

中国电机工程学报  
*Proceedings of the CSEE*  
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

## 《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述  
作者: 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 朱凌志, 王满亮, 全相军, 李少林  
收稿日期: 2023-02-02  
网络首发日期: 2023-05-31  
引用格式: 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 朱凌志, 王满亮, 全相军, 李少林. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2107.TM.20230530.1551.003.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述

高丙团<sup>1</sup>, 胡正阳<sup>1</sup>, 王伟胜<sup>2</sup>, 朱凌志<sup>2</sup>, 王满亮<sup>1</sup>, 全相军<sup>1</sup>, 李少林<sup>2</sup>

(1. 东南大学, 江苏省南京市, 210096; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市海淀区, 100192)

Review on Fast Active Power Control and Frequency Support Technologies of

Renewable Energy Stations

GAO Bingtuan<sup>1\*</sup>, HU Zhengyang<sup>1</sup>, WANG Weisheng<sup>2</sup>, ZHU Lingzhi<sup>2</sup>, WANG Manliang<sup>1</sup>,

QUAN Xiangjun<sup>1</sup>, LI Shaolin<sup>2</sup>

(1. Southeast University; 2. China Electric Power Research Institute)

**ABSTRACT:** Increasing penetration of renewable energy sources represented by photovoltaic (PV) and wind power decreases the inertia level and frequency support capability of the power system, which leads to the frequency stability becoming one of the key issues of the safety and stability and the efficient consumption of new energy sources of current power system. Fast active power-frequency response and active support capability of grid-connected renewable energy generation units and stations are the research hotspot. According to the main line of “fast active power control of unit - fast active power control of energy station - fast frequency support of energy station”, the state of the art in fast active power control and frequency support for renewable energy stations was reviewed. Meanwhile, the factors limiting the rapidity of frequency response of renewable energy stations were analyzed from the perspectives of frequency measurement, communication time delay, control response mode, etc. It is pointed out that mechanical load of wind turbine, hundred-millisecond-level active power control of wind farm, frequency regulation mode selection and optimization of renewable energy stations, and transient active-reactive power cooperative control are the four key issues to improve the fast active power-frequency response capability of renewable energy generation units and stations. Finally, the future research focuses were provided and discussed.

**KEY WORDS:** Renewable energy station; wind farm; photovoltaic power station; active power control; frequency response; frequency measurement

**摘要:** 以光伏/风电为代表的新能源高比例并网降低了电力系统的惯量水平和频率支撑能力, 频率稳定问题成为当前电网安全稳定和新能源高效消纳的核心问题之一。发展新能源

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFB2400500)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFB2400500).

发电并网机组单元和场站的快速有功频率响应和主动支撑能力是当前的研究热点。本文以“单机快速有功控制-场站快速有功控制-场站快速频率支撑”为主线梳理了光伏/风电的快速有功控制及频率支撑发展现状, 分析了频率检测、通信延时和控制响应模式等因素对光伏/风电场站频率响应快速性的影响, 指出了风电机组的机械载荷约束、风电场百毫秒级有功控制、场站的调频响应模式选择和优化、暂态有功无功协同控制是提升新能源发电单元和场站的快速有功频率响应能力的四个关键问题, 最后对未来的重点研究方向进行了展望和讨论。

**关键词:** 新能源场站; 风电场; 光伏电站; 有功控制; 频率响应; 频率检测

## 0 引言

随着以光伏、风电为代表的新能源接入比例的持续攀升, 其分散性、弱支撑、低惯性和低抗扰的特点为新型电力系统带来严峻挑战<sup>[1]-[3]</sup>。电力系统惯量水平和频率电压支撑能力下降, 交直流故障引起的暂态电压和频率等稳定问题成为影响新能源富集地区电网安全稳定和新能源高效消纳的核心问题<sup>[4]-[5]</sup>。在交流电力系统中, 电压的局部失稳影响范围有限, 而频率问题则会影响整个区域电网的稳定运行。2019年英国伦敦大停电事故是由于突发的大功率缺额导致频率平衡破坏, 大量分布式电源因频率变化率保护动作跳闸脱网, 触发频率响应服务启动, 燃气机在频率急速下降的影响下跳闸脱网, 这导致系统频率二次下降并触发低频切负荷动作<sup>[6]-[7]</sup>。事件细节表明, 十分有必要加强含高比例可再生能源电网的频率动态行为分析, 研究受扰后系统频率响应的复杂特性<sup>[8]</sup>。而2021年美国德州大停电事故则是由暴风雪极端天气引发供需严重失衡从而导致频率严重跌落继而触发切负荷等保护措施

施动作<sup>[9]</sup>。鉴于此,包括我国在内的多个国家均已对新能源参与频率控制提出相应的要求或标准<sup>[10],[11]</sup>。

变流器作为新能源场站快速频率支撑策略的底层实现设备,其并网控制主要分为电网跟随型和电网构建型两种,尽管电网构建型控制的电压源外特性更加符合电力系统功角特性,但其在同步稳定性、故障穿越和多变流器协同等方面存在的问题使得其在大电网中还未得到大规模的推广应用<sup>[12],[13]</sup>。同时,鉴于目前我国电力系统的形态,虽然新能源成为主体电源已是大势所趋,但在未来较长时间内同步电源仍占据相当比例,预计同步电源发电量在2030年占比约为80%,至2050年以前仍占比50%以上<sup>[14]</sup>,同步机组仍然承担组网作用且新能源机组的锁相同步控制技术较为成熟<sup>[15]</sup>,在未来一段时期新能源并网控制仍以电网跟随型为主。立足我国电网的发展现状,发展电网跟随型控制的主动快速频率支撑技术是当前的需要解决的紧迫任务。因此,本文主要针对电网跟随型控制的光伏/风电场站的快速有功控制与频率支撑技术进行研究综述。

对于以光伏/风电为代表的新能源有功控制和频率支撑技术,当前光伏单元与风电机组已具备稳态支撑能力,但暂态支撑还局限于单机层面的故障穿越以及动态无功电流注入,难以适应未来新型电力系统的安全稳定运行需求。亟需将支撑作用场景从稳态、小扰动拓展到暂态、大扰动,支撑模式从单机独立响应拓展到单机-场站的协同控制<sup>[16]</sup>。为了应对暂态时间尺度下的扰动,系统对于光伏/风电场站的频率响应快速性提出了更高的要求。当系统受到暂态有功扰动时,需要新能源场站进行快速频率支撑。当系统发生严重故障导致有功大量盈余时,当前工程上对新能源场站一般采用切机/切场来确保电力系统的稳定运行。但新能源场站在切除后重新并网需要一定的时间和程序,期间也会产生发电量/经济损失,同时切机/切场对风电机组带来机械部件疲劳损伤也会影响机组的稳定运行寿命。切机/切场属于基于稳定控制系统的电力系统第二道防线,新能源场站内的稳控装置接收上层装置发出的控制命令,进而控制断路器进行切机/切场。GB/T 40587-2021《电力系统安全稳定控制系统技术规范》规定,单个稳控装置整组动作时间不应大于30ms。而断路器动作时间(含中间继电器时间)在70ms以内<sup>[17]</sup>。因此,为了满足当前新能源场站切机/切场控制的时间尺度,达到“以调代切”的目的,新能源场站的紧急有功控制应在100ms以内完成。而新

能源场站的快速频率支撑除了需要考虑机组单元自身的快速有功控制时间外,还需要考虑频率检测、算法计算、通信延迟等时间。目前,新能源光伏/风电单元和场站快速有功控制及频率响应的行业现有水平,如表1所示。

表1 新能源场站快速有功/频率控制当前响应水平

单机/场站	指标内容	行业现有水准
光伏逆变器	快速有功控制响应时间	约20ms <sup>[18]</sup>
	紧急有功控制响应时间	无
风电机组	快速有功控制响应时间	约200ms <sup>[19]</sup>
	紧急有功控制响应时间	无
光伏电站	快速频率控制响应时间	约1s <sup>[20]</sup>
	紧急有功控制响应时间	直接切除(100ms) <sup>[17]</sup>
风电场站	快速频率控制响应时间	约5s <sup>[21]</sup>
	紧急有功控制响应时间	直接切除(100ms) <sup>[17]</sup>

注1:“快速有功控制”是指为跟踪有功指令所采取的快速控制技术。  
 注2:“紧急有功控制”是指严重故障时由稳控系统决策的有功控制,特指紧急降功率。  
 注3:“快速频率控制”是指应对暂态频率波动所采取的快速控制技术。

本文结合新能源场站频率响应全过程研究实践现状,按场站集中式控制与场站分布式控制两种技术方案梳理出新能源场站频率响应过程时序如图1所示,其主要包含了频率检测、有功频率响应算法、通信延迟和单机执行等环节。本文按照图1所示的频率响应各环节要素,对基于电网跟随型控制的光伏/风电场站的快速有功控制与频率支撑进行研究综述,整体思路与论文框架如图2所示。根据新能源场站的快速频率响应全过程,将主要内容分为单机快速有功控制、场站快速有功控制和场站快速频率支撑三个部分。旨在梳理新能源场站快速有功控制及频率支撑技术的研究现状,归纳总结光伏/风电场站快速频率响应面临的关键问题和挑战,并对未来高比例新能源电力系统的有功控制与频率支撑问题进行研究展望。

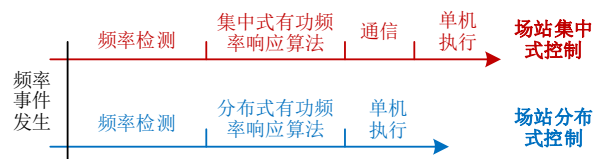


图1 新能源场站频率响应过程时序图

Fig.1 Time-series diagram of frequency response process of renewable energy stations



