

# 次/超同步振荡风险下直驱风电场功率调节和切机控制策略研究

裴茂林<sup>1</sup>, 王泽斌<sup>2</sup>, 汪芙平<sup>2</sup>, 范亚军<sup>1</sup>, 黄松岭<sup>2</sup>, 赵伟<sup>2</sup>  
(1. 国网江西省电力有限公司供电服务管理中心, 南昌 330000;  
2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100842)

**摘要:** 直驱风电场在面对次/超同步振荡风险时,通常在发生振荡后切除全部风机来保证电网安全。切除整个风场不仅严重破坏风电场的生产运行,对电网也会造成较大冲击,是事态升级后不得已采取的紧急措施。针对以上问题,论文提出一种宽频测量装置辅助的直驱风电场功率调节和切机控制策略,以实现次/超同步振荡事故的预警和快速抑制。风电场随时关注区域电网内雷击跳闸等可能诱发振荡的事件。当接收到事件报告后,风电场随即进入预警状态并按照预动作策略调节各风机功率进入低诱发状态,同时宽频测量装置进入紧急状态监测风电场是否发生次/超同步振荡。当检测到振荡后,风电场根据各风机与并网点距离和各风机功率计算切机强度指标,对部分风机执行切机策略,以实现振荡消除。论文建立相关仿真算例对控制策略的可行性和有效性进行验证,仿真结果表明所提出的功率调节和切机控制策略实现直驱风电场振荡的抑制,同时避免了风电场切除全部风机,降低了对电网的冲击。

**关键词:** 直驱风电场; 宽频测量装置; 次/超同步振荡; 切机控制策略

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.014

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0137-09

## Power regulation and generator tripping control strategy for direct-drive wind farms under sub/super-synchronous oscillation risk

PEI Maolin<sup>1</sup>, WANG Zebin<sup>2</sup>, WANG Fuping<sup>2</sup>, FAN Yajun<sup>1</sup>, HUANG Songling<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>  
(1. Power Supply Service Management Center, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, China. 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100842, China)

**Abstract:** Direct-drive wind farms usually trip all wind turbines to ensure power grid security when facing sub/super-synchronous oscillation risks. Tripping the entire wind farm not only seriously damages the production operation of the wind farm, but also causes a large impact on the power grid, which is an emergency measure that has to be taken after the situation escalates. To address this problem, this paper proposes a wide-frequency measurement device assisted power regulation and generator tripping control strategy for direct-drive wind farms, to achieve early warning and rapid suppression of sub/super-synchronous oscillation accidents. The wind farm pays attention to events such as lightning tripping in the regional power grid that may induce oscillations at any time. When receiving an event report, the wind farm immediately enters a pre-warning state and adjusts the power of each wind turbine according to the pre-action strategy to enter a low-inducing state, while the wide-frequency measurement device enters an emergency state to monitor whether the wind farm has sub/super-synchronous oscillations. When oscillations are detected, the wind farm defines the tripping intensity index according to the distance between each wind turbine and the grid-connected point and the power of each wind turbine, and executes the tripping strategy for some wind turbines to achieve oscillation elimination. This paper establishes relevant simulation examples to verify the feasibility and effectiveness of the control strategy. The simulation results show that the proposed power regulation and generator tripping control strategy achieves the suppression of oscillations in direct-drive wind farms, while avoiding the

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52077112); 国家电网有限公司科技项目(521852220006)

tripping of all wind turbines in the wind farm, reducing the impact on the power grid.

**Keywords:** direct-drive wind farm, wide-frequency measurement device, sub/super-synchronous oscillation, generator tripping control strategy

## 0 引 言

随着“双碳目标”的提出,以风电、光伏为代表的新能源发电在电力系统中所占的比重日益增大。截至 2022 年底,我国风电装机达 3.65 亿千瓦,占全国发电装机容量的 14.2%<sup>[1]</sup>。然而,随着风电、光伏等新能源大规模接入电网,新型电磁振荡问题逐渐显现。2009 年,美国德州风电场发生次同步振荡事故,20 Hz ~ 30 Hz 的次同步振荡电流对风电场正常运行产生严重影响。2014—2015 年,中国新疆哈密电网发生数起由直驱风机构成的风电场接入电力系统引起的次/超同步振荡事故,对电网稳定运行造成严重影响<sup>[2]</sup>。因此,降低风电场并网发生次/超同步振荡的风险具有重要的工程实用价值。本文主要研究直驱风机构成的风电场,对由双馈风机构成的风电场不在本文讨论范围,下文中所提的风电场均指直驱风电场。

