



海上风电集群与火电打捆外送系统低电压穿越特性

余浩 王盼盼 段瑶 田书新 陈武晖

Low Voltage Ride Through Characteristics of Bundled Transmission System with Offshore Wind Power Cluster and Thermal Power

YU Hao, WANG Panpan, DUAN Yao, TIAN Shuxin, CHEN Wuhui

引用本文:

余浩, 王盼盼, 段瑶, 等. 海上风电集群与火电打捆外送系统低电压穿越特性[J]. *现代电力*, 2022, 39(6): 739–748. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0345

YU Hao, WANG Panpan, DUAN Yao, et al. Low Voltage Ride Through Characteristics of Bundled Transmission System with Offshore Wind Power Cluster and Thermal Power[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(6): 739–748. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0345

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0345>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型风力发电用电压跌落发生器

A Novel Voltage Sag Generator for Wind Farm

现代电力. 2021, 38(2): 187–192 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0307>

自适应解列孤岛多馈入短路比快速计算方法

Fast Computing of Multi-feeding Short Circuit Ratio for Adaptive Islanding

现代电力. 2018, 35(1): 84–88 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I1/84>

交流系统短路比和阻抗角对模块化多电平高压直流输电系统低频段振荡模态的影响

Impact of AC System Short-Circuit Ratio and Impedance Angle on Low Frequency Oscillation Mode in MMC-HVDC System

现代电力. 2022, 39(2): 151–159 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0081>

基于博弈论的风火打捆参与大用户直购策略

Strategy of Large Consumer Direct Purchasing and Wind-thermal Combined Generation Based on Game Theory

现代电力. 2020, 37(2): 212–220 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0857>

直驱风机对火电机组次同步振荡的影响及抑制方法

Impact of PMSG to Thermal Power Units on Sub-synchronous Oscillation Characteristics and Suppression Strategy

现代电力. 2019, 36(5): 31–38 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/31>

送端交流不对称故障下LCC-MMC-HVDC穿越控制策略研究

Ride-through Control of LCC-MMC-HVDC Under Asymmetrical Faults at the Sending End

现代电力. 2019, 36(4): 48–56 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I4/48>

海上风电集群与火电打捆外送系统低电压穿越特性

余浩¹, 王盼盼², 段瑶¹, 田书新², 陈武晖²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东省广州市 510080;

2. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030024)

Low Voltage Ride Through Characteristics of Bundled Transmission System with Offshore Wind Power Cluster and Thermal Power

YU Hao¹, WANG Panpan², DUAN Yao¹, TIAN Shuxin², CHEN Wuhui²

(1. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong Province, China;

2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China)

摘要: 海上风电集群与火电打捆外送系统的低电压穿越问题的研究具有重要的理论和实际意义。基于此, 针对某海上风电集群与火电打捆实际规划场景, 首先提出了风电集群中非故障风电场会恶化故障风电场低电压穿越的电网环境, 风电集群对电网的低电压穿越支撑能力的要求更高。然后, 从火电机组对系统短路比的提升作用和火电机组的无功支持作用 2 个方面, 揭示了火电机组对海上风电集群的低电压穿越提升作用。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了某实际规划的海上风电集群与火电打捆外送场景, 从时域角度证明上述理论分析的合理性。

关键词: 低电压穿越; 风火打捆; 短路比; 三相短路; 无功支撑

Abstract: It is of significant theoretical and practical meaning to research the low voltage ride through (abbr. LVRT) characteristics of bundled transmission system composed of offshore wind power cluster and thermal power units. For this reason, in allusion to the actual planning scenario of a realistic bundled offshore wind power cluster and thermal power units, firstly, it was proposed that the non-failure wind farm in the offshore wind power cluster might deteriorate the grid environment of LVRT of faulty wind farm, therefore the wind farm cluster made a higher request for the supporting capacity of LVRT of the grid. Secondly, from the two aspects, i.e., the promotion of system short circuit ratio because of thermal power units and reactive support from thermal power units, the promotion of LVRT of offshore wind farm cluster by thermal power units

基金项目: 南方电网公司科技项目 (037700KK52190012 (GDKJXM20198282))

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation (037700KK52190012 (GDKJXM20198282))

was revealed. Finally, in the platform of PSCAD/EMTDC a scene of bundled power delivery composed of practically planned offshore wind power cluster and thermal power units was built, and the reasonability of abovementioned theoretical analysis was proved from the viewpoint of time-domain.

Keywords: low voltage ride-through; wind and fire bundling; short circuit ratio; Three-phase short circuit; Reactive support

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0345

0 引言

随着全球一次能源的不断减少以及“双碳”目标的提出, 提升新能源在电力系统中的比例, 逐步形成以新能源为主的新型电力系统, 已经成为国家战略要求。风力发电是新能源发电当中发展比较成熟的一种。相比陆上风电, 海上风电具有更丰富的风能资源、年利用小时数高、节省土地资源等优点。海上风电在广东、江苏、山东等省份迅速发展, 目前在电力系统当中占据相当规模。广东电网海上风电发展迅速, 截止 2021 年 7 月底, 广东海上风电装机 1472 MW。但海上风电依赖于天气与气候的变化, 因此具有间歇性、波动性与不确定性, 这对电能质量与电网稳定性都是巨大的挑战。

为平抑海上风电的波动性和间歇性对输电通道及系统功率平衡的影响, 海上风电通常与火电打捆外送。为确保海上风电与火电打捆外送系统的稳定性与安全性, 相关学者在外送系统稳定性方面, 其中风、火配置比例与方案, 风、火打捆系统次同步振荡以及风、火打捆调控策略等方面

进行了较多的研究。文献 [1-2] 从风、火打捆直流输电系统稳定性出发, 研究对比了不同风、火配比下的影响, 提出最优风、火容量配置比例; 文献 [3] 综合考虑了输电成本与火发电机组的影响, 结合风电场持续出力曲线给出了最优的风、火配置方案; 文献 [4-5] 分别基于风、火打捆系统风机与直流输电的动态交互问题和线路串补度等, 进一步研究了风、火打捆系统的次同步振荡产生机理与抑制措施; 文献 [6] 从系统暂态稳定性角度, 研究了电力系统稳定器与静止同步串联补偿器对风、火打捆系统低频振荡的削弱作用; 文献 [7] 基于扩展等面积定则, 分析了风电场选址与火电机组出力等因素对系统暂态功角稳定性的影响; 文献 [8-9] 针对目前风、火打捆系统存在的有功控制问题, 结合中国风电输送调度现状, 给出了风、火打捆有功控制系统的智能调节策略。尽管风、火打捆技术研究发展迅速, 但低电压穿越问题在风、火打捆安全稳定运行当中作为关键性技术, 目前研究仍然很少涉及。