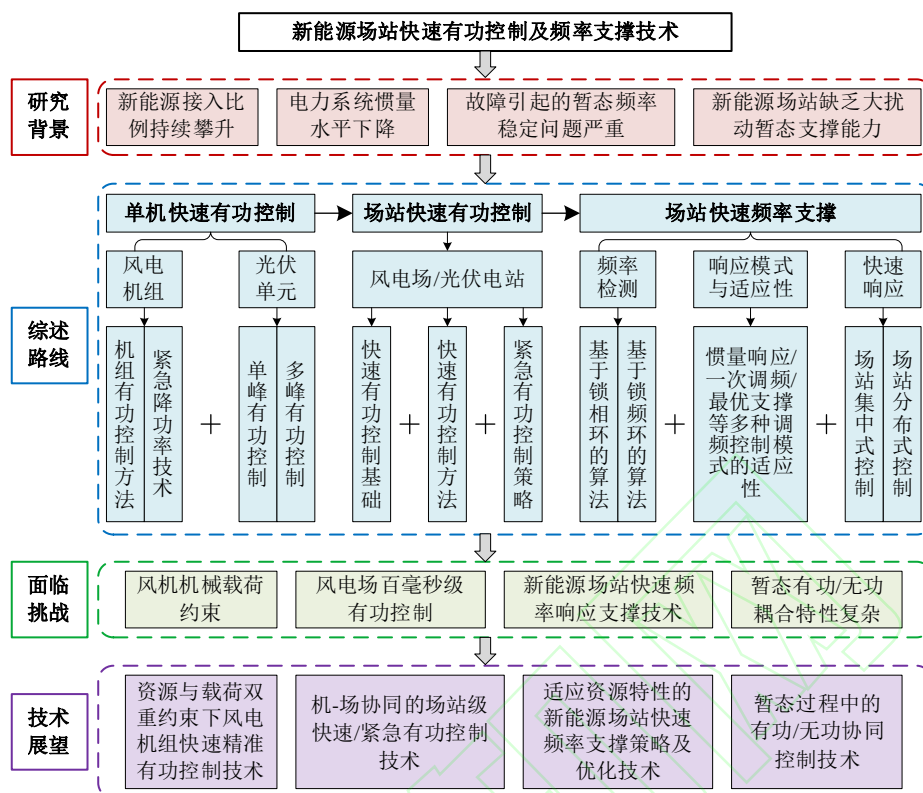


图2 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述框架

Fig. 2 Review framework of fast active power control and frequency support technologies for renewable energy stations

## 1 单机快速有功控制现状及分析

### 1.1 光伏发电单元快速有功控制技术

目前光伏发电单元主要使用的光伏逆变器包括组串式逆变器和集中式逆变器。早期,光伏发电单元大都以最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制模式运行,其目的在于最大化输出功率,提高光伏发电量。但是,随着光伏发电的渗透率不断提高,电网对光伏并网的要求也逐渐增加。为了满足电网调度的需求,光伏发电单元需要按照调度指令值进行有功输出,这使得光伏发电单元具备主动支撑电网频率调节的能力<sup>[22]</sup>。

#### 1.1.1 单峰条件下的光伏单元快速有功控制技术

当光伏阵列中所有组件受到的光照和温度相等时,光伏阵列的输出功率-电压曲线是单峰曲线,只存在一个最大功率点。通过调节光伏阵列的输出电压,改变光伏发电单元的工作点,便能实现 MPPT 控制。常见的 MPPT 控制算法包括扰动观察法、电导增量法、模糊控制等。为了避免光照变化时扰动观察法出现误判现象,同时要求算法简单、易于实现,目前,工程上所采用的是三点法,能够实现快速、精准地 MPPT 控制。

当要求光伏发电单元按照调度指令值进行有

功输出时,需要对光伏发电单元的工作点进行调节。与 MPPT 算法的思想类似,通过调节光伏阵列的输出电压,调整光伏发电单元的工作点转移到目标工作点。

#### 1.1.2 多峰条件下的光伏单元快速有功控制技术

当光伏阵列中所有组件发电条件不同时,例如自然云层部分遮挡,局部的阴影遮挡会导致光伏组件之间的失配,使得光伏阵列的输出功率-电压曲线变成多峰曲线。此时,传统的 MPPT 算法搜索最大功率点很容易陷入局部最大功率点。对于多峰 MPPT,一般采用诸如粒子群、蜂群和灰狼等元启发式算法进行全局综合寻优,也可综合扰动观察法跟踪速度快和元启发式算法全局寻优能力好的优点,先通过元启发式算法搜索到全局最大功率点附近,然后切换到扰动观察法快速平稳地跟踪到全局最大功率点<sup>[23]</sup>。此外,也有学者研究从机理出发建立多峰最大功率点的数学模型从而直接计算出最大功率点<sup>[24]</sup>。元启发式算法以及模型方法对系统硬件资源有一定要求,当前工程上一般采用定时全局功率扫描的方法解决多峰 MPPT 问题。通过在光伏电站中设置一个参考逆变器,使其定时对全局电压范围的工作点进行扫描,然后将全局最大功率点的信息发送给其余逆变器。

多峰条件下光伏发电单元按照调度指令值进行有功输出的实际需求不多,但是目前也有学者进行了相应的研究。文献[25]基于曲线拟合的方法确定有功指令值在光伏阵列输出功率-电压曲线上的具体位置,实现光伏发电单元在多峰条件下对任意指令值的精准跟踪。文献[26]基于多峰 MPPT 算法,以简单的多峰曲线分析如何逐步跟踪到目标工作点。但是该方法只适用于简单的多峰场景,复杂多峰场景下功率跟踪的速度和精度都不能得到保证。

## 1.2 风电机组快速有功控制技术

与光伏发电单元不同,风电机组包含的大量机械惯性元件增加了风电机组快速有功控制的难度,制约了风机有功控制的快速性。

### 1.2.1 风电机组有功控制方法

风电机组内部控制器间的通信延时及其有功控制策略是影响风机有功控制快速性的两个重要因素。本文从设备通信层面和控制算法层面对风电机组有功控制方法进行分析。

在设备通信层面,风电机组内部的通信主要负责塔基主控制器、机舱控制系统、轮毂控制系统等内部控制系统间的数据交互,实现风电机组运行参数监控、风机发电控制及设备安全保护。为了提高风机内部指令传输的通信速度,有研究将轮毂的变桨控制算法集成到塔基主控制器中,避免了控制器间的通信转发延时<sup>[27]</sup>。该通信优化使得风机内部延时减小的同时,省去一块底板,节约了制造成本。

在控制算法层面,为给系统提供频率支撑,风电机组有功控制要求机组跟踪给定功率指令,而不是单纯依靠 MPPT 控制来追求风能捕获效率的最大化<sup>[28]</sup>。常用的风电机组有功控制基本方法包括超速控制、变桨控制、超速-变桨协调控制,三种控制方法有各自的适用场景及优缺点。超速控制的响应速度要快于变桨控制,但在风速较高时风机转速调节范围有限;对于变桨控制方法,工程实际中风电机组的变桨速率约为 4~6°/s,桨距角调整速率有限,但其调整范围较大。超速变桨协调的机组有功控制方法能够结合超速控制和变桨控制的优点,根据实际风况来选择相应的控制策略,实现在整个控制周期内桨距角动作尽可能小,风能利用率尽可能大,输出功率满足控制要求的目的<sup>[29][30]</sup>。

此外,风电机组中存在大量的机械惯性部件是其不能达到光伏逆变器有功响应速度的根本原因。风机实际运行中,风载荷在风电机组上按照叶片-轮毂-传动链-机舱-塔架的路径进行传递。风电机组的快速有功控制将造成风机传动链上电磁转矩的

快速变化,进而影响机组其他部件的载荷特性。在快速有功控制对机组载荷特性影响的具体研究中,需分别研究对机组极限载荷及疲劳载荷的影响。其中极限载荷描述了风机某部分在不同坐标系各方向上出现的力以及力矩的最大与最小值,疲劳载荷是指产生疲劳损伤的交变载荷。极限载荷直接决定了机组的安全边界,而疲劳载荷与机组的长期寿命息息相关<sup>[31]</sup>。在现有对风电机组载荷的研究中,主要关注机组的轴系、塔架以及叶片根部的疲劳载荷。这些部件的载荷与有功功率变化之间可通过典型的二阶系统表达<sup>[32]</sup>,功率调节的加快会使得风机的疲劳快速累积,影响机组健康寿命。

考虑到风机疲劳载荷与健康寿命的问题,风电-储能系统的研究受到了学者的关注<sup>[33]</sup>。所使用储能技术多为超级电容器、功率型锂电池等功率密度高,响应速度快的储能技术<sup>[34][35]</sup>。目前,含储能系统的控制算法在提升风机控制快速性的同时,通过多种优化算法来优化储能系统容量配置,提升储能系统利用效率<sup>[36]</sup>。然而,储能系统需要额外增加的投资与运维成本等经济性问题仍是限制储能系统发展的主要因素。

### 1.2.2 考虑载荷约束的风电机组紧急降功率技术

与适用于频率响应场景的快速有功控制不同,紧急降功率技术适用于电力系统发生严重故障的场景。紧急降功率控制指令由新能源场站的安全稳定控制装置决策,并在百毫秒内完成执行。在此时间尺度下,直接采用 1.2.1 节分析的调节容量有限的超速法与动作较慢的变桨法无法满足要求。

在风电机组的紧急有功控制中,载荷因素也至关重要。风电机组的紧急降功率控制实际上是紧急降低电磁功率,而电磁功率/转矩的突变会导致机组轴系等机械部件承受较大的冲击载荷,严重时会导致机组保护系统动作或机械部件损伤,危害机组安全运行。当机组电磁功率快速变化时,容易激发传动链轴系超调与振荡,导致冲击载荷过大和疲劳载荷累积<sup>[37]</sup>。在电网故障恢复过程中,有功功率恢复速率越快,机组传动轴及塔架方向载荷越大,有功功率恢复太快可能导致机组载荷超过极限载荷的设计值<sup>[38]</sup>。在极限载荷约束以外,文献[39]通过分析恶劣风况下风机等效疲劳载荷约束边界,从而保证风机不脱网运行,降低对电网的冲击性。

在风电机组的紧急功率控制技术方面,当接收到紧急增功率指令时,通过控制机侧变流器,使得机组转速降低,释放发电机转子动能,实现功率快速增加,这需要风电机组提前进行超速减载;面向

紧急降功率需求时,可考虑快速提升转子动能,实现功率速降<sup>[40]</sup>。考虑到超速法存在调节容量有限的缺点,在转速过高时可以控制投入卸荷电阻,消除盈余能量来抑制转速上升、实现转速保护,同时快速动作桨距角,消除不平衡能量<sup>[41]</sup>。但紧急降功率控制方法对机组机械载荷特性的影响以及卸荷电阻阻值设定原则仍有待研究。