对于风电场次/超同步振荡的影响因素,目前国内外已有大量的研究。文献[3-12]针对风电场或 VSC 并网系统,采用小信号建模方法,分析了电网强度、风机数量、风速、换流器内外环控制参数、锁相环控制参数、风电场聚合特性等对系统稳定性的影响。所有研究都表明电网强度是影响风电场稳定运行最主要的外部因素,当风电场接入电网强度下降,风电场发生振荡的风险提高,并有可能振荡失稳。此外,风电场有功出力的大小对系统稳定性也有较大的影响。文献[6, 11, 13-15]建立风电场接入弱交流电网模型,分析了有功出力的影响。文献[11, 13]表明风电场输出有功功率增加,系统阻尼上升,稳定性提高。而文献[6, 14]表明风电场增加有功出力,系统稳定性减弱,当输出有功功率增大到一定值时系统将发生次/超同步振荡。文献[3]建立单逆变器并网系统,其在轻载和重载的情况下都有可能发生振荡失稳。文献[15]总结了有功出力对系统稳定的影响,通过小信号建模得到特征方程,分析了不同控制参数下有功出力对系统稳定性的影响,表明风电场在不同控制参数下高有功出力与低有功出力均可能发生振荡。

对次/超同步振荡产生机理的深入研究,有助于制定有效的控制策略,降低风电场产生振荡的风险,或者在发生振荡后采取紧急措施阻断事态的发

展。对于风电场而言,一个非常不利的情况是,在运行过程中无法对风机内部的参数进行调节,功率控制是风电场在面临次/超同步振荡时可采取少有的直接手段。在电网调度侧,采取的是对风电场进行切除的方式,文献[16]从电网调度侧分析风电场次/超同步振荡抑制策略,通过分析风电场在次/超同步振荡期间的阻抗特性,确定各风电场优先切除顺序。文献[17]分析双馈风电场振荡模式,通过对振荡波形的分析采取不同的切机方式,通过三轮切机的手段,阻止振荡发散。文献[18]对双馈风电场进行阻抗建模,通过频域阻抗分析,确定区域中紧急控制有效的风电场,当区域电网发生振荡时,按有效顺序切除区域中风电场,提升系统阻尼,抑制振荡。

考虑到风电场发生次/超同步振荡大多与风电场接入电网强度降低有关,而随着量测手段不断丰富,宽频测量装置等量测设备越来越多的接入电网,风电场可以及时获取区域电网内与电网强度变化有关的异常信息,风电场可以利用这些信息进行预警和预防风险。由于现有功率控制手段通常是切除整个风电场,缺乏细化的控制策略,对电网冲击较大<sup>[16, 19]</sup>。如何根据区域电网的变化信息,采取一定手段降低振荡发生风险,并在次/超同步振荡起振初期对风机功率采取有针对性的控制策略,阻止振荡的发展和最终实现抑制,是保障电网安全的重要研究课题。

基于以上分析,本文提出了一种由宽频测量装置辅助状态分析的风电场预警和风机功率控制策略,以应对风电场可能发生的次/超同步振荡。首先利用风电场获取的区域电网内异常信息,风电场采取预动作,同时宽频测量装置密切监视风电场是否发生次/超同步振荡异常状况;当检测到风电场发生振荡后,结合风电场拓扑与实时运行状态,制定执行状态分析切机策略,实现振荡抑制。本文立足于风电场层面,提出应对次/超同步振荡风险和事件时风电场内部功率控制和切机策略,为电力系统治理次/超同步振荡提供一个新的视角和有益思路。相较于传统的振荡监测切机策略,本文策略考虑了风电场内部风机的实时运行状态,通过风电场内部风机动作抑制振荡的发展,避免了切除整个风电场。

本文第 1 节简要介绍直驱风电场产生振荡的机理,第 2 节给出由宽频测量装置辅助的风电场功率控制系统架构,第 3 节提出基于异常信息监测的风电场预警和功率调节预动作策略,第 4 节提出在发生宽频振荡时基于风电场风机距并网点距离和风机运行状态的切机策略,第 5 节基于所提出的控制策略,设计 PSCAD 仿真模型,验证所提方法的有效性,第 6 节给出本文结论。

### 1 风电场振荡风险机理

对于直驱风电场,电网强度是影响风电场稳定运行最主要的外部因素,当风电场接入电网强度下降,风电场发生振荡的风险提高,并有可能振荡失稳。本节将从风电场建模和理论分析角度简要介绍这一机理,本文控制策略主要建立在该机理和客观事实基础上。

直驱风力发电机主要由风力机、永磁同步发电机、机侧变流器、直流电容和网侧变流器构成。风电场通常由相同类型的风机构成<sup>[15]</sup>,且风机运行在相同的控制参数与相似的运行工况,因此可以近似采用单台风机等值模型分析风电场运行状况。风电场并网示意图如图 1 所示。图 1 中  $L_g$ 、 $C_g$  表示风机网侧滤波电感、无功补偿并联电容, $R_1$ 、 $L_1$  表示风电场并网长距离输电线线路参数。由于直驱风机通过全功率变流器接入电网,其并网动态主要取决于网侧变流器控制特性,因此对风电场振荡风险分析忽略机侧动态过程,将风力机、永磁同步发电机、机侧变流器简化为恒功率源<sup>[20]</sup>。

