虑到线路受限往往发生在区域间联络线，将计算区域划分为两个子系统，忽略各子系统内部的网架约束，仅保留子系统间的网架约束。粤西开关站一侧设为子系统 1，主要包括博贺、阳西 B 厂及接入粤西开关站的海上风电；卧龙站一侧为子系统 2，涵盖珠西北地区其他部分。子系统间联络线即为粤西开关站-卧龙外送通道，静态稳定极限 7 000 MW。

4.1 海上风电出力数据生成

假设风机轮毂高度为 100 m，从 MERRA 获取海上风电场址处 2019 年全年 8 760 时段的 10 m、50 m 处风速数据，经 2.1 节介绍方法转换得到风电场全年最大出力时序曲线。考虑到风速对不同年份并不敏感，该曲线可直接作为 2025 年的时序数据。最终结果如图 4、图 5 所示。图 4 展示了风电场全年出力率的时序曲线，图 5 展示了全年各月的月最大出力率、月平均出力率及月最小出力率。其中，月最大出力定义为去除前 5% 最大出力后，取保证率为 95% 时所对应的出力；月最小出力定义为去除前 5% 的最小出力，取保证率为 95% 时对应的出力。

由图 4、图 5 可知，风电场冬季月最大出力约为 100% 左右，夏季月最大出力明显低于冬季，6 月、7 月和 9 月最大出力在 58%~100% 左右。冬季月最小出力约 0%~3%，夏季月最小出力基本为 0%。平均出力年内分布不均，整体呈冬大夏小的特点，月平均出力最大出现在 11 月，为 70% 左右，平均出力最小出现在 5 月，为 18% 左右。

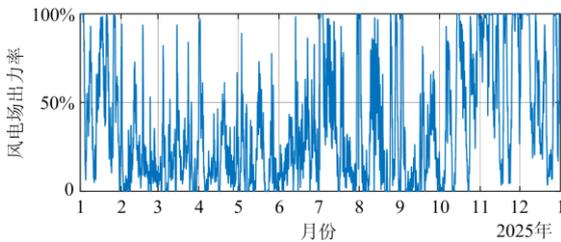


图 4 由气象数据生成的全年风电场出力率时序曲线
Fig. 4 Time series curve of annual wind farm output rate generated from meteorological data

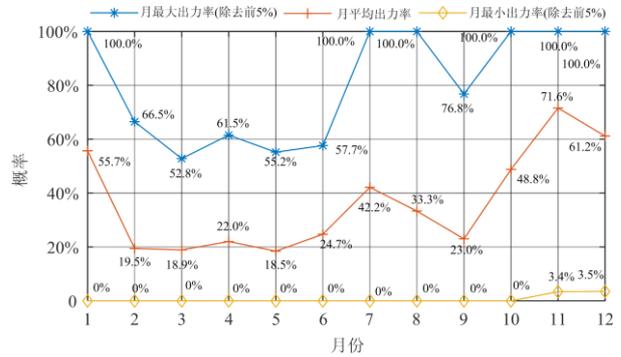


图 5 全年各月出力特性

Fig. 5 Monthly output characteristics throughout the year

4.2 配置 4 000 MW 海上风电时运行及调整结果

首先以配置 4 000 MW 海上风电为例，验证时序运行模拟框架及暂稳校核方法的有效性。

经暂态仿真可得，当 4 480 MW 火电满出力时，通道的暂态稳定极限最低，为 4 900 MW，此时仅能送出 420 MW 海上风电，而当火电出力降低至其最大出力的 57% 后，输电通道的暂稳极限可达到 7 000 MW，即输电通道的静态稳定极限。最终得到火电出力与通道暂稳极限对应曲线如图 6 所示。

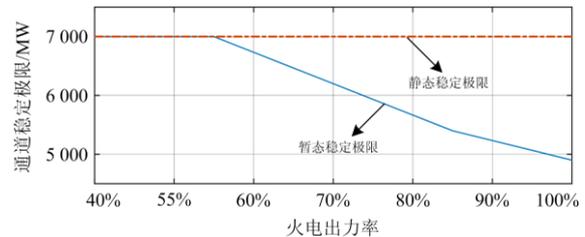


图 6 不同火电出力率下的输电通道极限

Fig. 6 Limitation of transmission channel under different thermal power output rates