储能参与风电机组紧急功率控制技术方面的研究较少,但储能参与新能源机组电压故障穿越场景下快速吸收不平衡功率的功能与本文紧急降功率场景下储能的技术需求相似<sup>[42]</sup>。因此,储能在电压故障穿越中的控制技术可借鉴应用在紧急降功率控制中。

综合风电机组紧急降功率控制技术及其对机组载荷特性影响的研究现状,需进一步探索考虑载荷约束的深度紧急降功率方法。

## 2 场站快速有功控制现状及分析

### 2.1 光伏电站快速有功控制技术

#### 2.1.1 光伏电站快速有功控制基础

当前光伏电站的有功控制通常由自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统完成,如图3所示,该系统的通讯方式为:AGC经过2~3级交换机接入站内环网交换机,将其转换为IEC104、IEC61850等通信协议后经光纤通信环网接入光伏阵列的子阵控制器,再由子阵控制器经宽带可编程控制器连接各个光伏逆变器。而在光伏逆变器内部,先由通讯接口单元接收外部命令,再通过该单元发送给功率执行单元。光伏电站冗长的通讯架构以及通讯规约、光伏发电单元的内部通讯等,导致当前光伏电站的有功控制响应迟缓。文献[18]设计了一种光伏电站快速功率控制装置,提出面向对象/用户数据报协议GOOSE/UDP的通讯方案,在实际电网的试验应用表明可实现整体控制信息传输时间小于30ms。

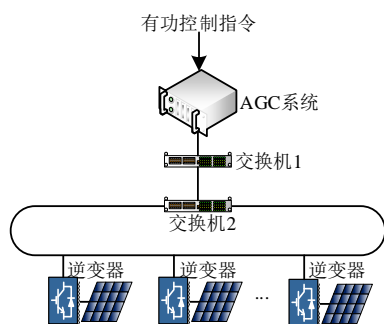


图3 光伏电站 AGC 系统网络结构

Fig. 3 AGC system network structure of PV power station

根据 GB/T 40595-2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》的要求,当系统的频率低于额定频率时,新能源场站的一次调频功率限幅应不小于6%额定功率;当系统的频率高于额定频率时,一次调频功率限幅应不小于10%额定功率。在要求光伏电站具备频率主动支撑能力时,光伏电站需要进行限功率运行控制。文献[43]对西北送端大电网新能源场站快速频率响应能力进行了入网试验,指出当限制功率时,为保证新能源场站有功具备上调能力,应确保所限功率不小于15%额定功率。对于大型光伏电站,环境状况的差异使站内各光伏发电单元的最大出力不尽相同,需要对站内的各发电单元工作点进行优化。在光照和温度发生变化时,可以通过变减载率调节光伏发电单元的工作点,以提高光伏参与电网频率调节的效果<sup>[44]</sup>。值得注意的是,在降功率的情况下,光伏发电单元的输出能力可以满足功率指令;但是在升功率的情况下,各光伏发电单元可发最大功率是未知的。如若功率指令超过可发最大功率,就会导致功率调节失败,需要重新下发有功指令,减缓了有功调节的速度。因此,需要精准评估光伏发电单元的输出能力。

#### 2.1.2 光伏电站快速有功控制方法

光伏电站有功控制的目的是根据有功调度指令,对光伏发电单元的有功输出进行控制。基于1.1节所述的技术,光伏发电单元的主要任务是快速响应并跟踪有功指令值。从光伏电站的层面,快速有功控制的目的是由场站有功控制指令生成各机组有功控制指令,并快速分配至各个光伏发电单元。目前光伏电站多采用平均分配法,其主要出发点在于算法简单,有利于快速控制。但是在工况复杂的大型光伏电站,各个光伏发电单元的出力存在差异,每个逆变器本身的调节特性也不完全相同。平均分配法会导致有功指令值大于某些光伏发电单元的最大出力值,最终无法有效跟踪有功指令。

考虑到各个光伏发电单元的实际输出能力存在差异,文献[45]综合考虑环境以及设备的运行状况,按照实时计算的光伏发电单元可调容量进行分配。在光伏电站中,不同光伏逆变器的有功调节响应特性存在差异。文献[46]以光伏逆变器的响应速度设计有功分配方法,响应速度快的光伏逆变器优先参与有功指令跟踪,以此充分发挥电力电子设备毫秒级快速功率控制的潜力。

#### 2.1.3 光伏电站紧急有功控制策略

紧急有功控制与快速有功控制的差异主要在于:紧急有功控制由稳控系统直接下达有功指令,



其有功调节为下调且调整范围较大。由于光伏发电单元可直接通过逆变器快速大范围调整其有功功率,因此,光伏电站的紧急有功控制策略和快速控制策略类似,需要重点关注的是场站的快速通信能力和大范围有功功率调整的精度。目前,适用于光伏电站紧急有功控制的装置及通信架构已经完成了开发与试点应用,实现了整组动作时间小于60ms<sup>[18],[47]</sup>,为紧急情况下的有功控制打下基础。

## 2.2 风电场快速有功控制技术

### 2.2.1 风电场快速有功控制基础

风电场常见的通信拓扑结构如图4所示<sup>[48]</sup>。在风电场通信网络中,每台风机均部署两台交换机:机舱交换机(nacelle switch, NS)及风塔交换机(tower switch, TS),并与环网交换机(switch, SW)相连。每一环网结构中,都有一台环网中心交换机(center switch, CS)将环网中各台交换机连接到升压站中的控制中心服务网络。交换机间通信网络以光纤作为传输介质,提升交换信息的保真度及快速性。

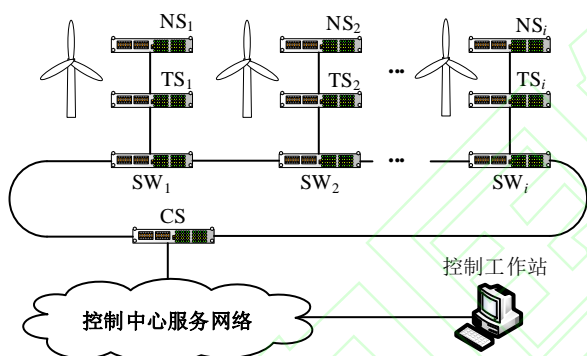


图4 风电场环形通信网络结构<sup>[48]</sup>

Fig. 4 Ring communication network of wind farm

基于 IEC61850 标准,在风电场的通信架构上,与光伏电站未见区分。基于 2.1.1 中对于站内通信的分析,面向对象/用户数据报协议 GOOSE/UDP 的通讯方案已经能够满足对站内通信快速性的要求。因此,按照上述方案对风电场进行通信改造是一种可行的工程实践方案。

此外,风电场内各机组运行状态往往不尽相同,需对场站内各机组的工作点进行优化,提前规划好稳态工况,为其快速有功控制提供基础。风电场有功控制的目标就是协调控制场内各机组以获得所需的整体外特性。由于尾流效应的存在,风电场内各机组的入口风速会有所差异,这导致了每台风机的出力能力不同。目前常用的超速减载与变桨减载方法会改变尾流效应,从而对整站出力能力产生一定影响。因此,在跟踪调度指令的同时需要对场站内各机组的工作点进行整体协调优化,以达到最佳

控制效果。

文献[49]研究了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的有功分配策略,基于预测风速和机组状态每5min进行动态分群,并对不同的机群采用不同分配策略,MPC优化目标为预测出力与有功指令的偏差最小。但上述研究未考虑尾流效应对场内风速分布的影响。在尾流效应影响下,风电场采用相同减载率方案从能量损耗和有功裕度等角度看并非最优策略。为此,文献[50]-[52]对场内风机减载策略进行优化,后排机组减载优先级比前排高,超速法动作优先级比变桨法高。但上述研究过度强调了采用超速法的优势,即将风能转化为动能,却忽略了变桨法对于尾流效应的削弱特性。为了进一步寻找场内机组的最优工作点,文献[53]以获取风能量与存储动能最大对风电场进行多目标优化,但风的传播具有延时,风电场的风机间隔通常为8-10倍风轮半径,前排风机动作在分钟级延时后才作用于后排风机。考虑到此动态过程,基于一段时间域而非某个时间断面对风电场的工作点进行优化可能是一种解决方案<sup>[54],[55]</sup>。

### 2.2.2 风电场快速有功控制方法

当频率事件发生时,风电场的快速有功控制基于场内各机组的稳态工况,由风电场频率控制器产生场站有功指令,并将有功参考值快速下达至每台机组。一般而言,风电场快速有功控制与频率响应是紧密相关的,集中式频率响应根据频率特性产生场站总有功指令,并根据场站快速有功控制算法下达给各机组执行指令。而分布式频率响应往往包含了场站层快速有功控制算法,直接产生各机组的有功指令。风电机组基于1.2节所述技术,主要负责快速响应并跟踪指令。在风电场层面,快速有功控制的主要目标是将调频产生的有功指令快速分配下达至各机组。目前工程上的风电场多采用平均分配法或者按风速权重分配法。但在机组工况各异的风电场中,使用平均分配法会导致某些风机的有功指令大于其自身的最大出力,最终导致无法有效跟踪电网有功调度指令;而按风速权重分配法仅考虑了每台风机的最大出力能力,忽略了机组的实际有功调节与支撑能力。文献[51]考虑尾流效应,通过对风向上下游风机制定不同的有功控制优先级依次动作,每排风机的有功调节能力同样考虑了存储的动能,高效地将功率调节任务下达给各风机。