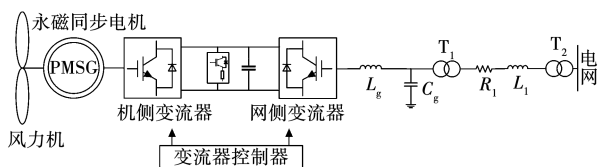


图 1 直驱风电场并网结构图

Fig. 1 Direct-drive wind farm grid-connected structure diagram

风机网侧变流器控制采用  $dq$  变换,通过前馈控制实现  $dq$  分量解耦<sup>[7]</sup>控制。 $d$  轴分量控制模型为定直流侧电压控制模式,实现直流侧电压恒定。 $q$  轴分量控制模式为无功控制模式,通过控制  $q$  轴电流  $i_q$  的大小,控制风机输出的无功功率,通常设定  $q$  轴电流的参考值为 0,即风机不输出无功功率。在  $dq$  变换过程中,锁相环 PLL 获取电网电压相位,实现风电场与电网同步。

风电场整体振荡风险分析需考虑直流环节动态数学模型,换流器外环和内环控制动态数学模型,PLL 动态数学模型,以及并网线路动态数学模型<sup>[18]</sup>。综合各部分动态模型后,在平衡点  $x_0$  处对系统进行线性化,可建立系统小信号状态方程如下:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A_s \Delta x \quad (1)$$

式中:状态变量  $x = [u_{dc}, x_1, x_2, x_3, \theta_{pll}, x_{pll}, i_d, i_q, i_{dL}, i_{qL}, u_{pccd}, u_{pccq}]$ ,  $u_{dc}$  为直流侧电容电压, $x_1, x_2, x_3$  为换流器外环和内环控制状态变量, $\theta_{pll}, x_{pll}$  为 PLL 锁相环状态变量, $i_d, i_q$  为变流器输出电流, $i_{dL}, i_{qL}$  为并网线路电流, $u_{pccd}, u_{pccq}$  为风电场并网点电压; $A_s$  为系统小信号模型的特征矩阵; $\Delta x$  为状态变量的小扰动量。

基于以上风电场模型,选取 100 台 2 MW 直驱风机组成的风电场通过长距离输电线并入交流电网,分析该风电场的振荡风险。直驱风电机参数与并网系统参数参考文献<sup>[15, 20]</sup>。当风电场在不同运行状态与不同控制参数下,接入弱电网时,可得表 1 所示的次/超同步振荡模式特征值。可见当风电场运行在高有功出力与低有功出力时,由于控制参数设计不合理,风电场均有产生次/超同步振荡的风险。本文提出的控制策略将只考虑风电场接入电网强度与风机的有功出力,不考虑风机内部控制参数对振荡的影响,具体相关参数分析可参考文献<sup>[15, 20-21]</sup>。

表 1 次/超同步振荡模式特征值

Tab. 1 Sub/super-synchronous oscillation mode eigenvalues

风电场输出功率/p. u.	次/超同步振荡模式特征值
0.9	$13.78 \pm j2\pi 32.71$
0.1	$1.76 \pm j2\pi 12.15$

### 2 风电场功率控制系统架构

根据上文分析与现有研究,电网强度降低是本文重点考虑的引起风电场振荡的诱因。引起风电场接入电网强度改变的因素包括线路检修、雷击跳闸等。当风电场并网区域内发生如上事故时,风电场根据区域故障信息,采取预动作,降低发生次/超同步振荡的风险。同时宽频测量装置进入紧急监测状态,对风电场宽频段内振荡进行监测与预警。当宽频测量装置检测到风电场开始发生次/超同步振荡时,迅速向风电场发出告警。风电场在收到宽频测

量装置的告警信息后,制定控制策略,并下发动作指令到对应风机,进行实时控制。图 2 给出了宽频测量装置辅助的风电场控制架构,具体包括如下过程。

过程 1:区域内风电场所连电网发生雷击跳闸等事故,风电场收到事故信息,进行预动作,同时宽频测量装置进入紧急监测状态;

过程 2:宽频测量装置监测风电场的宽频信息,

当检测到风电场开始发生次/超同步振荡时,向风电场发出告警;

过程 3:风电场收到告警信息后,根据场站内风机运行状态制定控制策略,并下发到对应风机,进行实时控制;