表 1 展示了珠西北地区时序运行模拟以及经暂稳极限校核与调整后的结果。通道的年均利用率 η_{line} 定义为

$$\eta_{line} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} P_{line-i} t_i}{P_{cap} \sum_{i=1}^{8760} t_i} \quad (13)$$

式中： P_{line-i} 为输电通道在第 i 个时段的输送功率； t_i 为一个时段，即 1 h； P_{cap} 为通道的静态稳定极限。在未考虑暂稳极限时，时序运行模拟假设粤西开关站-卧龙通道输电极限为其静态稳定极限 $P_{cap} = 7 000$ MW。利用图 6 所示的火电出力与输电通道暂稳极限关系对结果进行校核可知，全年共有 243 个

时段通道送出功率超过了其暂稳极限, 在此期间, 故障后存在暂态失稳的风险。其中最大受限功率 2 072.6 MW, 占通道静态稳定极限的 29.6%, 受限情况严重。进一步利用第 3 节所提出的调整方法, 降低受限时段“风火打捆”送出的火电出力, 全年暂稳受限的小时数降至 0, 输电通道受暂稳约束的情况得到改善。每次调低的比例系数 λ 设置为 0.01, 即每次仅调低 1% 的火电出力, 以避免对火电出力调低过多而对其经济性带来影响。而最终的结果也表明, 子系统 1 中需打捆送出的火电年均利用小时数仅减少了 18.6 h, 经济性受影响较小。

表 1 配置 4 000 MW 海上风电时时序运行模拟结果

Table 1 Simulation results of chronological operation when configuring 4 000 MW offshore wind power

统计项目	暂稳调整前	暂稳调整后
子系统 1 火电年均利用小时数/h	4 161.2	4 142.6
全网火电年均利用小时数/h	3 712.4	
弃风率	0.79%	
输电通道年均利用率	66.78%	66.54%
暂稳受限小时数/h	243	0
最大受限功率/MW	2 072.6	0

图 7 以 7 月 18 日为例, 展示了每个时段的风、火电出力以及对应的通道暂稳极限模拟结果。由图 7(a)可知, 未经暂稳调整之前, 09:00—16:00 以及 19:00—21:00 风火电出力之和, 即需经输电通道送出的功率超过了此时的暂态稳定极限, 输电通道存在暂稳风险。而由图 7(b)可知, 经过调整之后, 全天所有时段均未出现暂稳受限的情形, 系统安全性得到保证。

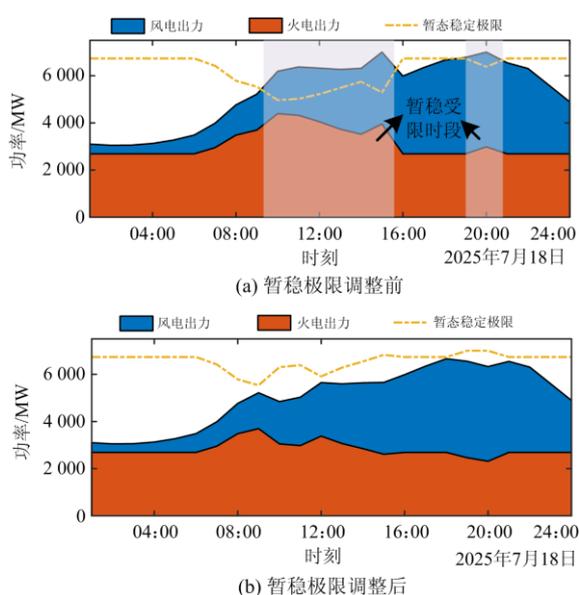


图 7 7 月 18 日暂稳受限情况

Fig. 7 Transient stability restrictions on July 18

4.3 风火打捆容量的推荐配比

待接入粤西开关站风电规模为 1 600~6 400 MW, 因此共设置 1 600 MW、2 400 MW、3 200 MW、4 000 MW、4 800 MW、5 600 MW、6 400 MW 7 个水平, 对应风火容量配比分别约为 0.35:1、0.53:1、0.71:1、0.89:1、1.07:1、1.25:1、1.42:1。在 7 种风电容量水平下, 分别进行时序运行模拟, 并结合暂稳约束要求对结果进行调整, 得到最终结果。下面分别从环保性、安全性和经济性的角度对结果进行分析。