场站层面的快速有功控制同样需要考虑疲劳载荷的影响。不同于单机层面从机组自身特性出发对疲劳载荷进行抑制<sup>[19]</sup>,在场站层面则重点需要考

虑机组之间的协调控制以优化整个风电场的疲劳载荷。在协调优化之前,需要首先明确疲劳载荷的计量方法,再通过建模进行疲劳载荷灵敏度分析,进而可以设计多目标优化算法,实现整场的多目标协同优化<sup>[56]-[58]</sup>。考虑到疲劳载荷计算表征的复杂性,也可基于人工智能的风机疲劳数据驱动建模方法,利用风速、功率等易测量参数对疲劳载荷进行预测,以参与风电场有功功率的协调优化控制<sup>[59]</sup>。多目标优化一般包括有功控制目标和疲劳载荷目标,有功目标一般是全场有功出力最大<sup>[60]</sup>或跟踪调度有功指令误差最小<sup>[61]</sup>,疲劳载荷目标则是场站机组疲劳载荷最小或将其约束在一定范围内,具体的优化模型和优化方法各不相同。由于风电的强非线性以及疲劳载荷难以实时在线检测,对于载荷本身往往采用离线数据生成-在线匹配执行的方法。总体上,由于目前对风电机组本身载荷控制的关注较少、研究不够深入,风电场快速有功控制过程中考虑载荷的协同优化还有待进一步研究。

### 2.2.3 风电场紧急有功控制策略

在电力系统事故或紧急情况下,国家标准规定调度部门在严重情况下需要切除风电场。目前,在面向场站紧急降功率场景的有功控制方面,工程上普遍采用切场/切机策略,这会导致弃风问题。同时场站/机组的投切对风电机组带来机械部件疲劳损伤也会影响机组的运行寿命。需要研究风电场的紧急有功控制以尽量避免切场/切机的情况出现。

在风电场的紧急有功控制情景下,较为重要的研究点为有功功率动作的时间尺度及整体控制策略的制定。根据 GB/T 40587-2021《电力系统安全稳定控制系统技术规范》规定以及断路器动作时间要求,当前工程上新能源场站紧急切机/切场的时间在 100ms 以内,而在现有研究中紧急有功控制时间尺度大多超过 100ms。文献[62]分析了新能源控制现状并对紧急功率控制技术的必要性及其适用场景进行说明,搭建了新能源紧急控制系统架构,提出了新能源紧急控制系统控制策略,实现了整个控制过程在 300ms 内完成。文献[63]考虑控制器计算延时、通信延时及机组动作时间,将场站的紧急有功控制时间限定在 400ms 内。

目前,对于风电场参与的紧急有功控制也有研究风电、火电等多类型资源的综合策略制定,在安全稳定的基础上,优化经济性和其他指标。当只考虑风电场的紧急控制时,需制定策略为切机或切场,整体时间在 100ms 以内完成。文献[64]首先分析了风电场紧急功率切除的方式,进而提出了基于切场

组合、基于风电场切机、基于切场与场内切机相结合和基于风电场累计有功功率切除量排序的 4 种不同的紧急切功率分配算法;其次以分配偏差量、风电场切场数等 5 个指标的加权组合对上述策略进行了综合评价,说明了上述策略的最佳适用情境。在电力系统事故或紧急情况下,可以考虑对风电场有功功率进行紧急控制来代替切场/切机策略,但囿于风机机组单机目前实现百毫秒级的紧急降功率控制仍极具挑战性,现有文献中对风电场站的“以调代切”策略鲜有研究。

## 3 场站快速频率支撑技术现状及分析

### 3.1 快速频率检测算法

频率检测是频率响应过程中的首个环节,当前的频率检测技术可以分为两大类:基于锁相环(phase-locked loop, PLL)和基于锁频环(frequency-locked loops, FLL)的频率检测技术。

PLL 技术的出现可以追溯到 20 世纪 30 年代,自此其不同的领域得到了广泛的应用,尤其是电力系统常规参数(相位、频率和振幅)的估计<sup>[65]-[67]</sup>。三相同步坐标系锁相环(synchronous rotating frame phase locking loop, SRF-PLL)<sup>[65]</sup>技术是最经典的一种 PLL 技术,同时也是几乎所有类型 PLL 发展的基础并广泛应用于并网逆变器的控制中。

近年来,针对 PLL 的前沿研究主要集中在提高抗扰性上<sup>[66],[67]</sup>,以便其适应目前逐步凸显的电能质量问题,已经能够在一定程度上抵御电网电压干扰并且提供快速的动态响应,但是 SRF-PLL 在电压不平衡或失真情况下性能较差,需增加多重滤波器方能获得较好性能<sup>[68]</sup>。此外,为了提高频率检测结果的可靠性,防止出现误动,PLL 在工程上一般至少采用三个电压周波,即 60ms 来测量频率,成为制约目前新能源场站百毫秒级频率响应的一大因素。FLL 较 PLL 具有惯性环节少和受电压相位跳变影响小的优势,因此基于 FLL 的同步算法受到学者的关注<sup>[69]</sup>。

与 PLL 相比, FLL 通常在静止坐标系中设计,由前置滤波器和频率估计环路组成。前置滤波器负责首先估计频率的基波分量并滤除谐波,并获得频率估计值和电网频率之间的频率误差。最常见的滤波器是二阶广义积分器<sup>[68]</sup>和降阶广义积分器<sup>[69]</sup>。为了进一步提高抑制谐波的能力,可对 FLL 前置滤波器进行改进。目前,对于前置滤波器的前沿研究主要分为并联<sup>[70]</sup>和串联多个滤波器<sup>[71]</sup>两种思路。此外,由于静止坐标系下电量为交流量导致小信号模型



难以建立,有学者提出了基于同步坐标系的锁频环技术<sup>[72]</sup>,并在后续研究中提出了高阶 FLL,实验证明其能在 DSP TMS320F28379D 上实现 20ms 的频率检测<sup>[73]</sup>,但其未在实际光伏/风电场站中得以应用,其工程适用性及大规模推广的可行性仍有待验证。

### 3.2 频率响应模式及其适应性

传统同步发电机的动态频率调整手段大致可以分为两个阶段,第一阶段为惯量响应,第二阶段为一次调频。为缓解新能源渗透率增长所造成的频率稳定性问题,系统要求新能源场站模拟同步机来提供惯量响应与一次调频。

对于风电场的惯量响应、一次调频以及二者的

组合最早由 Lalor 等学者于 2005 年提出<sup>[74]</sup>,其基本思路是,通过增加一个基于频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)或频率偏差和 RoCoF 的组合的附加控制环路,在风电机组检测到并网点频率变化后改变其有功控制参考值,补偿系统中的暂态不平衡功率从而减小频率偏差<sup>[75],[76]</sup>。但由于风电机组的工况具有复杂时变性,而传统惯量响应和一次调频策略增益系数过大会导致风电机组过早退出调频,系数过小又会导致调频效果不理想,学者们也相继提出了不同的频率响应方法。表 2 从理论研究和工程应用的角度对于风电场各类频率支撑模式的优缺点进行了比较。

表 2 风电场频率支撑模式比较

Tab. 2 Comparison of wind farm frequency support strategy methods

支撑模式	优点	缺点
传统惯量响应/一次调频 <sup>[74]</sup>	1. 对电力系统暂态频率特性的改变较小 2. 工程上易实现	1. 参数整定困难 2. 无法合理利用风电场调频能力 3. 频率变化率检测误差大且微分环节存在稳定性问题
变系数惯量响应/一次调频 <sup>[77],[85]</sup>	1. 能够考虑风电场的调频能力与系统的调频需求 2. 工程上较易实现	1. 受传统惯量响应与一次调频模式的约束,无法充分发挥风电场有功调节的灵活性 2. 频率变化率检测误差大且微分环节存在稳定性问题
方波式惯量响应 <sup>[86],[88]</sup>	1. 无需检测频率变化率 2. 工程上较易实现	1. 存在频率二次跌落及转速恢复问题 2. 支撑功率轨迹与支撑时间长短难以确定
基于模型的频率支撑优化策略 <sup>[89],[97]</sup>	1. 能够较好地考虑风电场的调频能力与系统的调频需求 2. 能充分发挥风电场有功调节的灵活性	1. 难以建立准确的数学模型来描述风电场的复杂工况与系统暂态频率响应特性 2. 优化算法大多需要获取有功扰动大小,但实际电网中较难获得 3. 工程上较难实现
数据驱动的频率支撑优化策略 <sup>[98],[100]</sup>	1. 对于风电场出力特性的描述较为准确	1. 训练模型大多基于仿真数据,真实风电场的数据获取难度较大 2. 工程上较难实现

为了克服传统策略固定增益系数的问题,有部分研究提出了变系数惯量响应/一次调频策略,基于系统状态(频率/RoCoF)或基于各风电机组(转速/风速)来调整风电场的惯量响应/一次调频控制参数。但是,与同步机零延时的惯量响应不同,风电机组参与电网调频的本质是快速功率响应,包含测频、通信等环节的延时<sup>[5]</sup>,而考虑延时特性的虚拟惯量控制无法改善最大频率变化率,又存在测频精度需求高且频率微分环节存在放大量测误差等缺陷,惯量响应频率最低点的改善效果可以用调节下垂控制系数的方法替代<sup>[101]</sup>,或采用方波式的惯量响应策略。

为了避免测量频率所带来的负面作用,方波式惯量响应在无需测量 RoCoF 的情况下能够改善风电机组的频率支撑效果<sup>[86]</sup>。对于方波式惯量控制的研究大多集中于如何改善频率二次跌落、设计风电机组的转速恢复轨迹以及如何设置支撑功率和支撑时间的大小等问题上<sup>[88]</sup>。然而,方波式惯量支撑模式对风电机组存储动能的利用是否合理,电网在

频率跌落过程中需要怎样的功率支撑等问题仍有待探索。在新型电力系统中,充分发挥变流器控制灵活的优势,不再要求变流器必须采用类似同步发电机的控制模式,而是根据调频资源的特性采取独特的控制方式,进而提升系统有功调控的效率有可能成为未来有功调控的发展路线<sup>[102]</sup>。

考虑到风电场有功调节具备快速性和灵活性,有学者开始探索风电场最优频率支撑模式<sup>[89]</sup>。一类方法是采用数学模型对风电场和系统频率响应特性进行描述,考虑频率偏差、RoCoF、风电场存储动能、有功裕度等信息,建立优化模型并采用算法进行求解。相比于固定控制模式的支撑策略,基于优化的策略会更加直接地针对系统的调频需求(目标)和风电场自身的调频能力(约束)进行支撑。然而,基于数学模型的频率支撑优化策略大多采用低阶模型来描述系统的暂态频率特性,准确性难以保证。因此,有学者开始关注基于数据驱动的控制策略<sup>[98]</sup>,但基于数据驱动的方法尚未有工程实践,其工程适用性有待验证。