过程 4:宽频测量装置上传风电场监测信息,辅助调度侧进行后续动作。

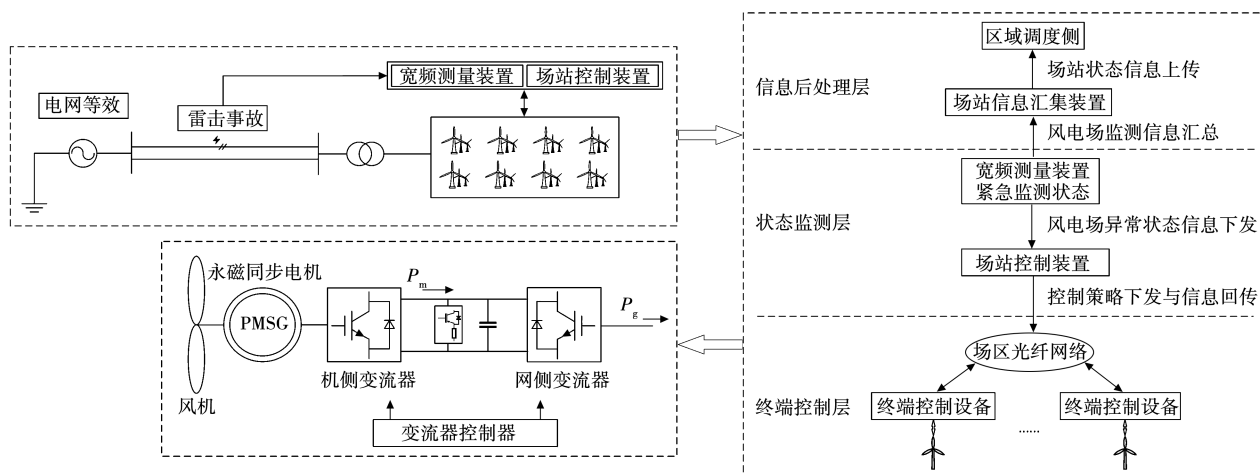


图 2 宽频测量装置辅助风电场控制架构

Fig. 2 Wind farm control architecture with wide-frequency measurement device assistance

### 3 振荡风险下预动作控制策略

实际运行中,由于风电场内部控制参数在运行期间不可调整,因此当风电场并网外部环境改变后,风电场需要通过功率调节动作降低发生振荡的风险。此外,当风电场开始出现振荡时,需要进一步提升对功率的调节控制以抑制和消除振荡<sup>[22]</sup>。

由上文风电场振荡风险分析可知,风机在不同的控制参数下,其输出功率与次/超同步振荡的关系不同,风机在较高有功出力与较低有功出力下均可能发生振荡。因此,在只能控制风电场输出功率的条件下,预动作策略需要考虑到风机高输出功率与低输出功率的情况,同时风电场在执行预动作策略后不影响其正常调控动作。设计如下风电场预动作策略,预动作策略为:

$$S_i = \begin{cases} 1 & p_i > \delta_{\max} \\ 0 & \delta_{\max} \geq p_i \geq \delta_{\min} \\ -1 & p_i < \delta_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为第*i*台风机预动作策略; $\delta_{\max}$ 与 $\delta_{\min}$ 为预动作功率阈值; $p_i = P_i/S_n$ 为第*i*台风机归一化输出功率, $P_i$ 为第*i*台风机实际输出功率, $S_n$ 为风机额定输出功率; $S_i$ 为 1 时第*i*台风机功率降到 $\delta_{\max}$ , $S_i$ 为

0 时第*i*台风机无操作, $S_i$ 为 -1 时切除第*i*台风机。功率阈值 $\delta_{\max}$ 与 $\delta_{\min}$ 取值受风机内部参数与外部电网参数影响,具体风电场可根据实际运行经验确定取值,通常情况下可选取 $\delta_{\max}$ 为 0.9 p. u., $\delta_{\min}$ 为 0.1 p. u.。当风电场并网区域发生异常后,风电场控制装置根据收集的场站风机运行状态,按照如上所述制定预动作策略,并下发到相应风机执行。在并网区域异常情况消除后,风电场退出预动作运行方式,恢复正常运行。

在风电场预动作同时,宽频测量装置密切监测测量数据宽频段内振荡信息。宽频测量装置具有很高的时间精确度<sup>[23]</sup>,并且可以预置多种算法,根据测量环境进行切换,满足不同测量环境的特定需求,其生成的数据格式如图 3 所示。当风电场收到场域内如雷击跳闸等事故报警信息后,宽频测量装置切换测量算法,进入紧急量测状态,采用时间优先级算法满足更短的测量时间要求,在短时间内检测风电场次/超同步振荡信息。当检测到风电场发生次/超同步振荡后,宽频测量装置置位告警信号,向风电场发出告警<sup>[24]</sup>。风电场在收到告警信息后,采取相应的控制措施。

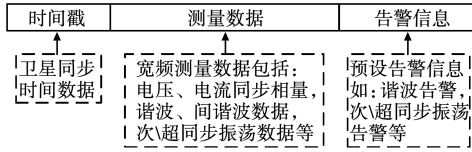


图 3 宽频测量装置数据结构

Fig. 3 Data structure of wide-frequency measurement device

#### 4 振荡告警下切机控制策略

风电场在执行预动作后,若宽频测量装置依然检测到风电场发生次/超同步振荡,则迅速向场站控制装置发送告警信息。接收到告警信息后,风电场迅速分析场域内风机运行状态得出控制策略。由于风机在高功率与低功率运行时,均可能产生次/超同步振荡,因此控制策略设计需要考虑风机不同功率运行的状态。此外结合风电场并网点电网强度的影响,控制策略可以把风机接入并网点距离作为单机接入电网强度的估计。综合以上两点,提出如下振荡切机指标:

$$A = \xi(p)d \quad (3)$$

式中: $\xi(p)$ 为风机运行功率相关函数; $d$ 为风机距并网点归一化空间距离。风机运行功率相关函数 $\xi(p)$ 取值范围为 $[0, 1]$ ,该函数用于表征该风机功率与发生振荡的相关性,考虑风机在高功率与低功率运行时振荡概率特征,选取如下函数形式:

$$\xi(p_i) = 2p_i^2 - 2p_i + 1 \quad (4)$$

式中: $p_i$ 为第*i*台风机归一化输出功率。图 4 给出了式(4)功率相关系数曲线,从中可以看出风机运行在高功率与低功率时,功率相关系数输出较高值,表明该风机具有较高的切除优先级。同时功率相关系数采用简单函数设计,方便风电场控制装置进行快速计算,在短时间内得出控制策略,下发到场域内风机。