(1) 环保性: 弃风率为环保性指标, 定义综合弃风率小于 5% 时系统满足环保性要求。图 8 展示了 7 种容量水平下的系统弃风率和弃风电量, 由图 8 可知, 弃风率及弃风电量随接入海上风电容量规模的增加而提高, 但所有风电容量水平下, 弃风率均小于 1%, 仍处于较低的水平, 环保性满足要求。

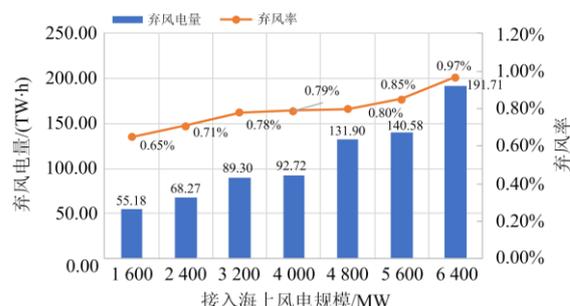


图 8 配置不同海上风电容量时弃风情况

Fig. 8 Wind cut when offshore wind power of different capacities configuring

(2) 安全性: 该原则主要涉及两个问题。一是调频方面的要求, 经过校核, 7 个水平的风火配比均符合《风电场接入电力系统技术规范》中有关火电调频能力与风电波动性的匹配要求。二是暂稳约束方面的要求, 图 9 展示了 7 种风电容量水平下全年通道暂稳受限的功率及对应的时刻。总体来说, 暂稳受限情形常发生在夏季用电负荷较大及冬季海上风电出力较大的时段。表 2 统计了 7 种风电水平下的暂稳受限小时数。结合表 2 和图 9 可知, 随着接入风电容量规模的增加, 通道的暂稳受限小时数不断提高, 暂稳受限的情况逐渐加重。而经过本文所提方法调整, 所有水平下的暂稳受限小时数都降到 0, 暂稳受限情况得到改善。综合这两方面的分析可知, 所有风电水平均满足安全性要求。

(3) 经济性: 在满足环保性和安全性的前提下, 主要从经济性的角度给出推荐的风火配比。所有 7 种水平海上风电容量下的火电年利用小时数与输电通道利用率如图 10 所示。由图 10 可知, 增大接入

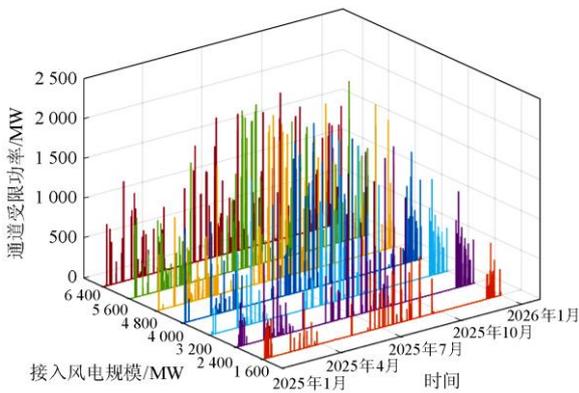


图9 配置不同容量海上风电时 2025 年通道暂稳受限情况
Fig. 9 Transient stability restrictions in 2025 when offshore wind power of different capacities configuring

表 2 配置不同容量海上风电时 2025 年通道暂稳受限小时数

Table 2 Transient stability restricted hours in 2025 when offshore wind power of different capacities configuring

接入风电容量/MW	1 600	2 400	3 200	4 000	4 800	5 600	6 400
调整前暂稳受限小时数/h	142	162	181	243	310	368	374
调整后暂稳受限小时数/h	0	0	0	0	0	0	0

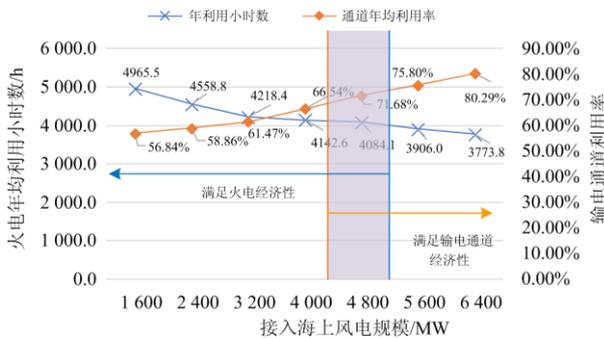


图 10 配置不同容量海上风电时系统经济性

Fig. 10 System economics when offshore wind power of different capacities configuring