对于光伏电站而言，由于不含机械旋转部件，其控制灵活性更高。若不考虑储能设备，其有功上调能力仅取决于 MPPT 功率，相对比较容易确定。同风电场一样，模拟同步机的惯量响应和一次调频也是最早提出的光伏电站调频控制策略，相应地也发展出一些变系数的惯量响应/一次调频策略[103]-[104]。由于其频率支撑能力主要由光资源决定，且同一个光伏电站内各发电单元的工况差异不大，对光伏电站参与频率支撑模式的研究也相对较少。

### 3.3 新能源场站的快速频率响应技术

目前新能源场站的快速频率响应所采取的技术方案主要分为场站集中式控制和场站分布式控制两种，如图 5 所示。场站集中式控制就是在场站层根据频率事件或频率信号生成有功指令，并协调控制场站内各发电单元进行频率支撑；场站分布式控制即每台机组各自检测频率信号，并在机组层自主地进行频率支撑的决策。工程上，光伏电站一般只采用集中响应的方式，风电场可以同时考虑场站集中式控制和场站分布式控制。

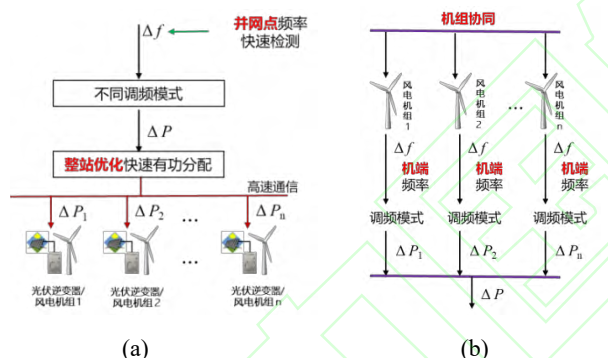


图 5 新能源场站快速频率响应技术路线示意图 (a)场站集中式控制；(b)场站分布式控制

Fig. 5 Technical route of fast frequency response for renewable energy station (a) centralized response; (b) distributed response

#### 3.3.1 风电场快速频率响应技术

场站集中式控制频率响应策略由风电场层设计，机组仅需跟踪有功指令，因此无需进行机组级别的硬件改造。同时，场站集中式控制能够综合站内各机组工况进行全局寻优，其响应策略的制定往往更加周全。但集中式控制需要收集场内各机组实时工况并在场站层做出决策后基于风电场快速有功控制及时下达至各机组执行指令，意味着其响应的快速性依赖场站层与机组层的双向高速通信，并且对场站控制器的计算效率有较高的要求。

场站分布式控制需要将频率附加控制置于风电机组控制器中。当发生频率事件时，由风电机组检测频率信号并自主进行响应，这种方案可以省去

风电场控制器到风电机组控制器的通信时间，提高风电场的频率响应速度。相比于集中式控制，分布式控制对于通信故障的鲁棒性更强[86]。文献[105]使用分布式牛顿法来实现风电场的分布式一次调频控制，但其下垂系数固定，无法根据风电机组工况而改变。在此基础上，文献[106]针对提出了一种分布式同步控制，实现了下垂系数自适应变化，改善了通信延时并提高了对异常数据攻击的鲁棒性。此外，基于分布式模型预测控制的频率响应与有功控制可以把大规模风电有功功率约束优化控制问题分解为多个小规模问题，不仅可以大大降低计算负担，而且提高了整体系统的鲁棒性，是一种可行的频率支撑技术方案[107],[108]。对于频率响应时间尺度，如何对不确定性建模并进行分解协调控制，以及各子系统之间耦合关联的处理、子系统的优化决策及相互间的信息交换机制、全局稳定性的保证及最优性的评估等问题是应用分布式模型预测控制研究的重点与难点[109]。

尽管场站分布式控制能够降低计算负担，减小对高速通信的依赖程度，但风电机组直接检测机组侧低压频率信号往往含有较大噪声扰动，可靠性较低，而检测风电场并网点频率信号又需要增加通信延时，场站分布式控制在实际风电场中的实用性和可行性仍有待进一步验证。此外，场站分布式控制需要对机组的控制器进行升级改造，经济性问题也是阻碍其发展的重要因素。

#### 3.3.2 光伏电站快速频率响应技术

光伏电站主动参与电网频率响应时，按照场站级集中调频控制的思想，主要根据并网点频率确定整站有功输出参考值，然后根据 2.1.2 节所述的技术，进行功率分配。光伏电站可通过在 AGC 系统现有的软件中增加控制模块或加装快速频率响应装置，完成有功-频率下垂特性控制，生成有功调度指令，然后通过功率分配层下发给逆变器集群，使其在并网点具备参与电网频率快速调节能力[110]。为了提高一次调频的稳定性，文献[111]研究给出了光伏电站的调频控制增益稳定范围，并且发现随着光伏并网渗透率的不断提高，调频控制增益的临界值不断减小。由于光伏发电单元不含机械旋转部件，其调频能量来源只能为减载备用或储能系统。相比于风电场参与调频，光伏电站结构更简单、响应速度更快。

## 4 未来技术展望

### 4.1 资源与载荷双重约束下的风电机组快速精准有



## 功控制技术

综合当前光伏/风电新能源场站并网技术的发展现状,光伏并网由于基于全电力电子器件易于实现快速的有功频率响应,光伏发电单元和场站的快速有功控制均已经达到百毫秒内的技术水平<sup>[18]</sup>。但风电由于自身结构存在大量的机械惯性元件,当前机组本身尚未实现百毫秒级的快速有功控制。在风电实现快速有功频率响应的过程中,需要直面风电机组的机械载荷问题。首先,要确保快速有功控制过程中机组的极限载荷不能超过设计值,否则容易导致风机机械部件的损坏引发机组安全问题;其次,风电的快速/紧急有功控制必然带来风电机组较高的疲劳载荷,疲劳载荷的快速累积将直接影响风电机组的使用寿命。

考虑到风电机组的机械载荷是限制其有功控制快速性的主要因素,结合风资源的随机波动特性,未来需要重点关注资源与载荷双重约束下的风电机组快速精准有功控制技术。需科学地描述和检测风电机组机械载荷约束量,并将其融入风电机组运行控制的资源和机组状态约束域,形成机组的实时可控域,并在此基础上研究风电机组有功的快速平滑控制技术,实现风电机组有功控制的快速精准与机械损伤的有机协调。

### 4.2 机-场协同的场站级快速/紧急有功控制技术

在解决风电机组自身快速/紧急有功控制技术达到百毫秒级后,如何通过改善风电场的通信延时、提升有功分配算法的快速性和实用性是实现场站级快速/紧急有功控制的重点与难点。首先,不具备高速通信的风电场无法实现百毫秒级场站级快速有功控制,需要对其通信系统进行改造升级;其次,场站快速有功控制中需要考虑到风电场内各机组的不同运行状态,综合设计多目标优化算法实现风电场内的有功功率分配,如何兼顾算法的多目标优化结果和快速实用性是难点。

针对光伏电站,由于其有功控制的快速性已经可以达到百毫秒级,可重点研究其快速有功控制的精度。针对风电场,紧急有功控制中为避免切机或尽量减少切机数量,首先需要深入研究风电机组的硬件能量泄放技术,研究风电机组在紧急场景下的有功极限控制能力,进而研究考虑硬件能量泄放与变速/变桨协同的风电机组紧急降功率技术;其次,通过考虑资源分布特性和场站内各发电单元的状态约束,进一步研究切实可行的机-场协同的站内控制单元优选和快速有功分配优化策略,探索风电场“以调代切”和“调切并举”策略的工程适用性。

### 4.3 适应资源特性的新能源场站快速频率支撑策略及优化技术

由于光/风资源的随机性与波动性,光伏/风电场站的自身工况变化较快,考虑到光伏/风电场站调频能量的时变性和场站运行工况的复杂性,当前光伏/风电场站参与调频的方式较为单一,尚未有效发挥电力电子器件控制的快速性和灵活性。面对不同渗透率、不同电网架构与运行方式以及不同负荷波动/故障场景,对于诸如综合惯量、分段一次调频和自适应惯量等不同调频控制模式中的参数缺少适应性分析研究,如何选择合适的频率响应模式,并提出适应复杂时变工况的调频参数优化设定方法是当前面临的挑战。

对于场站集中式控制和场站分布式控制两种技术路线,需要研究适用于机端和并网点频率及其变化率的快速检测算法,特别是在机端由于受到的干扰较大,如何形成工程化的检测算法对于体现单机响应模式快速性的优势至关重要。此外,对于不同调频控制模式的适应性尚需深入研究,如虚拟惯量控制存在测频精度需求高且频率微分环节存在放大量测误差等固有缺陷,其对频率最低点的改善效果完全可以用快速的一次调频响应代替。最后,对于场站集中响应和场站分布式控制两种技术方案,需要研究满足场站有功控制范围和响应时间约束的光伏单元/风电机组动态功率备用分配和参数协同调整方法,研究考虑调频能量时变性的光伏/风电场调频控制参数区间确定方法,以实现机-场协同的新能源场站快速频率支撑。

### 4.4 暂态有功/无功协同控制技术

本文主要综述分析了光伏/风电新能源场站的有功频率响应技术,实际暂态过程中新能源场站的有功无功耦合特性复杂。在电网发生故障的暂态过程中,当前光伏/风电机组故障穿越策略多关注于电压维度的控制,较少涉及故障穿越造成的暂态频率问题与故障穿越后的有功恢复问题。同时,当前新能源场站暂态控制往往采用同一套参数,然而故障过程场景复杂,如何打破系统控制器参数单一固化的现状,通过参数优化提升新能源场站暂态支撑控制效果具有挑战性。此外,故障前-中-后不同阶段光伏/风电的有功无功控制存在控制模式的切换,切换过程可能导致新能源场站功率振荡等问题,进一步增加了暂态功率协同优化控制的复杂性和难度。

不同场景下新能源场站故障穿越期间的有功出力能力实时评估和有功无功协同优化控制需要兼顾时效性和控制效果。由于大型光伏/风电场站内



包含众多分散发电单元,且故障暂态过程较短,有功无功协同优化控制在场站层实现的难度较大,采用集中式实时线性优化、集中式离线优化-在线查表和分布式优化等技术方案研究暂态有功无功协同优化控制的理论有效性与工程适用性是未来研究方向之一。此外,受控制模式切换、限幅等非线性环节的影响,未来还需进一步研究新能源场站的功率振荡问题和系统的稳定性机理。