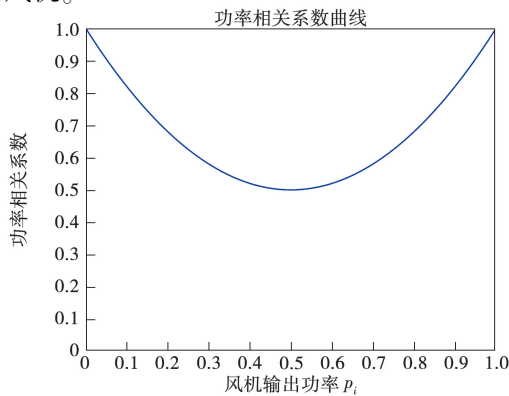


图 4 功率相关系数曲线

Fig. 4 Power correlation coefficient curve

式(3)中第*i*台风机归一化空间距离 $d_i$ 计算公式如下:

$$d_i = \begin{cases} \frac{D_i}{D_{\max}} + \lambda_d & \frac{D_i}{D_{\max}} + \lambda_d < 1 \\ 1 & \frac{D_i}{D_{\max}} + \lambda_d \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $D_i$ 为第*i*台风机距并网点实际空间距离; $D_{\max}$ 为场域内距并网点最远风机的实际空间距离; $\lambda_d$ 为距离调整参数,其根据风电场运行实际情况设计,通常可取 0.3。通过以上的设计,在同一场域内,控制器策略装置提前获取每台风机距离 $d_i$ ,根据实时上传的风机运行功率 $p_i$ 计算每台风机对应的切机指标 $A_i$ 。

由风电场历史运行数据或通过仿真设计,设定风电场振荡切机阈值指标 $A^*$ ,通常可取 0.5。在风电场收到切机动作指令后,场站控制装置根据风机实时上传数据,计算每台风机切机指标。比较每台风机切机指标与阈值指标的大小,大于阈值指标的风机做切机处理,小于阈值指标的风机进入观察队列。整体风电场控制策略如图 5 所示。

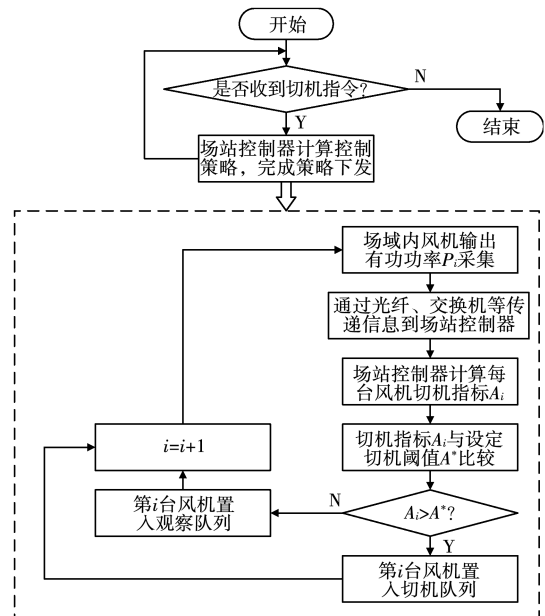


图 5 控制策略流程

Fig. 5 Control strategy process

#### 5 仿真实验验证

为验证提出控制策略的有效性,在 PSCAD 中搭建风电场仿真模型,模拟风电场并网点电网强度发生改变时,本文控制策略对可能发生的次/超同步振荡的预防和抑制作用。所建模型拓扑结构如图 6 所示,其中风电场包含 10 台风机,风电场并网线路参数为 $L_i$ 、 $R_i$ ,风机距并网点距离 $d_i$ 由线路参数 $L_i$

与  $R_i$  等效;每台风机使用的永磁直驱风机的控制模型与参数参考文献[6-7];设定归一化距离等效线路参数为  $R_n=0.36 \Omega$ 、 $L_n=0.001 \text{ H}$ ,不同的并网节点距离等效线路参数采用归一化距离等效线路参数等比例得出。仿真模型通过改变风电场接入电网线路参数  $L_i$  改变风电场并网电网强度,模拟风电场接入弱电网,引发风电场次/超同步振荡失稳。