在风电场低电压穿越方面, 文献 [10] 基于 6 台 1.5 MW 永磁直驱式风机研究了单相与三相短路故障下, 风电机组通过降低有功功率, 增大无功功率维持电网电压; 文献 [11] 采用 12 台 0.989 MW 的风力发电机, 分析了静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 控制策略在低电压穿越当中的正确性。但单台或小容量风机研究在风、火打捆实际场景中缺少适用于我国风电集中开发并网的场景。文献 [12] 基于 150 台 2 MW 变速风机, 对电压故障下不同接入方案进行比较, 分析了系统接入方案与风电场接入方案对低电压穿越的影响; 文献 [13] 在 80 台 1.5 MW 风机基础上, 利用变异系数法对风电场进行性能评估, 进而调整各台风力发电机的无功出力, 故障发生时支撑电网电压; 文献 [14-15] 侧重考虑打捆系统中双馈风机的影响, 证明了撬棒保护在故障穿越中的作用。以上风电场低电压穿越研究仅考虑了风电场低电压穿越, 更加侧重风电场本身, 未考虑大规模风电场集群之间动态耦合对故障风电场低电压穿越的影响, 也没有计及风电集群与打捆火电之间的相互耦合对低电压穿越的影响。

由上述分析可知, 当前研究主要针对单个风电场的低电压穿越问题, 而随着“十四五”规划的提出, 基地式集中连片开发成为我国海上风电

开发的主流模式, 多个风电场集中并网故障期间各风电场之间的动态特性耦合、各风电场故障期间的相互影响、低电压穿越过程特性复杂等问题, 亟需进一步研究。而且风电集群与打捆火电之间的相互耦合对低电压穿越的影响也需要进一步研究。

本文在总结国内外风电场低电压穿越标准的基础上, 应用风、火打捆系统的短路比和火电机组的无功调整机理, 从理论角度解释了火电提升了海上风电与火电打捆系统电压的支撑能力, 进而指出火电对多风电场的低电压穿越能力也有一定程度的提升。并在 PSCAD/EMTDC 中搭建某实际规划场景的海上风电集群与火电打捆系统模型进行仿真验证, 结果表明: 火电机组提升了与其打捆的风电集群的低电压穿越能力。而在风电集群单独外送系统中, 由于多风电场之间动态相互作用导致故障风电场的电压、电流以及功率等发生振荡, 即使在电压跌落至额定电压 75% 的情况下也可能无法实现低电压穿越; 在故障风电场电压跌落严重的情况, 可能导致非故障风电场也无法正常运行。这些研究结果验证了上述理论分析的合理性。

1 我国风电场低电压穿越

电力系统中电网短路故障是较为常见且后果也比较严重的一类故障, 电网发生短路故障常常引起风电场并网点母线不同程度的电压跌落, 风机无法像火电机组一样在电力系统发生故障时对系统提供一定的无功与有功功率协助系统恢复稳定, 严重时将使得风电场无法正常运行甚至脱网, 进而使电网产生电能缺额, 对电力系统稳定性提出了挑战, 因此各国根据各自电网运行需求, 制订了不同的风电场低电压穿越标准。

1.1 我国低电压穿越要求

我国规定的风电场低电压穿越能力是指当电网故障或扰动引起电压跌落时, 在一定的电压跌落范围和时间间隔内, 风电机组保证不脱网连续运行的能力^[16]。在《GB/T 19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定》中给出了风电场低电压穿越的具体标准, 要求即使在电压跌落很严重的情况下, 发电设备也应该保持并网并持续运行, 只有在电压跌落至标准线下, 才允许风机脱网。

从图 1 可以看出, 我国要求风力发电机组在并网点电压降至 20% 时仍能并网连续运行 0.625 s, 并且故障发生 2 s 内并网点电压能恢复至正常运

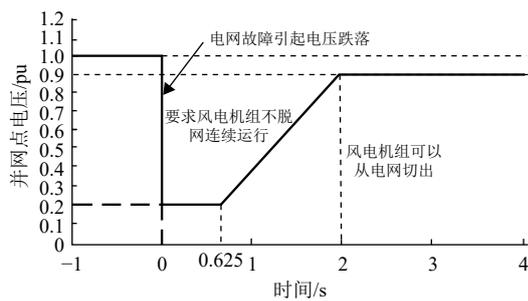


图 1 我国低电压穿越标准

Fig. 1 The LVRT specified in CNS

行时的 90%。同时国标上也对不同故障类型下风电场未脱网风机的有功功率恢复速率、动态无功支撑能力等做出了相应要求。三相短路故障在所有类型的故障当中最为严重，对电网稳定性的影响更加显著，因而规范中对三相短路故障时的动态无功支撑能力有着更加严苛的要求。

风电场动态无功电流增量响应并网点电压变化，并应满足公式 (1) [16]

$$\Delta I_t = K_1(0.9 - U_t) \cdot I_N, (0.2 \leq U_t \leq 0.9) \quad (1)$$

式中： ΔI_t 为风电场注入的动态无功电流增量； K_1 为风电场动态无功电流比例系数，取值范围应不小于 1.5、不大于 3； U_t 为风电场并网点电压标幺值； I_N 为风电场额定电流。

除此之外，规范也要求风电场并网点电压正序分量跌至额定电压的 80% 及以下时，风电场输出的无功电流不能低于风电场正常情况下并网额定电流的 1.05 倍，且要求风电场故障切除后有功功率速率不小于 $0.2P_N/s$ 恢复至故障前的值， P_N 为风电场额定有功功率。

