

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.019

基于自启动系统的海上风电并网技术

王亮¹, 刘亚南¹, 柳强², 喻建¹, 杨春¹, 曹佳伟¹, 吴熙³

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102; 2. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518100;

3. 东南大学电气工程学院, 南京 210096)

摘要:针对目前海上风电项目建设存在并网周期长的问题,提出了一种自启动的风机并网方法,并基于该方法开发了一套风机并网调试自启动装置。该装置可以安装在海上升压站平台上,在大电网电源送达海上升压站前,通过海缆为风机提供稳定电源,在此期间提前完成风机各项调试与并网工作。待正式电源送达海上升压站后,风机直接并网,大幅缩短海上风电项目建设工期,帮助风机提前并网发电,创造可观的经济价值,并能够加速清洁能源并网,助力“碳达峰,碳中和”的能源环境战略目标实现。目前,该技术已在江苏如东多个海上风电场落地应用,现场试验数据验证了研制系统和所提方法的先进性与有效性。

关键词: 新能源建设; 海上风电; 自启动系统; 风机并网; 系统稳定性

Grid-connected Technology of Offshore Wind Power Based on Self-starting System

WANG Liang¹, LIU Yanan¹, LIU Qiang², YU Jian¹, YANG Chun¹, CAO Jiawei¹, WU Xi³

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. China Guangdong Nuclear Engineering Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518100, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In view of the long grid connection period in the construction of current offshore wind power project, a kind of self-starting wind turbine grid connection method is proposed and on which a set of wind turbine grid-connected debugging device is developed. The device can be installed on the offshore booster station platform. The stable power is supplied for the wind turbine through submarine cable before the power of large network is delivered to the offshore booster station. During this period, the static/dynamic debugging and related calibration work of the wind turbine is completed in advance. After the formal power source is delivered to the offshore booster station, the wind turbine is connected to the grid directly, which shortens greatly the construction period of offshore wind power projects and helps to the wind turbine to interconnect and generate power in advance, create objective economic value, speed up grid connection of clean energy and achieve the energy and environmental strategic goals of “carbon peak and carbon neutrality”. At present, the technology has been applied in many offshore wind farms in Rudong, Jiangsu. And the advancement and effectiveness of the developed system and the proposed method are verified by the filed test data.

Keywords: new energy construction; offshore wind power; self-starting system; wind turbine grid connection; system stability

0 引言

近年来,海上风电凭借着单体规模大、年利用小时数高、降低碳排放作用明显等优势取得了迅猛的发展^[1-3]。截至2021年4月底,我国海上风电并

网规模首次突破千万千瓦大关,来到了1042万千瓦的新阶段。随着习近平总书记“碳达峰、碳中和”能源环境战略目标的提出,海上风电还将继续取得长足的发展^[4-5]。

然而,受客观条件影响,目前海上风电存在建

收稿日期:2023-02-04

基金项目:国家自然科学基金(52177075)。

设周期长的问题^[6]。具体表现为:因海陆通道铺设、升压站建设周期的不确定;海上升压站正式送电工期有一定的迟滞性。传统海上风电基建模式是待大电网正式电源送达陆上及海上升压站后,再经过35 kV集电海缆对风机送电并进行各类静/动态调试,这就导致了海上升压站具备送电条件前风机并无正式调试电源,同时也意味着电网正式电源送达后,还需额外的近半年时间才能实现风电厂的全容量并网。

在陆上风电工程领域,有学者和厂家进行过一些有益尝试^[7-10],通过在风机就地侧采用小柴油发电机等供电装置对单台风机进行送电调试,从而使其满足并网条件^[11-13]。但在海上风电领域,该方法仍有以下不足之处:

- 1)海上作业条件恶劣,风机就地侧无陆上稳定平台,如采用船舶等形式搭建平台,时间、人力成本较大且设备安装及使用安全隐患极大;
- 2)相较于陆上风电,海上主流风机单机容量较大,并网瞬间功率、电流冲击较大,对供电装置容量、系统稳定性均提出了更高的要求^[14];
- 3)与陆上不同,海上风电集电线路采用海缆进行长距离输电,海缆充电电容较大,容易使得系统电压过高,从而导致系统电压过高^[15-17];
- 4)风机就地进行送电调试,并不经过35 kV交流系统,不能配备必需的保护措施,且无法实时监