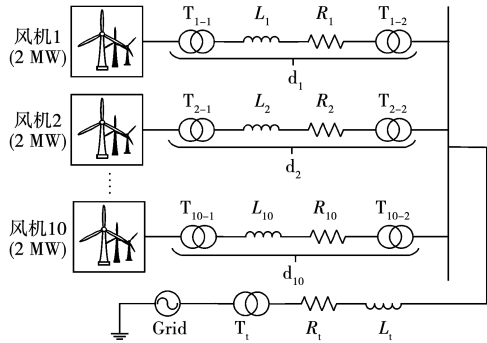


图 6 风电场风机并网拓扑结构

Fig. 6 Grid-connected topology of wind turbine in wind farm

仿真设置三组不同风电场运行状态,各状态下风机初始输出功率在表 2 中列出。状态 1 模拟风电场多数风机处于高风速运行状态,假设在仿真时刻 2.9 s 时风电场接入电网强度发生改变,在仿真时刻 3 s 时风电场获取到该异常信息,开始进行预动作。图 7 展示了风电场未进行预动作与风电场执行预动作后分别对应的风电场并网节点处电流与有功功率,结果显示在执行预动作后,风电场发生的振荡幅度明显降低,且风电场逐渐恢复稳定运行。预动作策略在一定程度上提高了风电场应对电网异常的能力。

表 2 风电场风机运行状态

Tab. 2 Operating state of wind turbine in wind farm

风机	风机距 并网节点 归一化距离	状态 1 输出功率 /MW	状态 2 输出功率 /MW	状态 3 输出功率 /MW
风机 1	0.3	0.2	1.5	0.3
风机 2	0.6	0.2	1.5	0.3
风机 3	0.3	0.2	2	0.4
风机 4	0.6	2	2	0.4
风机 5	0.9	2	2	0.4
风机 6	0.3	2	0.2	0.5
风机 7	0.6	1.5	0.2	0.5
风机 8	0.9	1.5	0.2	0.5
风机 9	0.3	1.5	1.8	1.5
风机 10	0.6	1.5	1.8	1.5

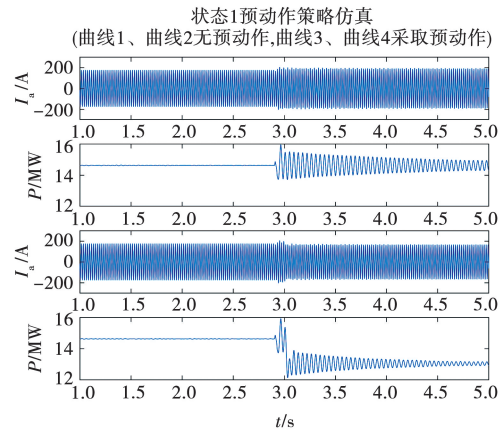


图 7 状态 1 预动作策略仿真

Fig. 7 Simulation of state 1 pre-action strategy

状态 2 同样模拟风电场多数风机处于高风速运行状态,在仿真时刻 3 s 时风电场接入电网强度发生改变,在 3.1 s 时风电场启动了预动作。图 8 给出对该运行场景进行控制的整个过程风电场并网节点处电压、电流与有功功率仿真曲线。图 9 给出了宽频监测和测量结果,显示当接入电网强度发生变化后,电网电流信号中很快出现了 44 Hz、36 Hz、56 Hz、64 Hz 等次/超同步分量,表明预动作未能阻止风电场振荡发展,风电场发生了次/超同步振荡,宽频测量装置随即报警。风电场接收到报警后,在仿真时间 4 s 时,执行表 3 中状态 2 切机策略。图 9 宽频测量结果显示执行切机策略后宽频振荡分量逐渐衰减和消失。从图 8 有功功率曲线也可以看出,在仿真时间 3 s 后有功功率包含有振荡分量,在 4 s 时切除部分风机后振荡减弱直至消失,同时在整个运行控制过程中,风电场保留部分风机运行,其并未完全脱离电网运行。

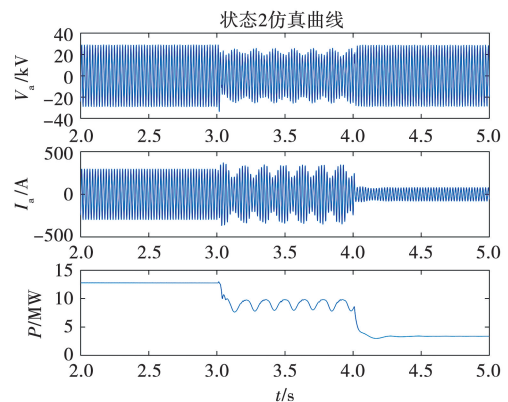


图 8 状态 2 控制策略仿真

Fig. 8 Simulation of state 2 control strategy

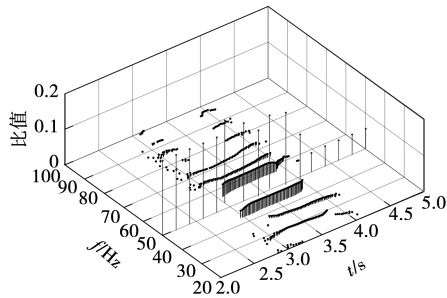


图 9 状态 2 仿真 A 相电流宽频测量结果

Fig. 9 Simulated A-phase current of state 2 wide-frequency measurement result

状态 3 模拟风电场多数风机处于低风速运行状态,在仿真时刻 2 s 时风电场接入电网强度发生改变,此状态下风电场并未进行预动作。图 10 和图 11 分别给出风电场并网点处电压、电流与有功功率仿真曲线和对电流的宽频监测和测量结果。宽频测量结果显示,在仿真时间 2 s 之后电网中同时出现了 26 Hz 次同步振荡和 74 Hz 超同步振荡。风电场接收到报警后,执行表 3 中状态 3 切机策略,风电场次/超同步振荡逐渐减弱消失。从图 10 功率曲线可以看出,在切机后风电场保留部分风机运行,与状态 2 类似风电场没有完全脱离电网运行。