1.2 风电集群动态相互作用对故障穿越的影响

我国海上风电目前呈现出大规模连片开发特点，大规模风电集群集中并网成为典型场景之一，图 2 所示为我国某地区实际海上风电集群规划项目。A 区域 7 个风电场与 B 区域 4 个风电场并网外送，这些海上风电场相互之间存在动态相互作用，包括同一区域内风电场间相互作用，不同区域之间风电场相互作用。假设风电场 Wind8 送出线路发生短路故障时，故障风场母线电压下降，与此同时，非故障风电场 Wind9-11 由于与故障风电场之间存在电气连接，电压也会受到影响，不同区域的风电场 Wind1-7 也会存在不同程度的电压下降。与单独风电场接入相比，非故障风电场的电压下降，将吸收大量的无功，进一步恶化

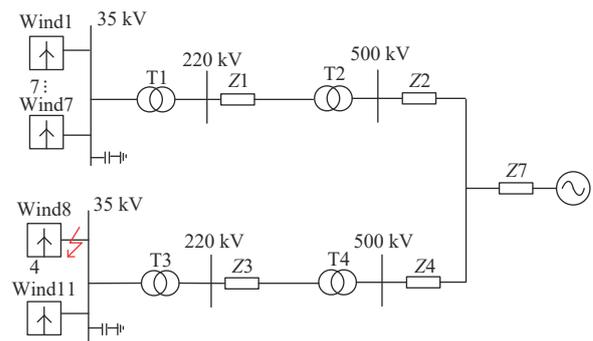


图 2 海上多风场并网示意图

Fig. 2 Sketch map of grid-connected multi offshore wind farms

故障风电场故障穿越的电网环境，为协调控制所有风电场电压，需要向系统注入大量无功功率，造成多场站系统低电压穿越所需无功功率比单独风电场大很多，若系统不能及时向风电集群注入大量无功功率支撑电网电压，风电集群之间无功串动，可能遭受动态电压振荡失稳，无法实现故障穿越。因此，与单个风电场低电压穿越相比，对多风场系统低电压穿越能力的要求更高，需要进一步研究。

2 火电机组对与其打捆的海上风电系统低电压穿越性能的提升作用

我国海上风电目前呈现出大规模连片开发而且集中并网的特点，由于风电场间的动态耦合，大规模风电集群集中并网的低电压穿越问题严重。目前海上风电与火电打捆系统发展迅速，风、火打捆系统低电压穿越问题还有待研究。本文从系统短路比和火电机组励磁调节系统提供无功支持原理 2 个方面来阐述火电机组对海上风电集群低电压穿越的提升作用。

2.1 风、火打捆提高风电场短路比对电压支持作用

火电的接入可以改善新能源系统并网的抗扰性能，增大系统阻尼提高系统的稳定性 [17-18]。短路比作为工程实际中衡量电网强度的指标，可以为电网规划和运行提供一定程度的参考，当风、火打捆系统短路比过低时，系统会存在宽频振荡风险；短路比越高，系统强度越大，可以应对的严重故障的能力越强。火电的接入对系统短路比具有提升作用，具体如下：

通常将单独风电场接入交流系统用戴维南等值方法简化为一个理想电压源串联电阻的形式 [19]，

以受端系统为例,如图3所示。

将系统三相短路容量与送出额定有功功率的比值作为衡量电网强度的短路比指标,计算单独风电场的短路比

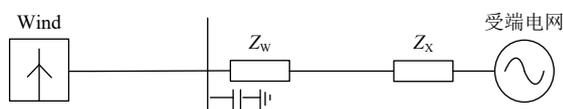


图3 单独风电场示意图

Fig. 3 Sketch map of grid-connected individual wind farm

$$K_{SCR1} = \frac{S_N}{P_N} = \frac{U_N^2/Z_{eq1}}{P_N} \quad (2)$$

式中: $Z_{eq1} = Z_W + Z_X$, Z_W 为风电场送出线路等值电抗; Z_X 为打捆系统输电线路等值电抗; S_N 为系统三相短路容量; P_N 为新能源系统送出有功功率; U_N 为风机并网额定电压。

进一步将单独风电场戴维南等值方法推广至风、火打捆系统,同样可以将其简化为一个电压源串联电阻的形式,图4为风、火打捆系统接入受端电网示意图。

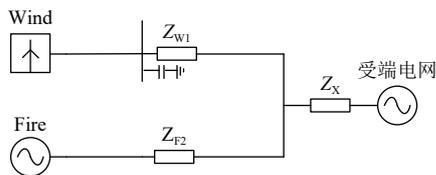


图4 风、火打捆系统示意图

Fig. 4 Sketch map of bundled system composed of offshore wind power cluster and thermal power units

考虑到火电机组在风、火打捆系统中能够像交流系统一样提供短路电流,增大交流系统的短路容量,故将火电机组并入受端电网,机组阻抗与受端电网阻抗并联得到新能源风电场短路比计算公式为

$$K_{SCR2} = \frac{S_N}{P_N} = \frac{U_N^2/Z_{eq2}}{P_N} \quad (3)$$

式中: $Z_{eq2} = Z_{W1} + Z_X // Z_{F2}$,为风、火打捆系统等值阻抗; Z_{F2} 为同步电机电抗与线路阻抗的和。一般情况下火电接入后,系统网架会因传输功率上升而进一步加强, Z_X 也会减小。显然,由式(2)(3)可以看出,当风电场传输容量相同,输电线路阻抗同样保持不变的情况下,风、火打捆系统短路比要大于单独风电场短路比:

$$K_{SCR2} > K_{SCR1} \quad (4)$$

当增大火电厂容量时,火电机组等效电抗由

Z_F 变为 Z_f

$$K_{SCR3} = \frac{S_N}{P_N} = \frac{U_N^2/Z_{eq3}}{P_N} \quad (5)$$

式中: $Z_{eq3} = Z_W + Z_X // Z_f$,由于火电厂容量增大导致 $Z_f < Z_F$,故 $Z_{eq3} < Z_{eq2}$,代入式(3)和(5)可以得到如下关系

$$K_{SCR3} > K_{SCR2} \quad (6)$$

从短路比角度来看,上述分析可以归纳为:风、火打捆系统由于火电厂的接入,短路比相对变大,且随着火电厂容量增大,风、火打捆系统短路比提高,风、火打捆系统电网强度大于单独风电场电网强度。当系统发生故障时,风电场并网点电压保持能力也进一步增强,系统在电压跌落故障时受扰能力也相应增强。