视系统状态变化,安全隐患极大。

基于此,本文提出了一种基于自启动系统的海上风电并网技术。首先,自主研制了一套海上风电自启动系统及设备平台,对其电气系统及继电保护进行配置;其次,采用对柴油发电机组进行建模并采用频率协同控制策略提高并网过程系统稳定性;最后,提出了基于自启动系统的风机整套并网方案;最后,结合江苏沿海实际风电场风机并网试验数据对所研自启动系统及提出的并网方案进行实例验证。

1 自启动系统组成与继电保护配置

对风机并网全过程而言,自启动系统作用主要有3点:

- 1)在海上升压站未取得送电条件前,为风机静态、动态调试提供稳定的调试电源,自启动系统此时起到电源支撑作用;
- 2)在风机完成相关调试后进行并网试验并发电时,实时消纳风机发出功率,自启动此时起到负载消纳作用;
- 3)灵活调节自身输出、吸收功率,在启动过程中维持系统电压及频率稳定。

为满足以上需求,在自启动系统中配置足够的电源与负载容量。如图1所示为所研制自启动系统内部构成与相关配置,其核心设备包括柴油发电

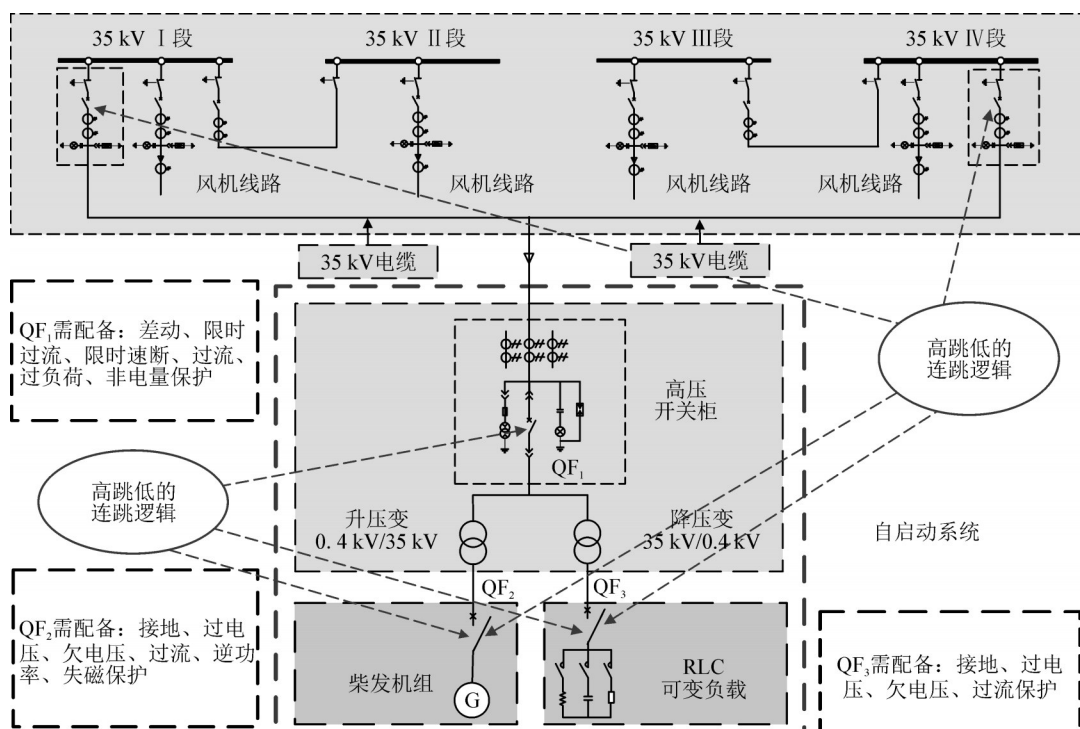


图1 自启动系统组成与配置图

Fig. 1 Composition and configuration of self-starting system

定裕度用以灵活调节即可。

2.1.2 阻性负载容量参数配置

风机并网时,其功率流向发生转化,由原本吸收系统功率转为发出一定功率,就目前市场上主流风机而言,一般仅需输出其 10% 额定功率即可完成并网。为避免自启动系统中柴油发电机组逆功率运行跳闸,需配备足额阻性负载用以消纳风机发出功率。因此,可变负载中阻性容量满足以上要求并留有一定裕度用以灵活调节即可。