## 5 结束语

未来新能源更高占比电力系统要求新能源场站具备暂态大扰动支撑能力,论文立足我国电网的发展现状,针对电网跟随型控制的光伏/风电场站的快速有功控制与频率支撑技术进行研究综述。通过全面梳理当前光伏/风电机组的快速有功控制、光伏/风电场站的快速有功控制和快速频率响应的技术现状和研究进展,论文的主要结论和观点如下:

1) 当前光伏电站已经能够实现百毫秒内的快速有功频率响应控制,风电场尚未实现百毫秒级的快速有功控制,主要原因在于光伏并网基于全电力电子器件而风机中存在大量机械惯性部件,因此,解决风电机组自身的快速有功控制是实现风电场百毫秒级快速有功控制的基础。

2) 在解决新能源单机执行单元快速有功控制的基础上,为了实现新能源场站对系统频率的快速响应支撑,还需要对频率检测、通信和响应算法等影响响应快速性的关键环节进行提升,在保证快速性提升的同时要保证工程可靠性。

3) 资源与载荷双重约束下的风电机组快速精准有功控制技术、机-场协同的场站级快速/紧急有功控制技术、适应资源特性的新能源场站快速频率支撑策略及优化技术是未来一段时间内新能源发电快速有功频率响应的重要研究方向。

4) 在实际电网暂态过程中,新能源场站的有功频率和无功电压耦合特性复杂,和电网场景、故障类型、机组的运行状态和资源约束均紧密相关,对新能源场站的暂态支撑能力进行动态评估,开展暂态有功/无功的协同控制,是实现新能源场站暂态频率电压主动快速支撑需要研究的课题。

## 参考文献

[1] 程鹏,马静,李庆,等.风电机组电网友好型控制技术要点及展望[J].中国电机工程学报,2020,40(02):456-467.  
Cheng Peng, Ma Jing, Li Qing, et al. A review on grid-friendly control technologies for wind power generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(02): 456-467 (in Chinese).

[2] 石文辉,屈姬贤,罗魁,等.高比例新能源并网与运行发展研究[J].中国工程科学,2022,24(06):52-63.  
Shi Wenhui, Qu Jixian, Luo Kui, et al. Grid-Integration and Operation of High-Proportioned New Energy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(06): 52-63 (in Chinese).

[3] 李明节,陈国平,董存,等.新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J].电网技术,2019,43(11):3979-3986.  
Li Mingjie, Chen Guoping, Dong Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986 (in Chinese).

[4] 汪梦军,郭剑波,马士聪,等.新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J].中国电机工程学报,2023,43(05):1672-1694.  
Wang Mengjun, Guo Jianbo, Ma Shicong, et al. Overview of transient frequency stability analysis and frequency modulation control methods for new energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(05): 1672-1694.

[5] 孙华东,王宝财,李文峰,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.  
Sun Huadong, Wang Baocai, Li Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192 (in Chinese).

[6] 方勇杰.英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J].电力系统自动化,2019,43(24):1-5.  
Fang Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5 (in Chinese).

[7] 孙华东,许涛,郭强,等.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6191.  
Sun Huadong, Xu Tao, Guo Qiang, et al. Analysis on blackout in great britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(21): 6183-6191 (in Chinese).

[8] 张怡,张恒旭,李常刚,等.电力系统频率响应模式及其量化描述[J].中国电机工程学报,2021,41(17):5877-5887.  
Zhang Yi, Zhang Hengxu, Li Changgang, et al. Power system frequency responses pattern and its quantitative analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5877-5887 (in Chinese).

[9] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.  
Wang Weisheng, Lin Weifang, He Guoqing, et al. Inspiration of Texas 2021 blackout accident on China's new energy development[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2021, 41(12): 4033-4043 (in Chinese).

[10] 肖亮,陈亦平,伍阳阳,等.风电场快速调频技术的工程实践及关键参数取值[J/OL].高电压技术,DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20221184.  
Xiao Liang, Chen Yiping, Wu Yangyang, et al. Engineering practice and key parameter values of fast frequency modulation technology in wind farms[J/OL]. High Voltage Engineering, DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221184. (in Chinese).

[11] Loutan C, Gevorgian V. Using renewables to operate a low-carbon grid[R]. California ISO, 2017.

[12] 许诒翊,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(09):3586-3595.  
Xu Qieyi, Liu Wei, Liu Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(09): 3586-3595

- (in Chinese).
- [13] 罗魁, 郭剑波, 王伟胜, 等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(04): 1262-1281.  
Luo Kui, Guo Jianbo, Wang Weisheng, et al. Overview of the impact of additional frequency control of grid following new energy on frequency stability and small signal synchronous stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(04): 1262-1281 (in Chinese).
  - [14] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(06): 61-69.  
Shu Yinbiao, Chen Guoping, He Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(06): 61-69 (in Chinese).
  - [15] 郭剑波. 构建新型电力系统是实现能源转型、达成“双碳”目标的有效途径[N]. 国家电网报, 2021-09-07(005).
  - [16] 董梓童, 苏南. 新能源需主动支撑新型电力系统安全运行[N]. 中国能源报, 2022-08-29(007).
  - [17] 董希建, 罗剑波, 崔晓丹, 等. 安全稳定控制系统全程控制时间及其构成[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(05): 163-168.  
Dong Xijian, Luo Jianbo, Cui Xiaodan, et al. Whole control time and its constitution of security and stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(05): 163-168 (in Chinese).
  - [18] 王淑超, 孙光辉, 俞诚生, 等. 光伏发电系统级快速功率调控技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6254-6263.  
Wang Shuchao, Sun Guanghui, Yu Chengsheng, et al. Photovoltaic power generation system level rapid power control technology and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (21): 6254-6263 (in Chinese).
  - [19] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(05): 1665-1672.  
Qin Shiyao, Dai Linwang, Wang Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering wind turbine power drop and mechanical load optimization[J]. Grid Technology, 2021, 45 (05): 1665-1672 (in Chinese).
  - [20] 张军, 王瑾然, 章叶青. 新能源快速频率响应在新能源场站的应用方案研究及工程实践[J]. 湖北电力, 2021, 45(04): 86-93.  
Zhang Jun, Wang Jinran, Zhang Yeqing. Application scheme research and engineering practice of new energy fast frequency response in renewable energy station[J]. Hu Bei Dian Li, 2021, 45(04): 86-93 (in Chinese).
  - [21] 孙晓强, 高敏, 刘鑫, 等. 风电场参与西北送端大电网频率调节的快速频率响应能力实测与分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(01): 48-54.  
Sun Xiaoqiang, Gao Min, Liu Xin, et al. Measurement and analysis of fast frequency response capability of wind farms participating in frequency regulation of northwest sending-end large power grid[J]. Southeast Power System Technology, 2018, 12(01): 48-54 (in Chinese).
  - [22] Tafti H D, Konstantinou G, Townsend C D, et al. Extended functionalities of photovoltaic systems with flexible power point tracking: recent advances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(09): 9342-9356.
  - [23] Pilakkat D, Kanthalakshmi S. An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions[J]. Solar Energy, 2019, 178: 37-47.
  - [24] Etezadinejad M, Asaei B, Farhangi S, et al. An improved and fast mppt algorithm for pv systems under partially shaded conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(02): 732-742.
  - [25] Batzelis E I, Papathanassiou S A, Pal B C. PV system control to provide active power reserves under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9163-9175.
  - [26] Tafti H D, Wang Q J, Townsend C D, et al. Global flexible power point tracking in photovoltaic systems under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(09): 11332-11341.
  - [27] 庞伟. 兆瓦级风电机组通信系统研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2013.
  - [28] Kumar D, Chatterjee K. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 957-970.
  - [29] Tang X, Yin M, Shen C, et al. Active power control of wind turbine generators via coordinated rotor speed and pitch angle regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(02): 822-832.
  - [30] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 20-25+43.  
Zhang Zhaosui, Sun Yuanzhang, Li Guojie, et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25+43 (in Chinese).
  - [31] 安利强, 孙阳, 王鹏, 等. 考虑随机参数的风电机组台风载荷特征研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(04): 417-423.  
An Liqiang, Sun Yang, Wang Peng, et al. Study on typhoon load characteristics of wind turbines considering random parameters[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(04): 417-423 (in Chinese).
  - [32] 应有, 朱重喜, 杨帆, 等. 大型风电机组塔架主动阻尼控制技术[J]. 太阳能学报, 2015, 36(01): 54-60.  
Ying You, Zhu Chongxi, Yang Fan, et al. Development of active tower damping control on wind turbines[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(01): 54-60 (in Chinese).
  - [33] Yan W, Wang X, Gao W, et al. Electro-mechanical modeling of wind turbine and energy storage systems with enhanced inertial response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 820-830.
  - [34] 颜湘武, 崔森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 111-120.  
Yan Xiangwu, Cui Sen, Song Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 111-120 (in Chinese).
  - [35] 叶林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-464.  
Ye Lin, Wang Kaifeng, Lai Yening, et al. Overview of power system frequency characteristic analysis and battery energy storage frequency modulation control strategy under low inertia[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464 (in Chinese).
  - [36] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(01): 13-25.  
Li Xiangjun, Ma Huimeng, Jiang Qian. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side[J]. Electric Power, 2022, 55(01): 13-25 (in Chinese).
  - [37] Zhang X, He W, Hu J. Impact of Inertia Control of DFIG-based WT on torsional vibration in drivetrain[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(04): 2525-2534.
  - [38] 应有, 孙勇, 杨靖, 等. 大型双馈风电机组电网故障穿越过程载荷特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 131-138.  
Ying You, Sun Yong, Yang Jing, et al. Load characteristic analysis of grid fault ride-through process for DFIG based large wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 131-138 (in Chinese).