系统的海上风电容量,海上风电将与打捆的火电“抢占”输送容量,火电的年利用小时数下降。另一方面,火电出力的减少同时提高了输电通道的暂稳极限,输电通道的年均利用率提高。因此,通过设定期望的火电经济性与输电通道经济性指标,即可得出推荐的接入海上风电容量。本文中设定:火电年均利用小时数不应低于 4 000 h,输电通道利用率不

应低于 70%。根据这两项指标进行筛选可知,仅有接入 4 800 MW 容量海上风电时满足要求,因此推荐接入的海上风电规模为 4 800 MW,此时风火配比为 1.07:1。

需要说明的是,由于该算例中弃风率始终处于较低水平,因此未对风火配比的选择产生约束。但将本文所提方法应用于其他算例时,弃风率也可能成为限制条件用于指导最终配比的整定。

5 结论

合适地整定风火容量配比是保证风火打捆送出效果的关键。本文针对目前风火打捆规划中存在的实际问题,提出了将基于气象数据的时序运行模拟与暂稳极限校核相结合的风火容量最优配比整定方法,并用该方法对广东电网珠西北地区的海上风电接入规模进行分析,得到如下结论:

(1) 基于气象数据的时序运行模拟模型通过引入气象数据估算海上风电出力的时序特性,有效解决了规划中的风电缺乏实际数据难以模拟的问题。此外,该模型以总运行成本最低,同时惩罚弃风、弃光,在兼顾环保性与经济性的前提下得到各类型机组的组合方式。

(2) 输电通道往往受到潜在的暂稳约束而无法将打捆的风火电完全送出,通过对时序运行模拟的数据进行暂稳校核与调整,可以在消除暂稳风险的前提下避免对送出火电和输电通道的经济性造成较大影响。

(3) 针对珠西北地区“十四五”期间海上风电规划的具体算例,经过时序运行模拟及暂稳极限校核与调整,推荐以 1.07:1 的风火配比接入海上风电,该比例下弃风率为 0.80%,打捆火电年利用小时数 4 084.1 h,输电通道利用率为 71.68%,暂稳受限小时数为 0,具有较好的环保性、安全性与经济性。

在未来,还可从以下两个方面对本文所提方法进行进一步的优化:

(1) 本文采取的对时序运行模拟结果进行进一步暂稳校核与调整的方法仅可看作是对目前时序运行模拟框架的一种补救措施。未来的研究应考虑如何在时序运行模拟的模型中体现出暂稳约束,从而使运行结果直接满足安全性要求。

(2) 对于目前的时序运行模拟模型而言,当模拟的空间范围增大、模型变量增多或规划的风火容量变化范围扩大、待选择的风火容量配比数目增加时,整个方法的计算效率会严重降低。因此需要考虑提高模型的计算速度,使得模型能够在更大的时间尺度或者更大的空间范围上进行模拟。

参考文献

- [1] 昌力, 庞伟, 严兵, 等. 可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 158-165.
CHANG Li, PANG Wei, YAN Bing, et al. Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 158-165.
- [2] 张立波, 高骞, 周勤勇, 等. 考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 62-69.
ZHANG Libo, GAO Qian, ZHOU Qinyong, et al. Transmission network expansion planning considering probabilistic model of renewable power and interval model of predicted load[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 62-69.
- [3] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [4] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [5] 曹相阳, 杨斌, 陈达伟, 等. 基于有效出力曲线的最大风光装机容量评估[J]. 广东电力, 2020, 33(4): 17-24.
CAO Xiangyang, YANG Bin, CHEN Dawei, et al. Maximum wind and solar installed capacity assessment based on effective output curve[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(4): 17-24.
- [6] 傅春翔, 汪天呈, 酆洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [7] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [8] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的VSC-HVDC系统主网侧交流故障穿越方案[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 146-154.
WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 146-154.
- [9] 王锡凡, 王碧阳, 王秀丽, 等. 面向低碳的海上风电系统优化规划研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 4-13.
WANG Xifan, WANG Biyang, WANG Xiuli, et al. Study of optimal planning methods for offshore wind power systems oriented low-carbon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 4-13.
- [10] 杨林刚, 徐志辉, 王霄鹤, 等. 柔性直流送出的海上风电场谐波谐振问题分析[J]. 广东电力, 2020, 33(7): 1-10.
YANG Lingang, XU Zhihui, WANG Xiaohu, et al. Analysis on harmonic resonance of offshore wind farm transmitted by VSC-HVDC system[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(7): 1-10.
- [11] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [12] 杨尉薇, 朱玲, 李威, 等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 58-64.
YANG Weiwei, ZHU Ling, LI Wei, et al. Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 58-64.
- [13] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [14] 沙志成, 王艳, 郑帅. 风火打捆比例对直流孤岛系统稳定性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 148-154.
SHA Zhicheng, WANG Yan, ZHENG Shuai. Study on the effect of wind-thermal installed capacity ratio on the