2.2 火电机组对风、火打捆系统的动态无功支撑

火电厂通过励磁调节器调节发电机的励磁电流,原理如图5所示。测量环节采集到的机端电压 \dot{U}_t 与发电机机端电流 i_t 经过滤波环节与电压参考值 U_{ref} 比较后,再经过综合放大与移相触发环节等控制发电机励磁绕组的励磁电压 u_f 。

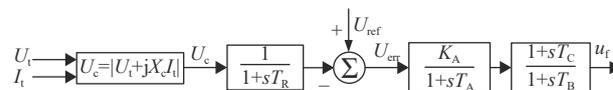


图5 交流励磁机励磁系统传递函数

Fig. 5 Transfer function of AC exciter excitation system

由于发电机的内电势与发电机励磁电流成正比 $E_0 = k_f I_f$ 。根据图5,发电机励磁系统通过调节励磁电压 u_f 可以改变励磁电流 I_f ,从而改变发电机的内电势,保持发电机的机端电压恒定,同时控制同步机输出的无功功率,如图6所示。 E_0 、 E'_0 、 E''_0 分别表示发电机正常励磁、欠励和过励时的激磁电动势。

正常运行时,励磁电动势与机端电压和电流的关系 $\dot{E}_0 = \dot{U}_t + j\dot{I}_t X_a$ 。为保持发电机的机端电压恒定不变,当机端电压降低时,发电机励磁调节器会增大励磁电流,发电机运行在过励磁状态,向电网输出无功功率;当系统电压升高时,发电机励磁调节器减小励磁电流,发电机运行于欠励磁状态,发电机从电网吸收无功功率。

风电场在正常运行期间,只向电网发出有功功率而几乎不发出无功功率,功率因数接近1。发生短路故障时,短路点电压会瞬间跌落,形成较大的无功功率缺口,因而需要系统中的无功功

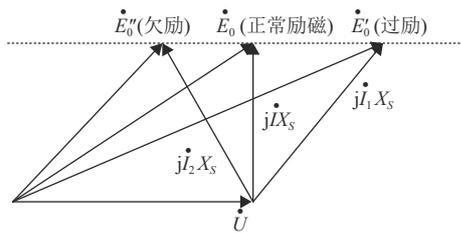


图 6 励磁调节原理图

Fig. 6 Schematic diagram of Excitation regulation

率电源发出一定的无功功率填补缺额，阻止短路点电压进一步跌落，最终实现风电场的低电压穿越。系统正常运行情况下，火电机组发出的有功功率和无功功率为恒定值。当风电场发生短路故障时，电网电压跌落，火电机组机端电压下降，机组为保持机端电压恒定，通过励磁调节器自动增大励磁电流，为系统提供动态无功功率，在一定程度上也会减少风、火打捆系统的电压跌落，提升风电场低电压穿越能力。

综上所述，风、火打捆系统中火电机组对风电场的低电压穿越能力有一定的提升作用，主要表现在 2 个方面：一方面火电接入可以提高系统短路比，增强系统电压抗扰能力；另一方面火电在系统故障时可以提供动态无功功率，帮助电网电压更快恢复至稳定值。

3 火电接入对风电场低压穿越的影响

3.1 某实际规划海上风电集群与火电打捆场景及参数

本文研究的算例为某海上风电集群与火电打捆接入系统的实际规划项目，风、火容量配比为 1: 1.35，其中海上风电集群包括 11 个风电场，海上风电场分布在 2 个地区，总容量 3320 MW，A 区 7 个风电场总容量为 1600 MW；B 区 4 个风电场总容量为 1720 MW，其中的 500 MW 风电场为该区容量最大的风电场。打捆外送火电厂 2 个，总容量 4480 MW，而 2 个火电厂只分布在 C 市与 D 市，总容量分别为 2480 MW 与 2000 MW。

风电场均采用额定容量为 5.5 MW 的永磁半直驱风电机组，风机接背靠背脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 变流器后连接 0.69 kV/35 kV 变压器，经 11 回路传输线 (A 区 7 回路、B 区 4 回路) 汇集到 35 kV 母线，再经过 2 次集控站升压到 500 kV 接入电网。另一侧火电机组也经 22 kV/500 kV 变压器将电能输送到远端受电系

统，最终实现风、火打捆。海上风电场集中并网场景如图 2 所示，与火打捆场景如图 7 所示，场景详细规划参数见表 1—4。

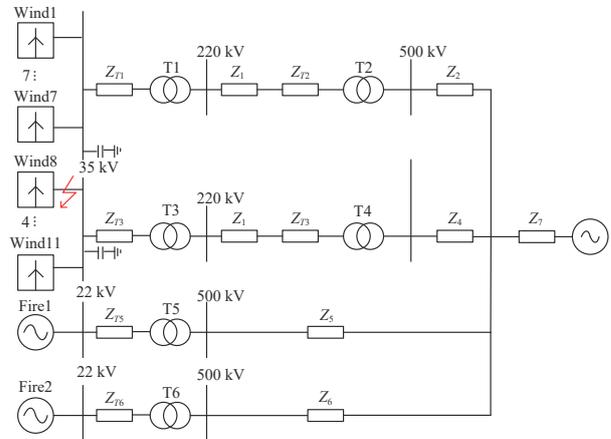


图 7 风、火打捆系统场景图

Fig. 7 Scene of bundled system composed of offshore wind power cluster and thermal power units

本文在 PSCAD 仿真的基础上搭建上述实际规划的风、火打捆的场景，通过在风电场并网点设置三相接地短路故障进行对比，探究多风电场与多火电机厂的打捆外送对风电场低电压穿越产生的影响。如图 7 所示，B 区容量为 500 MW 的风电场在并网点发生三相经电感接地故障，通过改变电感大小控制电压跌落程度。故障起始时间 4 s，持续时间 0.625 s。

3.2 火电厂对故障穿越能力提升作用分析

1) 系统短路比变化对低电压穿越影响。

只改变系统阻抗 Z_7 改变系统短路比，其线路对应电感设置分别为 0.02、0.04、0.06 H，相应短路比逐渐减小，测量故障点处电压跌落程度，如图 8 所示。随着阻抗 Z_7 增加，系统短路比减小，同一故障下，风电场电压跌落深度增加。只改变火电机组接入系统线路阻抗，设置分别为 0、0.03、0.1 H，测量故障点处电压跌落程度，如图 9 所示。随着火电接入系统阻抗增加，系统短路比减小，同一故障下，风电场电压跌落深度增加。