2.2 柴油发电机组容量参数选取方法

在自启动系统中,柴油发电机组是整个系统的有功功率源,因此确定柴油发电机组容量需要明确整个系统有功需求。对于该系统而言,主要有功率需求有两处。

1) 风机自身负荷(主要是风机励磁系统、变桨系统、变流器、控制系统以及加热除湿等有功损耗)以及升压变、降压变及风机箱变的损耗;

2) 风机尚未并网发电前,可变负载中阻性负载完全由柴发进行供电,因此柴发有功容量必须能够满足阻性负载功率需求。

需要注意的是,柴油发电机组容量对系统稳定性影响较大,风机并网瞬间会产生一定功率冲击,柴发容量越大则可调节裕度越大,系统稳定性越高。因此,为保证风电并网成功率,在可能的条件下尽可能使用容量较大的柴油发电机组。

2.3 升压变、降压变容量参数选取方法

对于两变压器而言,其作用主要是将低压侧柴油发电机组及可变负载出口 400 V 电压转化为高压侧 35 kV 电压,因此两变压器容量必须大于柴油发电机组及可变负载容量,并留有一定裕度。

3 柴油发电机组建模

柴油发电机组是黑启动系统核心组成部分,其模型主要包括调速系统模型、励磁系统模型与同步发电机模型 3 部分。为维持系统稳定性,引入频率协同控制策略对其系统频率进行控制^[11]。

3.1 调速系统模型

系统负荷与频率关系,可以进一步转化为功率 P 与转矩 T 之间的关系为

$$P = w_r T \quad (3)$$

式中: w_r 代表转速,考虑从初始值(下标用 0 表示)的微小偏差(用前缀表示),可得

$$P_0 + \Delta P = (w_0 + \Delta w_r)(T_0 + \Delta T) \quad (4)$$

$$\Delta P = w_0 \Delta T + \Delta w_r T_0 \quad (5)$$

因此有

$$\Delta P_m - \Delta P_e = w_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0})\Delta w_r \quad (6)$$

式中:下标 m 代表机械分量; e 代表电磁分量。稳态时,电磁转矩等于机械转矩,即 $T_{m0} = T_{e0}$ 。当转速用标么值 $w_0 = 1$ 时,则

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (7)$$

再考虑到自启动系统可变负载的调节效应,则

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta w_r \quad (8)$$

式中: P_L 代表可变负载功率; D 为系数常数。

进一步地,可以得到图 4 所示的发电机组转矩、功率与转速调节的逻辑图。

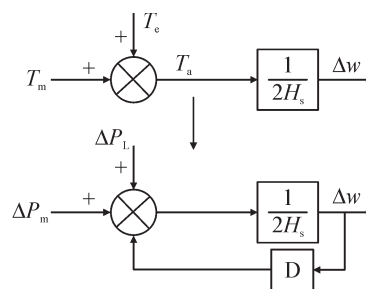


图4 转矩、功率与转速调节逻辑图
Fig. 4 Logic diagram of torque, power and revolution regulation

3.2 励磁系统模型

忽略交流励磁机电枢回路的暂态过程,其励磁回路方程为

$$U_e = I_e R_e + L_e \frac{dI_e}{dt} \quad (9)$$

$$I_e = kV_e + \Delta I_e R_e = kV_e + V_e S_e(V_e) \quad (10)$$

化简得

$$U_e = k_e V_e + V_e S_e(V_e) + T_e \frac{dU_e}{dt} \quad (11)$$

式中: U_e 为调节器输出电压信号; I_e 为励磁回路电流; R_e 和 L_e 分别为励磁回路电阻与电感; V_e 为励磁电压,再考虑转子励磁电流 I_{FD} 电枢反应的去磁效应,则有