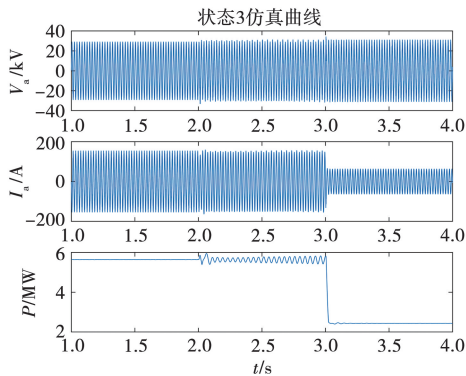


图 10 状态 3 控制策略仿真

Fig. 10 Simulation of state 3 control strategy

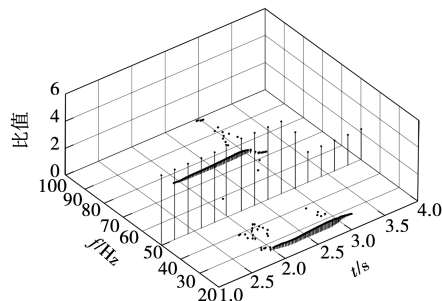


图 11 状态 3 仿真 A 相电流宽频测量结果

Fig. 11 Simulated A-phase current of state 3 wide-frequency measurement result

表 3 风电场切机策略表(1 为切除、0 为保留)

Tab. 3 Wind turbine tripping strategy list in wind farm (1 represents tripping, 0 represents remaining)

风机	状态 2 切机策略	状态 3 切机策略
风机 1	0	0
风机 2	1	1
风机 3	1	0
风机 4	1	1
风机 5	1	1
风机 6	1	0
风机 7	1	1
风机 8	1	1
风机 9	0	0
风机 10	1	1

上述三种状态仿真模拟了风电场在不同运行状态下面对电网异常情况,采取控制策略的效果。状态 1 仿真验证了预动作策略的有效性,状态 2 与状态 3 仿真验证了切机控制策略的有效性。综合上述三种风电场状态仿真结果,在风电场不同的运行状态下,本文所提风电场控制策略可以实现风电场对次/超同步振荡的抑制,且风电场在执行切机控制策略时,风电场并未切除全部风机,在切机后仍保留部分风机运行,相较于切场策略减少了对电网的冲击。

## 6 结 论

针对目前风电场可能发生的次/超同步振荡问题,缺少利用区域电网异常信息与场站控制策略的问题,本文提出一种宽频测量装置辅助状态分析的风电场预警和风机功率控制策略,具体结论如下:

1) 本文提出的宽频测量装置辅助风电场控制架构基于对区域电网内可能诱发次/超同步振荡异常事件预警反应,以风电场为行为主体建立了功率预调节和策略切机两道防线,为电力系统治理次/超同步振荡提供了有益思路;

2) 风电场在预警状态下的预动作,通过调节各风机功率避开引发次/超同步振荡的敏感区,在一定程度上降低了风电场发生振荡的风险,提高了风电场应对电网异常的能力;