由图 8 可以看出，随着系统阻抗从 0.02 H 提升到 0.06 H，系统短路比逐渐减小，相同故障下风机电压跌落程度也逐渐从 0.785 pu 变化到 0.776 pu。同样，由图 9 可以看出，随着火电接入阻抗从 0 H 提升到 0.1 H，系统短路比减小，相同故障下风机电压跌落程度也逐渐从 0.781 pu 变化到 0.752 pu。综合图 8—9，说明风、火打捆系统

表1 线路参数

Table 1 Line parameters

电压等级/kV	线路类型	电阻/(Ω/km)	电抗/(H/km)	电容/(F/km)	长度/km
22	架空线	0.01250	8.76×10^{-4}	—	69/41
220	海缆线	0.047	0.479	0.118×10^{-6}	36/80
500	架空线	0.02629	9.10×10^{-3}	—	43/39

表2 变压器参数

Table 2 Transformer parameters

变比	额定容量/MVA	漏抗/ Ω
0.69/35	6.1	0.06125
35/220	2000/2500	12.5/10
220/500	2000/2500	12.5/10
22/500	1200/1500	10.417/8.33

表3 风机参数

Table 3 Parameters of wind-driven generator

参数	数值
额定功率/MW	5.5
额定电压/kV	0.69
频率/Hz	50

表4 同步机参数

Table 4 Parameters of synchronous generator

参数	数值
额定功率/MW	1000/1200
额定电压/kV	22
额定频率/Hz	50

低电压穿越能力与短路比正相关，火电的接入使系统短路比增强，维持系统电压保持能力也增强，风、火打捆系统故障穿越能力也同时提升。

2) 火电机组励磁调节器对低电压穿越的作用。

为探究火电机组提升风电场低电压穿越能力的运行机理，给出火电机组3种程度故障时励磁电流与无功功率曲线，如图10所示。

从图10可以看出，风电场发生故障引起电压跌落，火电机组的励磁电流会相应上升，过励

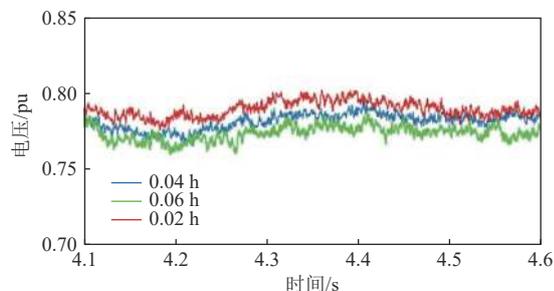


图8 改变外送线路阻抗时风电场并网点电压示意图

Fig. 8 Voltage at grid-connected point of wind farm when impedance of outwards delivery transmission line is changed

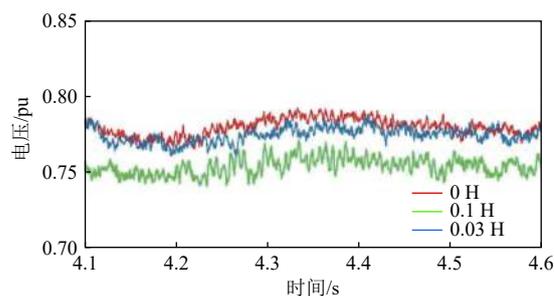
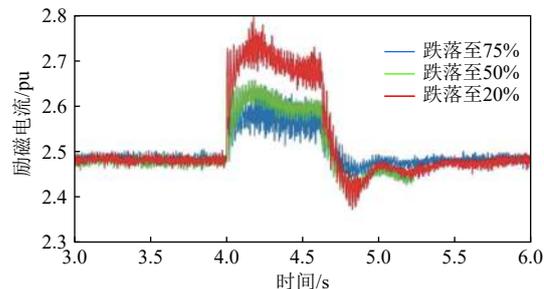
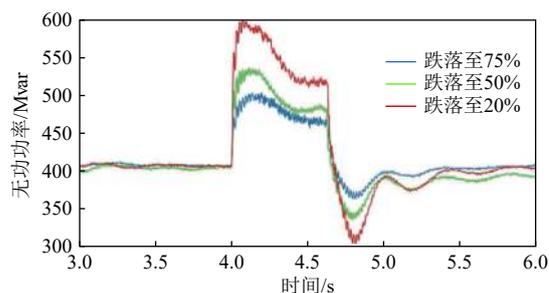


图9 改变火电厂接入阻抗时风电场并网点电压示意图

Fig. 9 Voltage at grid-connected point of wind farm when grid-connected impedance of thermal power plant is changed



(a) 不同故障程度下火电厂励磁电流



(b) 不同故障程度下火电厂无功功率

图10 火电厂穿越故障的无功支持作用

Fig. 10 Reactive power supporting action of thermal power plant under fault ride-through

磁的火电机组会向电网发出感性无功功率支撑电网电压。并且跌落程度越严重，励磁电流上升的越多，火电机组发出的无功功率也越多。

为进一步研究火电机组励磁电流的变化对系统低电压穿越能力的作用，本文选取电压跌落至20%的场景，改变故障发生时励磁电流的大小，测量故障点电压变化情况，得出图11。

如图11所示，相同跌落程度下，随着励磁电流的上升，故障点电压跌落程度有所减小，说明火电机组除了提高系统短路比，增强系统电压保持能力外，还可以通过改变励磁电流，增大故障时提供给系统动态的无功功率，故障结束后帮助电网电压恢复至稳定值，与前文分析一致。