$$U_e = kV_e + V_e S_e(V_e) + I_{FD} K_D \quad (12)$$

因此,可以得到图 5 所示的励磁系统逻辑图。

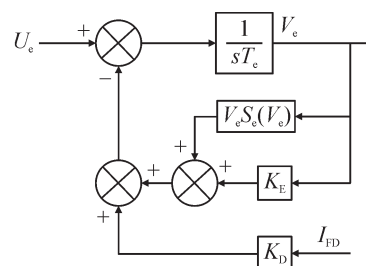


图5 励磁系统逻辑图
Fig. 5 Excitation system logic diagram

3.3 同步发电机模型

同步发电机模型采用典型六绕组模型(d 、 q 轴),方程为

$$\begin{cases} E_q' = U_q + R_a I_q + X_d' I_d \\ E_d' = U_d + R_a I_d - X_q' I_q \\ T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} = (E_d' - E_q') + (X_d' - X_q') I_q + T_{q0}' \frac{dE_q'}{dt} \\ T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = (E_q' - E_d') + (X_d' - X_q') I_d + T_{d0}' \frac{dE_d'}{dt} \\ T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} = -E_d' + (X_q' - X_d') I_q \\ T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_d' - E_q' - (X_d' - X_q') I_d - (K_G - 1) E_q' \end{cases} \quad (13)$$

式中:下标 d 、 q 分别表示相应轴电气量。

其转子运动方程为

$$T_J \frac{dw}{dt} = \frac{P_m}{w} - \frac{P_e}{w} - D(w - w_0) \quad (14)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = (w - 1)w_0 \quad (15)$$

由此,建立了柴油发电机组模型。

4 基于自启动系统的海上风电并网方法

基于自启动系统的海上风电并网主要分为以下3个关键环节:系统零起升压、风机静/动态调试与加热除湿、风机并网与解列。

4.1 系统零起升压阶段

为最大限度减少系统冲击,采取工程上常用的零起升压方式进行风机送电,将自启动系统、接地变间隔、海缆间隔、风机箱变高压侧开关全部闭合,由柴油发电机组将整个系统从零开始逐步建立电压,待电压升至系统额定值后,对整个系统进行全面检查,避免局部放电,清除安全隐患。

4.2 风机静/动态调试与加热除湿阶段

零起升压后,逐个合上风机箱变低压侧开关,由自启动系统向风机送电调试。在此期间,风机侧需要完成如变桨系统、声光报警、瓦斯油压、急停状态等各类静/动态调试,并进行24 h的加热除湿用以保证机舱内环境湿度满足绝缘要求。

值得注意的是,由于加热除湿时间较长,为节约油耗,尽量将系统运行于最小工况。

4.3 风机并网与解列阶段

风机加热除湿完成之后,此时自启动系统运行于最小工况,为保证系统对风机发出功率的消纳能力,需要对系统进一步扩容。因此,应尽可能使得系统运行于最大工况。即,可变负载阻性负载全部投入,在风机并网发电前完全由柴油发电机组进行供电,待风机并网后,其发出功率能够全部被可变

负载消纳,避免柴发进相运行。

为最小化风机并网瞬间对系统造成的功率、电流冲击,应通过风机控制程序尽可能将其并网功率限制在最小值,待指令下达后进行并网,并网完成后立即解列,再进行逐台风机并网。

5 算例分析

本文在某海上风电场对所研自启动系统及整套并网方法进行验证,该风电场采用单台装机容量为4 MW的某品牌鼠笼异步风力发电机。

1)零起升压阶段参数配置与系统状态

该风电场某海缆上6台风机现场试验时零起升压阶段自启动系统参数配置以及系统状态数据见表2。

表2 参数配置与系统状态数据
Table 2 Parameter configuration and system status data

参数	数值
海缆充电电容/kvar	327.61
风机箱变损耗/kvar	6×23.58
升压变无功损耗/kvar	15.10
降压变无功损耗/kvar	23.82
感性负载设置值/kvar	400.00
阻性负载设置值/kW	500.00
柴发有功功率/kW	521.15
柴发无功功率/kvar	197.57
母线电压/kV	34.61
系统频率/Hz	50.00

2)风机静/动态调试及加热除湿阶段

前文已述,由于加热除湿时间较长,为节约系统油耗,此时尽量将系统运行于最小工况。因此,降低阻性负载功率至100 kW,维持系统稳定24 h,期间完成风机各项常规调试内容。

3)风机并网与解列阶段

加热除湿后,进行系统扩容,逐步增加可变负载中阻性负载至500 kW,待系统稳定后,下达风机并网指令。图6给出了风机并网过程中系统各状态参数实时录波曲线,该过程的自启动系统各试验参数及其波动情况见表3。

由风机并网曲线可以看出,风机并网发电过程中会对自启动系统造成一定的功率及电流冲击,其发出功率瞬时最大值为872.30 kW,经过自身限功率程序,很快稳定至100 kW左右。整个过程中,自系统电压波动为1.5 kV以内,频率基本稳定无波动,最终成功利用自启动系统实现风机调试并网,并实时消纳了所有风机发电功率,保障了系统稳定。