- [39] 林湘宁, 丁苏阳, 王子璇, 等. 恶劣工况下的风机最大容许出力模型及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(01): 309-317+397.  
Lin Xiangning, Ding Suyang, Wang Zixuan, et al. The maximum output model of wind turbine and its control strategy under severe wind conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(01): 309-317+397 (in Chinese).
- [40] Ouyang J, Zhang Z, Tang T, et al. Fault overload control method for high-proportion wind power transmission systems based on emergency acceleration of doubly-fed induction generator[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32874-32883.
- [41] 邓兆顺, 朱介北, 俞露杰, 等. 实现转子转速保护的双馈异步发电机有功输出速降新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 113-122.  
Deng Zhaoshun, Zhu Jiebei, Yu Lujie, et al. A novel fast active power output reduction scheme of a DFIG for rotor speed security[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 113-122 (in Chinese).
- [42] 鲍建, 杨沛豪, 何昭辉, 等. 新能源混合储能提高高电压穿越能力研究[J]. 热力发电, 2021, 50(08): 79-86.  
Bao Jian, Yang Peihao, He Zhaohui, et al. Research on improving high voltage ride through capability of new energy hybrid energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(08): 79-86 (in Chinese).
- [43] 马晓伟, 徐海超, 刘鑫, 等. 适用于西北送端大电网新能源场站快速频率响应功能的入网试验方法[J]. 电网技术, 2020, 44(04): 1384-1391.  
Ma Xiaowei, Xu Haichao, Liu Xin, et al. A test method for fast frequency response function of renewable energy stations in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(04): 1384-1391 (in Chinese).
- [44] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(05): 1013-1024.  
Zhong Cheng, Zhou Shunkang, Yan Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control[J]. Journal of Electrotechnics, 2019, 34(05): 1013-1024 (in Chinese).
- [45] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(04): 118-122.  
Wang Yixiao, Cui Liyan, Lei Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(04): 118-122 (in Chinese).
- [46] 马立凡, 李永丽, 常晓勇, 等. 光伏电站多逆变器有功功率协调分配策略[J]. 电源技术, 2018, 42(09): 1379-1382.  
Ma Lifan, Li Yongli, Chang Xiaoyong, et al. An active power allocation strategy for photovoltaic power station with multi-inverter[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(09): 1379-1382 (in Chinese).
- [47] 白申义, 余高旺, 杨桂兴, 等. 新能源场站并网点快速功率控制装置研制[J]. 电器与能效管理技术, 2021(08): 76-81+87.  
Bai Shenyi, Yu Gaowang, Yang Guixing, et al. Development of fast power control device for grid connection point of new energy station[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(08): 76-81+87 (in Chinese).
- [48] 高会生, 于文思, 韩东升. 基于时间敏感网络的风电场通信网时延特性分析[J]. 现代电力, 2021, 38(04): 465-472.  
Gao Huisheng, Yu Wensi, Han Dongsheng. Analysis of latency characteristics of wind farm communication network based on time-sensitive networking[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(04): 465-472 (in Chinese).
- [49] Ye L, Zhang C, Tang Y, et al. Hierarchical model predictive control strategy based on dynamic active power dispatch for wind power cluster integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(06): 4617-4629.
- [50] 高丙团, 胡正阳, 张磊, 等. 考虑尾流效应的风电场减载出力优化控制[J]. 可再生能源, 2018, 36(01): 117-125.  
Gao Bingtuan, Hu Zhengyang, Zhang Lei, et al. De-loading optimal control of wind farm based on wake effect[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(01): 117-125 (in Chinese).
- [51] Lyu X, Jia Y, Xu Z. A novel control strategy for wind farm active power regulation considering wake interaction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(02): 618-628.
- [52] Li Y, Xu Z, Zhang J, et al. Variable utilization-level scheme for load-sharing control of wind farm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 33(02): 856-868.
- [53] Ma S, Geng H, Yang G, et al. Clustering-based coordinated control of large-scale wind farm for power system frequency support[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(04): 1555-1564.
- [54] Hu Z, Gao B, Mao Y. Nonlinear model predictive control-based active power dispatch strategy for wind power plant considering dynamic wake effect[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 108996.
- [55] 魏赏赏, 许昌, 阎洁, 等. 考虑延迟的风电场模型预测尾流优化控制[J/OL]. 中国电机工程学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2107.TM.20230224.1514.003.html>.  
Wei Shangshang, Xu Chang, Yan Jie, et al. wake control of wind farm based on model predictive control considering propagation delay[J/OL]. Proceedings of the CSEE, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2107.TM.20230224.1514.003.html> (in Chinese).
- [56] Zhang B, Soltani M, Hu W, et al. Optimized power dispatch in wind farms for power maximizing considering fatigue loads[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(02): 862-871.
- [57] Yao Q, Hu Y, Zhao T, et al. Fatigue load suppression during active power control process in wind farm using dynamic-local-reference DMPC[J]. Renewable Energy, 2022, 183: 423-434.
- [58] Zhao H, Wu Q, Huang S, et al. Fatigue load sensitivity-based optimal active power dispatch for wind farms[J]. IEEE Transactions on sustainable energy, 2017, 8(03): 1247-1259.
- [59] Yao Q, Ma B, Zhao T, et al. Optimized active power dispatching of wind farms considering data-driven fatigue load suppression[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(01): 371-380.
- [60] Zheng S, Song D, Su M, et al. Comprehensive optimization for fatigue loads of wind turbines in complex-terrain wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(02): 909-919.
- [61] Lyu X, Liu T. Intelligent learning based active power regulation of wind turbines considering fatigue reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(01): 405-414.
- [62] 柯贤波, 郝朝辉, 霍超, 等. 西北电网风电与光伏紧急功率控制系统设计[J]. 电力工程技术, 2021, 20(02): 39-45.  
Ke Xianbo, Xi Chaohui, Huo Chao, et al. Design of a wind power and photovoltaic emergency power control system for Northwest China Grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(02): 39-45 (in Chinese).
- [63] Qie Z, Shi Q, Zhang Z, et al. Emergency power control technology for wind power and photovoltaic power to improve new energy consumption capacity[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019, 2832-2837.
- [64] 邢正军, 林俐, 张东英. 风电集群紧急功率控制方法研究[J]. 现代电力, 2014, 31(04): 7-13.  
Xing Zhengjun, Lin Li, Zhang Dongying. Research on emergency power control for wind farms [J]. Modern Electric Power, 2014, 31(04): 7-13 (in Chinese).



- [65] Chung S. A phase tracking system for three-phase utility interface inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(03): 431-438.
- [66] Golestan S, Guerrero J M, Vasquez J C. Three-phase PLLs: A review of recent advances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(03): 1894-1907.
- [67] Wang J Y, Liang J, Gao F, et al. A method to improve the dynamic performance of moving average filter-based PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5978-5990.
- [68] 窦晓波, 焦阳, 全相军, 等. 基于线性卡尔曼滤波器的三相锁频环设计[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(03): 832-844+962.  
Dou Xiaobo, Jiao Yang, Quan Xiangjun, et al. The design of three phase frequency locked loop based on linear kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(03): 832-844+962 (in Chinese).
- [69] 吕世轩, 宋建成, 王子鹏, 等. 一种穿越频率自适应的四阶广义积分锁频环[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4142-4151.  
Lü Shixuan, Song Jiancheng, Wang Zipeng, et al. Fourth-order generalized integrator frequency-locked loop with crossover frequency adaptation[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4142-4151 (in Chinese).
- [70] Golestan S, Guerrero J, Vasquez J, et al. Standard SOGI-FLL and its close variants: Precise LTP modeling and determining stability region/robustness metrics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(01): 409-422.
- [71] Xin Z, Wang X, Qin Z, et al. An improved second-order generalized integrator based quadrature signal generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8068-8073.
- [72] 全相军, 黄仁志, 吴在军, 等. 锁频环的同步坐标系设计与小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4559-4568+4735.  
Quan Xiangjun, Huang Renzhi, Wu Zaijun, et al. Synchronous reference frame design and small-signal model of frequency-locked loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4559-4568+4735 (in Chinese).
- [73] Quan X, Hu Q, Dou X, et al. High-order frequency-locked loop: General modeling and design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12626-12635.
- [74] Lalor G, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(04): 1905-1913.
- [75] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(05): 27-33.  
Chen Yuhang, Wang Gang, Shi Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(05): 27-33 (in Chinese).
- [76] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-70.  
Li Shaolin, Wang Weisheng, Zhang Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70 (in Chinese).
- [77] 林俐, 李晓钰, 王世谦, 等. 基于分段控制的双馈风电机组有功频率控制[J]. 中国电力, 2012, 45(02): 49-53.  
Lin Li, Li Xiaoyu, Wang Shiqian, et al. An active power-frequency control strategy of a DFIG based on subsection control[J]. Electric Power, 2012, 45(02): 49-53 (in Chinese).
- [78] 单煜, 汪震, 周昌平, 等. 基于分段频率变化率的风电机组一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 19-26.  
Shan Yu, Wang Zhen, Zhou Changping, et al. Control strategy of primary frequency regulation for wind turbine based on segmented rate of change of frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 19-26 (in Chinese).
- [79] Lee J, Jang G, Muljadi E, et al. Stable short-term frequency support using adaptive gains for a DFIG-based wind power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(03): 1068-1079.
- [80] Wu Y K, Yang W H, Hu Y L, et al. Frequency regulation at a wind farm using time-varying inertia and droop controls[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 55(01): 213-224.
- [81] Lyu X, Jia Y, Dong Z. Adaptive frequency responsive control for wind farm considering wake interaction[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(05): 1066-1075.
- [82] 柯贤波, 张文朝, 李朋旺, 等. 高风电渗透率系统的模糊自适应虚拟惯量控制[J]. 电网技术, 2020, 44(06): 2127-2136.  
Ke Xianbo, Zhang Wenchao, Li Pengwang, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control for high wind power penetration system[J]. Power System Technology, 2020, 44 (06): 2127-2136 (in Chinese).
- [83] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J]. 电网技术, 2021, 45(05): 1658-1665.  
Li Shaolin, Wang Weisheng, Zhang Xing, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control strategy of wind turbines based on system frequency response interval division[J]. Power System Technology, 2021, 45(05): 1658-1665 (in Chinese).
- [84] Kang M, Muljadi E, Hur K, et al. Stable adaptive inertial control of a doubly-fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2971-2979.
- [85] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(03): 807-815.  
Qiao Ying, Guo Xiaoxi, Lu Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. Grid Technology, 2020, 44 (03): 807-815 (in Chinese).
- [86] Bao W, Ding L, Liu Z, et al. Analytically derived fixed termination time for stepwise inertial control of wind turbines-Part I: Analytical derivation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 1-10.
- [87] Kheshti M, Ding L, Bao W, et al. Toward intelligent inertial frequency participation of wind farms for the grid frequency control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 6772-6786.
- [88] Kheshti M, Lin S, Zhao X, et al. Gaussian distribution-based inertial control of wind turbine generators for fast frequency response in low inertia systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(03): 1641-1653.
- [89] 孙铭, 徐飞, 陈磊, 等. 利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(02): 506-514.  
Sun Ming, Xu Fei, Chen Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(02): 506-514 (in Chinese).
- [90] Hu Z, Gao B, Sun R. An active primary frequency regulation strategy for grid integrated wind farms based on model predictive control[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 32: 100955.
- [91] Zhao C, Sun D, Zhang X, et al. A two-stage power distribution scheme of multiple wind farms participating in primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems. Doi: 10.1109/TPWRS.2022.3224971.
- [92] Wang Y, Qi D, Zhang J, et al. An optimal over-frequency droop control for DFIG-based wind farm under unreliable communication[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems. Doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.04360.
- [93] Liu H, Li M, Liu L, et al. Frequency trajectory planning based transient frequency regulation strategy for wind turbine systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power