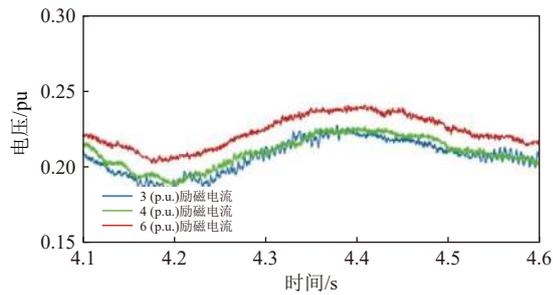


图 11 不同励磁电流时故障点电压示意图

Fig. 11 Voltage at faulty point under different exciting currents

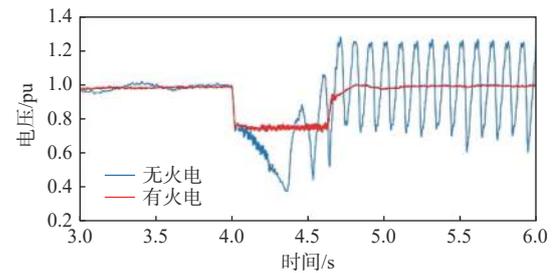
3.3 风电单独外送与风、火打捆系统的低电压穿越性能对比

选择接地电感为 0.003、0.001 和 0.00025 H 的场景，设置 3 种故障程度，分别为 75%、50%、20% 电压跌落，数据测量点为 35 kV 并网点风机侧。本文给出了 75% 与 20% 跌落程度仿真图，50% 跌落程度与前 2 者相似。图 12—15 给出了 2 组测试结果，包括风电场并网点电压、电流、有功功率、无功功率。

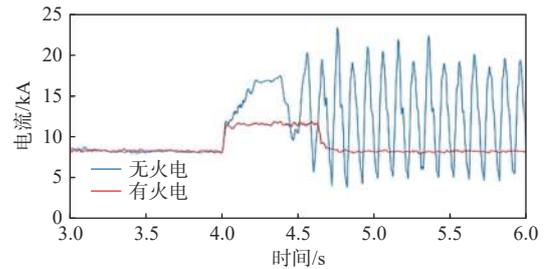
通过观察图 12—13 中 (a)、(b)、(c) 和 (d)，可以看出：当风电场故障点跌落至 75%、20% 时，无论是电压、电流、有功功率还是无功功率，风、火打捆系统都比未接入火电的系统波动程度要小，故障后都能恢复稳定，且符合国标低电压穿越标准。

图 12(a) 中，当风场故障点电压最低跌落至标称电压的 75% 时，无打捆火电的系统的故障点电压在 120% 与 80% 之间剧烈振荡，且故障后电压无法恢复至故障前状态。而当风电集群与火电打捆后的系统并网点电压故障时能够平稳地维持在额定 80%，且在故障后电压很快恢复至初始的稳定电压。图 13(a) 中，也同样显示，当风场故障点电压最低跌落至标称电压的 20% 时，无打捆火电的系统故障点电压在 120% 与 20% 之间剧烈振荡，且故障后电压无法恢复至故障前状态。而风电集群与火电打捆后的系统并网点电压故障时能够平稳地维持在额定电压的 20%，且在故障后电压很快恢复至初始的稳定电压。从图 12—13 还可以看出，无火电打捆时，风电场故障点的电流、有功和无功也发生剧烈振荡，且无法恢复到稳态运行。

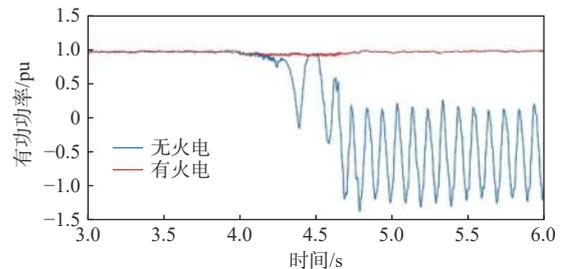
从图 12—13 分析可知，当风电集群单独并网时，由于系统短路比较小，一个风电场发生三相



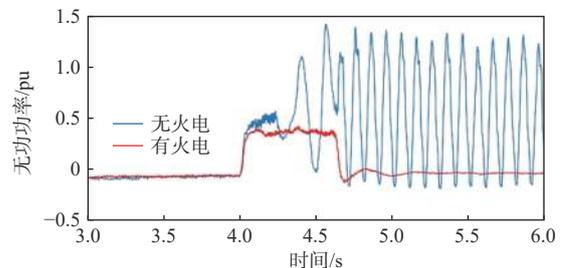
(a) 有/无火电厂故障点电压对比



(b) 有/无火电厂的故障点电流对比



(c) 有/无火电厂的故障点有功功率对比



(d) 有/无火电厂的故障点无功功率对比

图 12 故障风场电压跌落至 75% 时的测试结果对比

Fig. 12 Comparison of test results when voltage of faulty wind farm drops to 75%

电压跌落时，故障风电场并网点电压会瞬间跌落并产生剧烈波动，风电场交流电压支撑能力不足使系统出现振荡，最终导致风电场低电压穿越的失败，其他参量如电流、有功功率和无功功率与电压一样，也发生剧烈振荡，说明当风电集群容量较大或者故障程度较为严重时，单纯依靠风电机组网侧的控制难以恢复稳定。而当风电集群与火电打捆外送时，火电对风电场的故障穿越性能有重要的提升作用。

如图 14(a) 当风电场故障点电压跌落至 75% 时，非故障风电场并网点电压跌落至 86%，与风、

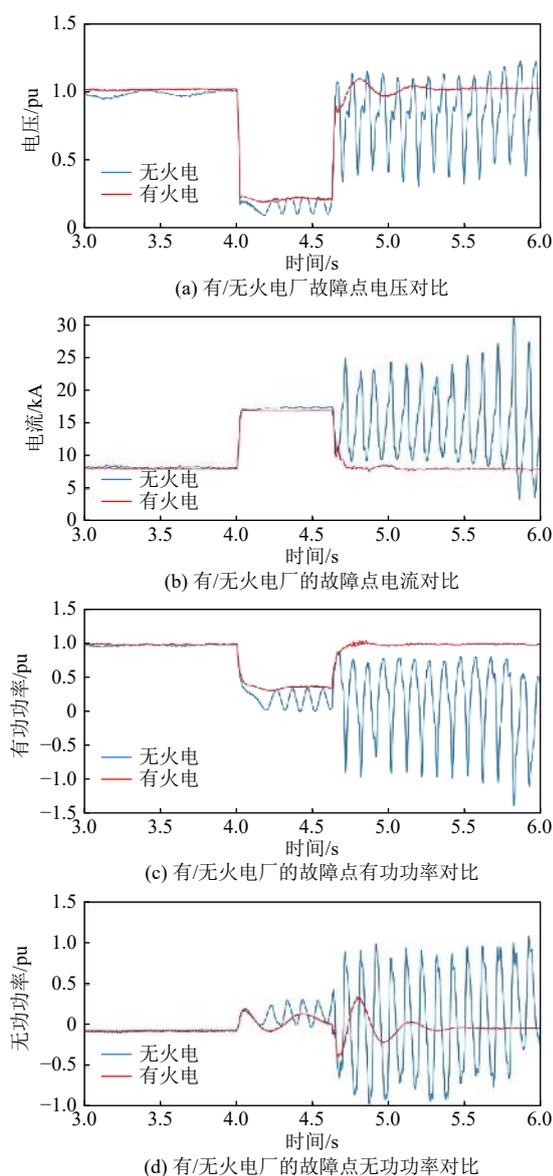


图 13 故障风场电压跌落至 20% 时的测试结果对比
Fig. 13 Comparison of test results when voltage of faulty wind farm drops to 20%