3) 风电场在发生次/超同步振荡后,结合风电场中风机的位置拓扑与风机运行状态制定执行切机策略,仿真实验证明该策略可以实现对次/超同步振荡的抑制,且在切机后仍保留部分风机运行,相较于切场策略减少了对电网的冲击。后续需要结合风电场内部具体控制参数,优化控制策略参数设计。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 2023 年一季度新闻发布会文字实录—国家能源局[EB/OL]. (2023-02-13)[2023-10-19]. [https://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c\\_1310697149.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm).
- [2] CHENG Y, FAN L, ROSE J, et al. Real-world subsynchronous oscillation events in power grids with high penetrations of inverter-based resources[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 316-330.
- [3] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1061-1067.  
WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [4] 王正男, 张新慧, 彭克, 等. 惯量阻尼自适应虚拟直流发电机控制策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(1): 189-194.  
WANG Zhengnan, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Control strategy of inertia damping adaptive virtual DC generator[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(1): 189-194.
- [5] 李东东, 张先明, 姚寅, 等. 考虑风速时空分布及机组运行状态差异的风电场有效惯量估计[J]. *电力建设*, 2024, 45(1): 112-124.  
LI Dongdong, ZHANG Xianming, YAO Yin, et al. Estimation of effective inertia of wind farms considering temporal and spatial distribution of wind speed and differences in unit operating states[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(1): 112-124.
- [6] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 直驱风电并网系统中锁相环引起次同步振荡的开环模式谐振机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 1935-1950, 2209.  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Mechanism analysis of open-loop modal resonance on subsynchronous oscillations caused by PLL in power systems with integrated PMSGs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 1935-1950, 2209.
- [7] 肖垒, 蔺红. 直驱风电场经交流并网系统 dq 阻抗模型及稳定性分析[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12): 65-70.  
XIAO Lei, LIN Hong. DQ impedance model and stability analysis of direct-drive wind farm via AC grid-connected system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 65-70.
- [8] 李漾, 田芳, 张星, 等. ANPC 三电平换流器高效电磁暂态建模仿真方法[J]. *浙江电力*, 2024, 43(1): 80-90.  
LI Yang, TIAN Fang, ZHANG Xing, et al. An efficient electromagnetic transient modeling and simulation method for ANPC three-level converters[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(1): 80-90.
- [9] WANG D, LIANG L, SHI L, et al. Analysis of modal resonance between PLL and DC-link voltage control in weak-grid tied VSCs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1127-1138.
- [10] 苗长新, 祝宇航, 赵文鹏, 等. 基于一种新型正弦幅值积分器的谐波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(2): 39-47.  
MIAO Changxin, ZHU Yuhang, ZHAO Wenpeng, et al. Harmonic detection method based on a new sinusoidal amplitude integrator[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2): 39-47.
- [11] LIU H, XIE X, HE J, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak ac networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [12] 何义琼, 李鑫, 贾海清, 等. 考虑风电时空特性和相对波动率的平衡成本分摊方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(1): 157-166.  
HE Yiqiong, LI Xin, JIA Haiqing, et al. Method for wind power balancing cost allocation considering spatiotemporal characteristics of wind power and relative volatility[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(1): 157-166.
- [13] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(9): 2366-2372.  
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and ac systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [14] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [15] 郝亚峰, 梁军, 王克文, 等. 弱电网下风电有功出力对次同步振荡特性影响分析及参数调整[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2752-2765.  
HAO Yafeng, LIANG Jun, WANG Kewen, et al. Influence of active power output of full-converter wind farm on subsynchronous oscillation characteristics and parameter adjustment in weak grid[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2752-2765.
- [16] 秦爽, 李忠德, 岳涵, 等. 基于阻抗特性的次/超同步振荡风电场振荡源识别及切机策略[J]. *东北电力技术*, 2023, 44(1): 1-5, 11.  
QIN Shuang, LI Zhongde, YUE Han, et al. Wind farm oscillation source identification and tripping strategy for

- sub /super-synchronous oscillation based on impedance characteristics[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(1): 1-5, 11.
- [17] 卓毅鑫, 李凌, 赵成斌, 等. 一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 164-172.  
ZHUO Yixin, LI Ling, ZHAO Chengbin, et al. A precision wind farm tripping strategy under sub-synchronous oscillation situation based on oscillation divergence rate[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 164-172.
- [18] 陈继开, 李平, 常旗峰, 等. 含 SVG 的双馈风场风速变化条件下高频谐振问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 38-50.  
CHEN Jikai, LI Ping, CHANG Qifeng, et al. Analysis of high frequency resonance problem in doubly-fed wind field systems with SVG with wind speed variation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 38-50.
- [19] 毛永恒, 高丙团, 胡正阳, 等. 计及双馈机组直流卸荷的风电场紧急降功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 70-83.  
MAO Yongheng, GAO Bingtuan, HU Zhengyang, et al. Emergency power reduction control strategy of wind farm considering dc chopper of doubly-fed induction generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 70-83.
- [20] LI Y, FAN L, MIAO Z. Wind in weak grids: Low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
- [21] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑 PLL 和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.  
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.
- [22] 钟旭, 常鹏飞, 侯凯, 等. 风电场功率控制一体化监控系统开发与应用[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 168-173.  
ZHONG Xu, CHANG Pengfei, HOU Kai, et al. Development and application of wind farm power control integrated monitoring system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 168-173.
- [23] 伍双喜, 陈垒, 杨银国, 等. 面向宽频振荡抑制的宽频相量测量装置[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 215-220.  
WU Shuangxi, CHEN Lei, YANG Yinguo, et al. Wideband phasor measurement device for wideband oscillation mitigation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 215-220.
- [24] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 电网宽频振荡实时监测技术方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 152-159.  
FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Technical scheme for real-time monitoring of wide-frequency oscillation in power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 152-159.

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-05-28

作者简介:

裴茂林(1980—),男,硕士,正高级工程师,研究方向为广域测量系统、电测计量、嵌入式系统开发。

E-mail:29589219@qq.com

王泽斌(1998—),男,通信作者,硕士研究生,研究方向为宽频测量,电力系统仿真。

E-mail:wzb21@mails.tsinghua.edu.cn

汪芙平(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电磁测量、信号处理。E-mail:wangfuping97@mails.tsinghua.edu.cn

范亚军(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为电测计量技术、充电设施检测技术。E-mail:18328068786@163.com

黄松岭(1970—),男,博士,教授,研究方向为电磁测量、无损检测。E-mail:huangsling@tsinghua.edu.cn

赵伟(1956—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电磁测量。E-mail:zhaowei@tsinghua.edu.cn

(编辑 王克祥)