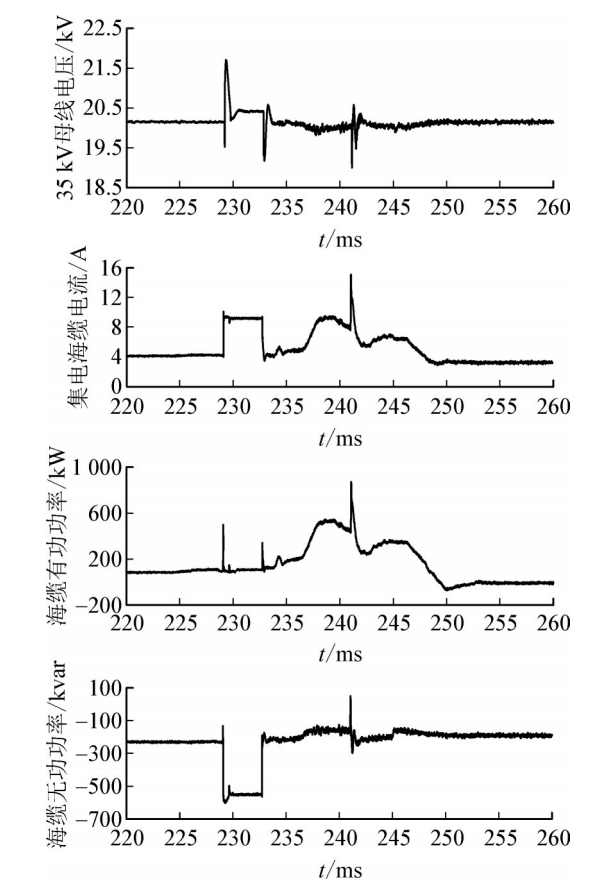


图6 自启动系统实时录波曲线
Fig. 6 Real-time recording curve of self-starting system

表3 试验参数记录表
Table 3 Record of test parameters

参数	数值
风机并网有功功率(稳定值)/kW	105.01
风机并网无功功率(稳定值)/kvar	-224.75
风机并网有功功率(最大值)/kW	872.30
风机并网无功功率(最大值)/kvar	-603.61
母线电压(单相稳定值)/kV	20.39
母线电压最大波动/kV	1.32
集电海缆电流(单相稳定值)/A	4.52
集电海缆电流(单相最大值)/A	15.10
系统频率最大偏移/Hz	0.02

6 结语

针对目前海上风电项目建设亟待解决的并网周期长的问题,文中研发了一套自启动系统,搭建了相应的设备平台,并基于该系统提出了一整套的海上风电并网调试方案,结论如下:

1)文章提出了一种基于自启动系统的海上风电并网调试方法,并基于该方法研制了一套自启动系统及装置,该装置能够在大电网正式电源送达海上升压站前为风机提供稳定的调试电源,在此期间

提前完成风机静/动态调试与相关校准工作,大幅缩短海上风电项目建设工期,帮助风机提前并网发电;

2)现场试验数据验证了研制系统和所提方法的先进性与有效性,风机并网过程中系统电压、频率指标稳定,并最终成功并网。

在后续研究中,将进一步对不同类型风机并网过程中功率及电流冲击特性进行深入研究,并针对性地在自启动系统中引入缓冲装置,避免并网瞬间功率、电流冲击过大引起系统崩溃。

参考文献

[1] 曹文斌,潘武略,戚宣威,等. 海上风电高抗匝间保护误动分析及对策建议[J]. 浙江电力,2023,42(1):54-62.
CAO Wenbin, PAN Wulue, QI Xuanwei, et al. Maloperation analysis and suggested countermeasures for inter-turn protection of high-voltage shunt reactors in offshore wind power transmission[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1):54-62.

[2] 李伟,王森,申巍,等. 张力腿漂浮式海上风电机组利用锚泊系统作为接地体的可行性研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(3):142-147.
LI Wei, WANG Sen, SHEN Wei, et al. Feasibility study on tlp floating offshore wind turbine using mooring system as grounding body[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):142-147.