火打捆时并网点电压、电流、有功和无功曲线相比,风电集群单独并网系统的各量的曲线都有不同程度的振荡。图 15(a) 所示,当风电场故障点电压跌落至 20% 时,非故障风电场并网电压跌落至 71%,并网电压、电流、有功和无功都发生剧烈振荡,无法正常运行。而风、火打捆系统中,各非故障风电场并网参数很快恢复到稳定运行状态。

从图 14—15(a) 来看,风电集群集中并网系统在一个风电场故障后,其他风电场电压也会有所下降,进一步吸收大量无功,恶化故障风电场故障穿越的电网环境,甚至在故障风电场电压跌落严重的情况(跌落至额定电压 20% 时),非故障

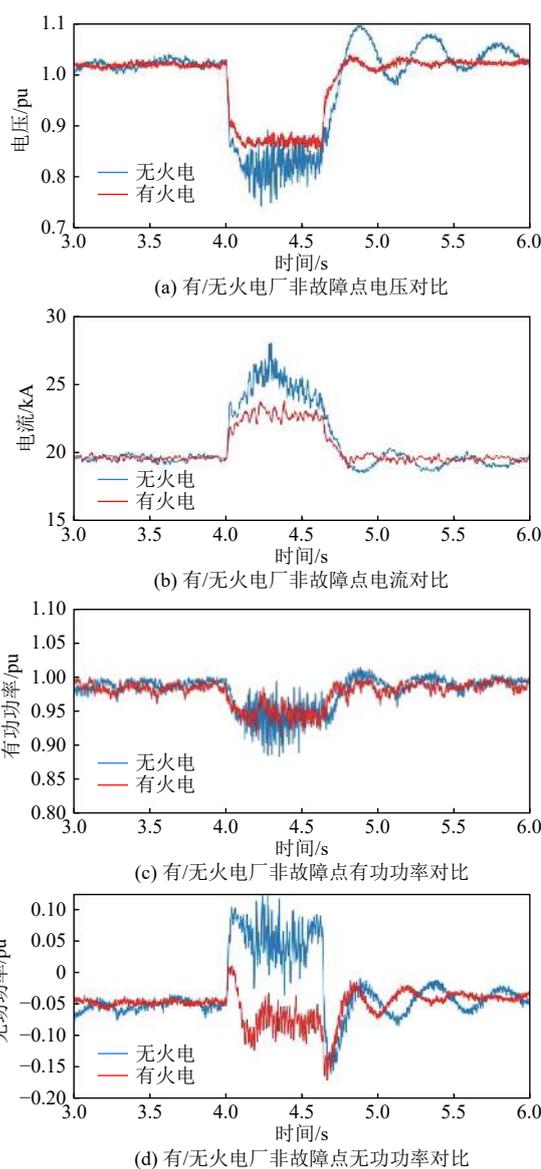


图 14 非故障风场电压跌落至 75% 时的测试结果对比
Fig. 14 Comparison of test results when voltage of non-faulty wind farm drops to 75%

风电场电压、电流、有功和无功也发生剧烈振荡,无法恢复到稳态运行点。这说明,风电集群中各风电场动态相互作用会降低风电场故障穿越的能力。

从图 12—15 可以看出,风电集群与火电打捆接入系统后,火电能够提供无功,提升风电集群低电压穿越能力。

4 结论

1) 风电集群中各风电场之间存在动态耦合,风电场低电压穿越时对电网支撑能力要求较高,风电集群单独并网(无打捆火电厂)时,故障风

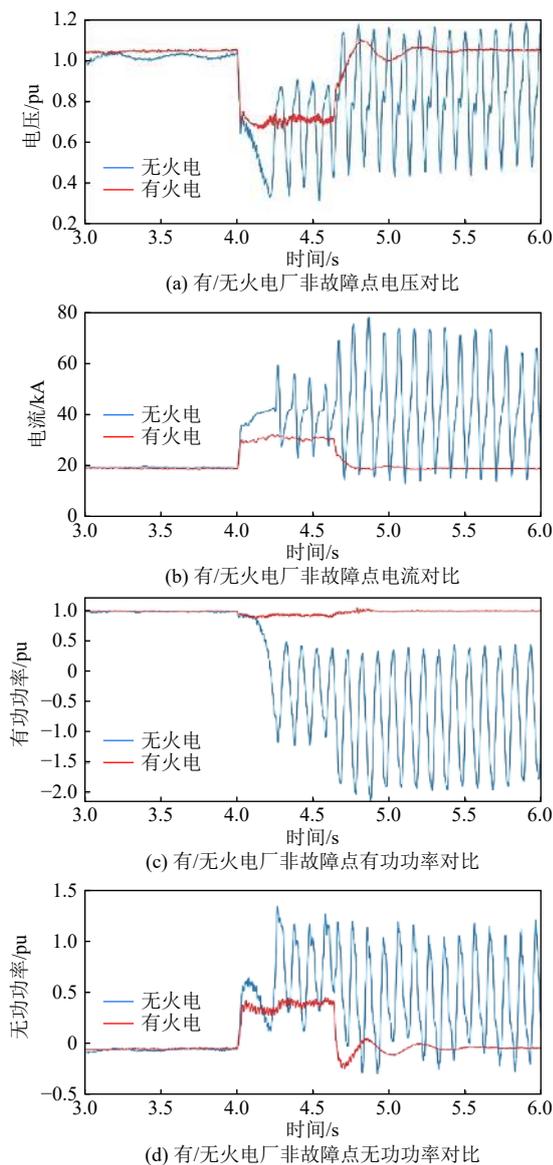


图 15 非故障风场电压跌落至 20% 时的测试结果对比
Fig. 15 Comparison of test results when voltage of non-faulty wind farm drops to 20%