- Electronics, 2021, 10(04): 3987-4000.
- [94] Sun M, Sun Y, Chen L, et al. A novel temporary frequency support control strategy of wind turbine generator considering coordination with synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(02): 1011-1020.
- [95] Sun M, Min Y, Xiong X J, et al. Practical realization of optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(03): 617-626.
- [96] 李阳, 李群, 陈载宇, 等. 面向电网最大频率偏差的风电机组短时频率支撑最优策略与机理[J/OL]. 中国电机工程学报. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222354.
- Li Yang, Li Qun, Chen Zaiyu, et al. Maximum-frequency-deviation-oriented optimal short-term frequency support strategy of wind turbines and the mechanism[J/OL]. Proceedings of the CSEE. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222354(in Chinese).
- [97] 聂永辉, 刘家瑾, 孙斌, 等. 基于转子动能释放的风电并网系统非线性频率控制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221027.1139.009.html>.
- Nie Yonghui, Liu Jiatong, Sun Bing, et al. Research on nonlinear frequency control strategy of wind power grid connected system based on rotor kinetic energy release[J/OL]. Proceedings of the CSEE. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221027.1139.009.html> (in Chinese).
- [98] Park J, Law K H. Bayesian ascent: A data-driven optimization scheme for real-time control with application to wind farm power maximization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(05): 1655-1668.
- [99] Liang Y, Zhao X, Sun L. A multiagent reinforcement learning approach for wind farm frequency control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(02): 1725-1734.
- [100] Guo Z, Wu W. Data-driven model predictive control method for wind farms to provide frequency support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(02): 1304-1313.
- [101] 张峰, 田宇, 丁磊. 风电虚拟惯量延时的影响机理模型解析及替代性研究[J/OL]. 电力系统自动化, DOI: 10.7500/AEPS20220613002.
- Zhang Feng, Tian Yu, Ding Lei. Analytical solution for influential mechanism model of virtual inertia delay of wind power and its substitutability research[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, DOI: 10.7500/AEPS20220613002 (in Chinese).
- [102] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(01): 1-25.
- Zhang Ziyang, Zhang Ning, Du Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(01): 1-25 (in Chinese).
- [103] 严干贵, 张善峰, 贾祺, 等. 光伏发电主动参与电网频率调节的机理分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(08): 191-199.
- Yan Gangui, Zhang Shanfeng, Jia Qi, et al. Mechanism analysis of PV generation actively participating in power grid frequency regulation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(08): 191-199 (in Chinese).
- [104] Fyali J B, Olimpo A L. Frequency support from photovoltaic powerplants using offline maximum power pointtracking and variable droop control[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(13): 2278-2286.
- [105] Wang Z, Wu W. Coordinated control method for DFIG-based wind farm to provide primary frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(03): 2644-2659.
- [106] Mahish P, Pradhan A K. Distributed synchronized control in grid integrated wind farms to improve primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(01): 362-373.
- [107] 孙铂皓, 汤涌, 叶林, 等. 基于随机分层分布式模型预测控制的风电集群频率控制规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5903-5914+6171.
- Sun Bohao, Tang Yong, Ye Lin, et al. A programming method for wind power cluster frequency control based on S-H-DMPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5903-5914+6171 (in Chinese).
- [108] Zhao H, Wu Q, Guo Q, et al. Distributed model predictive control of a wind farm for optimal active power control part II: Implementation with clustering-based piece-wise affine wind turbine model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(03): 840-849.
- [109] 叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6181-6198.
- Ye Lin, Lu Peng, Zhao Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6181-6188 (in Chinese).
- [110] 华光辉, 胡汝伟, 焦龙, 等. 光伏电站快速频率响应技术研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(05): 64-76.
- Hua Guanghui, Hu Ruwei, Jiao Long, et al. Research and application of fast frequency response technology for photovoltaic stations[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35 (05): 64-76 (in Chinese).
- [111] 赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019, 43(02): 425-433.
- Zhao Dawei, Ma Jin, Qian Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(02): 425-433 (in Chinese).

收稿日期: 2023-02-02.

作者简介:



高丙团

高丙团 (1981), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电并网控制、机器人与智能电力运维、分布式供能与需求响应, [gaobingtuan@seu.edu.cn](mailto:gaobingtuan@seu.edu.cn);

胡正阳(1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源发电并网控制, [zhengyanghu@foxmail.com](mailto:zhengyanghu@foxmail.com);

王伟胜(1968), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统稳定分析和控制。

(责任编辑 马晓华)

## Review on Fast Active Power Control and Frequency Support Technologies of Renewable Energy Stations

GAO Bingtuan<sup>1\*</sup>, HU Zhengyang<sup>1</sup>, WANG Weisheng<sup>2</sup>, ZHU Lingzhi<sup>2</sup>, WANG Manliang<sup>1</sup>, QUAN Xiangjun<sup>1</sup>,  
LI Shaolin<sup>2</sup>

(1. Southeast University; 2. China Electric Power Research Institute)

**KEY WORDS:** renewable energy station; wind farm; photovoltaic power station; active power control; frequency response; frequency measurement

Large-scale access of renewable energy sources represented by photovoltaic (PV) and wind power decreases the inertia level and frequency support capability of the power system, which leads to the frequency stability becoming one of the key issues of the security and stability and the efficient consumption of renewable energy sources of current power system.

According to the main line of “fast active power control of unit - fast active power control of energy station - fast frequency support of energy station”, this paper reviews the development status of fast active power control and frequency support of PV / wind power stations and points out the key issues and challenges faced by renewable energy stations in fast frequency response. Finally, the future technology prospects are provided and discussed. The following conclusions are obtained:

1) PV power station has achieved fast active power control within 100 milliseconds, while wind farm has not yet. The main reason is that there are many mechanical components in a wind turbine. Therefore, fast active power control of wind turbine is the basis of hundred-millisecond-level active power control of wind farm.

2) On the basis of fast active power control of renewable energy generation units, it is also necessary for fast frequency support of renewable energy stations to improve the performance of frequency measurement, communication time delay and control response mode and ensure the rapidity and engineering reliability.

3) Fast and accurate active power control of wind turbines under dual constraints of resources and load, fast and emergency active power control of renewable energy stations based on unit-station coordination and fast frequency support and optimization of renewable energy stations adapted to resource characteristics are the key focuses of fast frequency response of renewable energy stations in the future.

4) In the transient process of the power system, the coupling characteristics of active-reactive power are complex. Dynamic evaluation of the transient support capability of renewable energy stations and coordination control of transient active-reactive power are other topics that need to be researched to achieve active and fast support of transient frequency and voltage of renewable energy stations.

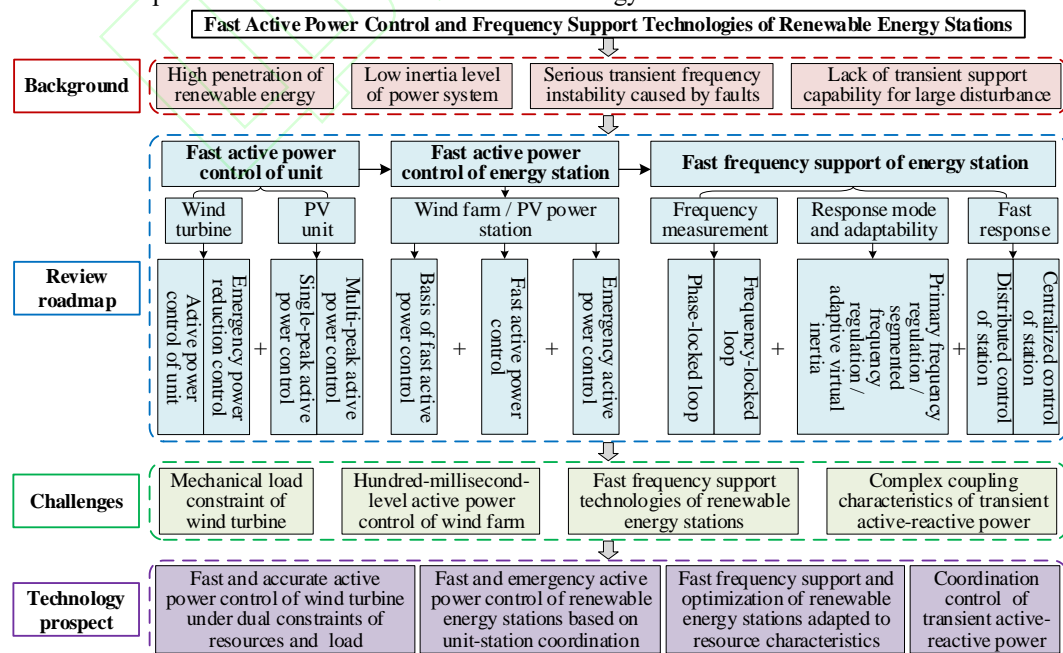


Fig. 1 Review framework of fast active power control and frequency support technologies for renewable energy stations