[3] 徐群伟,罗华峰,梅冰笑,等. 海上风电场并网对暂态过电压和谐波谐振特性的影响[J]. 浙江电力,2023,42(2): 1-8.
XU Qunwei, LUO Huafeng, MEI Bingxiao, et al. Research on the impact of grid-connected offshore wind farms on transient overvoltage and characteristics of harmonic resonances[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2):1-8.

[4] 赵国涛,钱国明,王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术,2021,43(6):11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-Carbon development path for power industry to realize Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(6):11-20.

[5] 郭高鹏,方佳良,豆书亮,等. 考虑海上风电接入的电网侧无功补偿策略[J]. 电网与清洁能源,2018,34(12):65-70.
GUO Gaopeng, FANG Jialiang, DOU Shuliang, et al. A power network side reactive power compensation strategy considering offshore wind farms integrated[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2018, 34(12): 65-70.

[6] 于自强. 海上风电建设项目的风险管理研究[D]. 北京: 北京邮电大学,2020.

[7] 李新军,杨超,顾雪平,等. 柴油发电机辅助的风电场黑

- 启动过程及频率控制[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1853-1859.
- LI Xinjun, YANG Chao, GU Xueping, et al. Study on black-start process and frequency control of wind farms assisted with diesel generator[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1853-1859.
- [8] 袁贺. 储能型风电场作为黑启动电源的自启动策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [9] 崔红芬, 王德顺, 杨波, 等. 支撑电网黑启动的风光储新能源电站协调控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 50-57.
- CUI Hongfen, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Coordinated control strategy of wind-solar-storage power station supporting black start of power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 50-57.
- [10] 朱凌燕. 双馈型风电场黑启动技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [11] 汤奕, 戴剑丰, 冯祎鑫, 等. 基于虚拟惯量的风电场黑启动频率协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 19-24.
- TANG Yi, DAI Jianfeng, FENG Yixin, et al. Cooperative frequency control strategy for wind farm black-start based on virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 19-24.
- [12] 尤宏飞. 储能辅助风光电站参与黑启动的可行性评估和优化控制[D]. 长春: 东北电力大学, 2020.
- [13] 王子琦. 含储能的大型风力电场自启动控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [14] 李新军. 考虑风电参与的电力系统恢复决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [15] 陈夏, 辛妍丽, 唐文虎, 等. 海上风电场黑启动系统的风柴协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 98-105.
- CHEN Xia, XIN Yanli, TANG Wenhui, et al. Coordinated control strategy of wind turbine and diesel generator for black-start system of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 98-105.
- [16] YUAN He, MI Zengqiang, DU Ping, et al. Research of the transformer energization control strategy applied for storage-based wind farm self-start[C]//2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. [S. l.]: IEEE, 2016: 543-547.
- [17] DAI Jianfeng, TANG Yi, WANG Qi, et al. Black start technology for local power grid via PMSG-based wind power Generation[C]//2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017—ECCE Asia). [S. l.]: IEEE, 2017: 2025-2030.
- [18] 继电保护及二次回路安装及验收规范: GB/T 50976—2014[S]. 2014.
- Specification for installation and acceptance of relay protection and secondary circuit: GB/T 50976—2014[S]. 2014.
- [19] 发电厂继电保护及安全自动装置技术监督导则: DL/T 2253—2021[S]. 2021.
- Technical supervision guidelines for relay protection and safety automatic devices in power plants: DL/T 2253—2021[S]. 2021.
- [20] 查国强, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑海底电缆充电功率的风电场无功补偿[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 54-60.
- ZHA Guoqiang, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reactive compensation of offshore wind farm considering charging power of the submarine cable[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2013, 29(2): 54-60.
- [21] 崔东岭, 江春, 史忠秋, 等. 大型海上风电项目中的集电海缆研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 98-102.
- CUI Dongling, JIANG Chun, SHI Zhongqiu, et al. Research on array submarine cables in large offshore windfarm[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2): 98-102.
- 作者简介:**
- 王亮(1995—), 男, 工程师, 通信作者, 主要从事新能源并网与发电技术。E-mail: 517713417@qq.com。
- 刘亚南(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事新能源并网与发电技术工作。
- 柳强(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事新能源并网与发电工作。
- 喻建(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事新能源并网与发电工作。
- 杨春(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事新能源并网与发电工作。
- 曹佳伟(1993—), 男, 工程师, 主要从事新能源并网与发电工作。
- 吴熙(1987—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定控制与新能源并网。