电场很难实现故障穿越；在电压跌落严重时，非故障风电场也会发生剧烈的电压、电流和功率振荡，故障后无法恢复到稳定运行状态。

2) 当海上风电集群与火电打捆时，系统短路比提高，风、火打捆系统低电压穿越能力增强。而且，火电还能够调节励磁电流，增大无功功率支撑，降低系统电压跌落程度，实现海上风电集群故障穿越，故障后稳定运行。

3) 不同电压跌落程度下，火电机组提供的无功功率有所不同，跌落程度越大，火电机组提供的无功功率越大。由于火电机组能提供的无功

功率有限，在工程实际中，为提高风、火打捆系统低电压穿越能力，应当配合其他无功调节手段，根据实际情况需进一步对多种无功支撑手段进行仿真研究。

参考文献

- [1] 赵培廷, 徐涛. 交直流混合外送系统风火容量配比对暂态稳定性的影响[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 226–232.
ZHAO Peiting, XU Tao. Effect of wind-fire capacity ratio on transient stability of hybrid AC-DC outgoing system[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 40(3): 226–232(in Chinese).
- [2] 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-fire bundling ratio on the stability of DC islanding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 148–154(in Chinese).
- [3] 华文, 徐政. 风电火电打捆送出时的输电容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 121–125, 130.
HUA Wen, XU Zheng. Transmission capacity optimization method for wind and thermal power bundling and delivery[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 121–125, 130(in Chinese).
- [4] 王俊茜, 贾祺, 刘侃, 等. 基于信号注入法的风火打捆经直流外送系统次同步扭振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 109–120.
WANG Junxi, JIA Qi, LIU Kan, et al. Analysis of sub-synchronous torsional vibration of wind-fire bundling via DC outfeed system based on signal injection method[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 109–120(in Chinese).
- [5] 张育硕, 郝丽丽, 周彦彤. 风火打捆经串补外送系统次同步振荡分析及抑制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 189–195.
ZHANG Yushuo, HAO Lili, ZHOU Yantong. Analysis of sub-synchronous oscillation and suppression strategy of wind-fire bundling via series complementary outgoing system[J]. Power capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 189–195(in Chinese).
- [6] 郭东杰, 王灵梅, 韩西贵. 基于PSS和SSSC的风火打捆输电系统暂态稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 61–65, 71.
GUO Dongjie, WANG Lingmei, HAN Xigui. Transient stability study of wind-fire bundling transmission system based on PSS and SSSC[J]. Power System Protection and System, 2012, 40(19): 61–65, 71(in Chinese).

- [7] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043-4051.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized access on the transient power angle stability of power system(II): Analysis of influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051(in Chinese).
- [8] 行舟, 陈永华, 陈振寰. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(一)风电场之间的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 20-23, 102.
XING Zhou, CHEN Yonghua, CHEN Zhenhuan. Control strategy of large cluster wind power active intelligent control system (I) coordinated control between wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 20-23, 102(in Chinese).
- [9] 陈振寰, 陈永华, 行舟. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二)风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou. Control strategy of large cluster wind power active intelligent control system (II) coordinated control of wind and thermal power "bundled" outgoing power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15(in Chinese).
- [10] 蔺红, 晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.
LIN Hong, CHAO Qin. Modeling and control simulation study of direct-drive wind turbine under grid failure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 189-195(in Chinese).
- [11] 刘义刚, 田桂珍, 赵玉苗. 采用STATCOM/SDBR改善笼型机风电场低电压穿越的机理分析及其控制策略[J]. 可再生能源, 2018, 36(6): 888-893.
LIU Yigang, TIAN Guizhen, ZHAO Yumiao. Mechanistic analysis of improving low voltage ride-through in cage machine wind farms using STATCOM/SDBR and its control strategy[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(6): 888-893(in Chinese).
- [12] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007(10): 173-177.
GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, WANG Weisheng. Low voltage ride-through function of wind turbine and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007(10): 173-177(in Chinese).
- [13] 陈继明, 王元皓, 李其莹, 等. 基于低电压穿越能力评价的双馈风电机组风电场无功出力控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 466-472.
CHEN Jiming, WANG Yuanhao, LI Qiyang, et al. Control of wind farm reactive power output of doubly-fed wind turbines based on low voltage ride-through capability evaluation[J]. ACTA Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(4): 466-472(in Chinese).
- [14] 高峰, 黄鸣宇, 乔颖. 考虑低电压穿越能力的风火联运系统暂态稳定分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(4): 40-47, 70.
GAO Feng, HUANG Mingyu, QIAO Ying. Transient stability analysis of wind-fire intermodal system considering low voltage ride-through capability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(4): 40-47, 70(in Chinese).
- [15] 周玲, 宋晓芳, 常康, 等. 风电机组低电压穿越能力对风火打捆直流外送系统的影响[C]// 2013年中国电机工程学会年会论文集. 中国电机工程学会, 2013.
- [16] GB/T 19963.1—2021, 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电[S].
- [17] 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-fire bundling ratio on the stability of DC islanding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 148-154(in Chinese).
- [18] 曹喜民, 刘天琪, 李兴源, 等. 风火打捆输电系统小扰动的稳定性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 19-23.
CAO Ximin, LIU Tianqi, LI Xinyuan, et al. Stability of small disturbances in wind-fire bundled transmission system[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(1): 19-23(in Chinese).
- [19] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short-circuit ratio for multi-fed AC-DC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8(in Chinese).

收稿日期: 2021-12-01

作者简介:

余浩(1986), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网规划、系统仿真及新能源并网技术, E-mail: 13570039611@163.com;

王盼盼(1996), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制, E-mail: 1004777828@qq.com;

段瑶(1986), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、新能源并网消纳, E-mail: duanyao@mail.gd.csg.cn;

田书新(1999), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制, E-mail: 2447132963@qq.com;

陈武晖(1974), 男, 博士, 通信作者, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: chenwuhui@tyut.edu.cn.