- stability of DC islanded system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 148-154.
- [15] 张强, 冯艳虹, 王绍德. 特高压交流通道风火联合送电问题研究[J]. *中国电力*, 2012, 45(6): 1-4.
ZHANG Qiang, FENG Yanhong, WANG Shaode. Research on UHV AC transmission of combined electricity generated from wind and thermal[J]. *Electric Power*, 2012, 45(6): 1-4.
- [16] 王智冬, 刘连光, 刘自发, 等. 基于量子粒子群算法的风火打捆容量及直流落点优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(13): 2055-2062.
WANG Zhidong, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Optimal configuration of wind & coal power capacity and DC placement based on quantum PSO algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(13): 2055-2062.
- [17] 董吉哲, 谢开贵, 马冲, 等. 计及风速和负荷特性的风火打捆发电系统规划[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(15): 59-66.
DONG Jizhe, XIE Kaigui, MA Chong, et al. Optimal planning of bundled wind-thermal generation power systems considering wind speed and load characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15): 59-66.
- [18] LIAO S, YAO W, HAN X, et al. Chronological operation simulation framework for regional power system under high penetration of renewable energy using meteorological data[J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 816-828.
- [19] 王树东, 王阔, 高翔, 等. 风电比例对风火打捆系统暂态稳定性影响[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2016(3): 8-12.
WANG Shudong, WANG Kuo, GAO Xiang, et al. Influence of proportion of wind power to wind-thermal bundled system transient stability[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2016(3): 8-12.
- [20] 曹喜民, 刘天琪, 李兴源. 风火电打捆输电系统风火电配置比例研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2015, 36(2): 166-170.
CAO Ximin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Wind/thermal power allocation ratio for transmitting wind power bundled with thermal power[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2015, 36(2): 166-170.
- [21] 曹喜民, 刘天琪, 李兴源, 等. 风火电配置比例对风火打捆系统暂态稳定性的影响[J]. *华东电力*, 2014, 42(5): 853-858.
CAO Ximin, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Influence of wind-thermal installed capacity ratio to wind-thermal bundled system transient stability[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(5): 853-858.
- [22] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(20): 34-40.
TANG Yi, ZHAO Lili, GUO Xiaojiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(20): 34-40.
- [23] 郭小江, 赵丽莉, 汤奕, 等. 风火打捆交直流外送系统的暂态稳定问题研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(22): 19-25.
GUO Xiaojiang, ZHAO Lili, TANG Yi, et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(22): 19-25.
- [24] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(1): 108-114.
- [25] 张岩, 代贤忠, 李振伟, 等. 基于时序生产模拟的区域电网新能源消纳能力研究[J/OL]. *中国电力*: 1-7[2020-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200804.1425.002.html>.
ZHANG Yan, DAI Xianzhong, LI Zhenwei, et al. Temporal production simulation based renewable energy integration capacity assessment in regional power system under the new circumstances[J/OL]. *Electric Power*: 1-7 [2020-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200804.1425.002.html>.
- [26] ARCHER C L, JACOBSON M Z. Evaluation of global wind power[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110.
- [27] SCHWARTZ M, HEIMILLER D, HAYMES S, et al. Assessment of offshore wind energy resources for the United States[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2010.

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-02-25

作者简介:

刘新苗(1986—), 男, 硕士, 研究方向为电网规划、系统运行分析等; E-mail: liuxinmiao.csg@139.com

赵一帆(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yf_zhao2181@hust.edu.cn

姚伟(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、可再生能源并网系统的稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 魏小丽)