



## 基于物理约束的风电场主动支撑策略研究

常东旭 吴宁 刘辛裔 李红刚 卢晓光

### A Physical Constraint Based Active Support Strategy for Wind Farm

CHANG Dongxu, WU Ning, LIU Xinyi, LI Honggang, LU Xiaoguang

引用本文:

常东旭, 吴宁, 刘辛裔, 等. 基于物理约束的风电场主动支撑策略研究[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 554–560. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0354

CHANG Dongxu, WU Ning, LIU Xinyi, et al. A Physical Constraint Based Active Support Strategy for Wind Farm[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(5): 554–560. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0354

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0354>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 含新能源接入的配电网中储能系统协调控制策略

Coordinated Control Strategy of Energy Storage Systems in Distribution Network with the Integration of New Energy  
现代电力. 2018, 35(1): 19–25 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I1/19>

#### 考虑受端电压水平的异步互联紧急控制协调策略研究

Research on Coordinated Strategy for Emergency Control of Asynchronous Interconnected Power Grid Considering Receiving End Voltage Profile  
现代电力. 2018, 35(3): 9–15 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I3/9>

#### 带混合储能的光伏并网系统功率协调控制策略研究

Research on Power Coordination Control Strategy of Photovoltaic Grid-connected System with Hybrid Energy Storage  
现代电力. 2019, 36(1): 37–44 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/37>

#### 考虑负载变化率的混合储能分频控制优化策略

An Optimal Frequency Division Control for Hybrid Energy Storage Considering the Change Rate of the Load  
现代电力. 2018, 35(4): 80–86 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I4/80>

#### 含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略

Multi-time Scale Coordination Control Strategy of Isolated Microgrid With Hybrid Energy Storage  
现代电力. 2020, 37(1): 74–82 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2018.1410>

#### 基于直流电压信号的光储系统协调控制策略

Coordination Control Strategy of Photovoltaic Energy Storage System Based on DC Voltage Signal  
现代电力. 2020, 37(3): 285–293 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0549>

# 基于物理约束的风电场主动支撑策略研究

常东旭<sup>1</sup>, 吴宁<sup>1</sup>, 刘辛裔<sup>1</sup>, 李红刚<sup>2</sup>, 卢晓光<sup>3</sup>

(1. 国网河南省电力公司直流运检分公司, 河南省郑州市 450000; 2. 河南守真电子科技有限公司, 河南省许昌市 461000; 3. 许昌许继风电科技有限公司, 河南省许昌市 461000)

## A Physical Constraint Based Active Support Strategy for Wind Farm

CHANG Dongxu<sup>1</sup>, WU Ning<sup>1</sup>, LIU Xinyi<sup>1</sup>, LI Honggang<sup>2</sup>, LU Xiaoguang<sup>3</sup>

(1. State Grid Henan DC Operation & Maintenance Company, Zhengzhou 450000, Henan Province, China;  
2. Henan Shouzhen Electronic Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan Province, China;  
3. XJ-Wind Power Technology Company, Xuchang 461000, Henan Province, China)

**摘要:** 为解决风电大规模接入电网可能导致电网惯性降低以及风机单机参与电网调频导致电网频率二次跌落的问题, 提出了场站式风场调频控制模式。首先, 在策略设计过程中, 提出了不进行风机侧储能的设计原则, 避免电网调频造成弃风, 设计了场站控制高速通信硬件平台, 推导了风机调频物理约束边界条件, 建立了场站调频控制目标函数; 其次, 制定了基于约束条件的风机场站调频功率恢复策略, 完成了不弃风条件下场站调频控制器的开发。实验数据及指标分析结果显示, 场站控制器主动支撑电网的指标满足要求, 风电场提供有功功率明显降低电网频率二次跌落风险。

**关键词:** 电网; 风电机组; 耦合控制; 协调控制; 物理约束

**Abstract:** To cope with power grid inertia reduction due to large-scale grid-connection of wind farms and grid frequency secondary drop caused by single wind generator participating power grid frequency regulation, a station-level wind farm frequency regulation mode was proposed. Firstly, in the strategy design process a design principle not storing energy at wind turbine side was put forward to avoid the wind curtailment due to power grid frequency regulation. Secondly, a high-speed communication hardware platform for station-level control was designed and the boundary condition of physical constraint for frequency regulation of wind turbine generator was derived, meanwhile the objective function of station-level frequency control was established. Thirdly, a frequency modulation power

restoration strategy based on constraint conditions for wind farm was formulated and the development of station-level frequency modulation controller under the condition of without wind curtailment was accomplished. Both experimental data and indicator analysis results show that the indices of power grid actively supported by the proposed station-level controller satisfy the requirements, and the risk of grid frequency secondary drop was obviously reduced by the active power provided by wind farm.

**Keywords:** power grid; wind turbine generating set; coupling control; coordinated control; physical constraints

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0354

## 0 引言

新能源发电技术逐渐成熟, 在电网中占比增加迅速, 以风力发电为代表的新能源发电渗透率不断提高<sup>[1-5]</sup>。在西北电网等风电占比较大的区域, 随风电并网容量的占比扩大, 电力系统惯量下降, 电网调频能力降低, 电网频率稳定性降低。

使风电本身具有调频能力是解决此问题的有效方法<sup>[6-7]</sup>。风电机组采用电力电子设备并网, 不具备常规机组的惯性调频、一次调频等主动支撑电网的能力, 其高比例接入后会造成电网调节能力下降, 运行风险增大, 但研究风电设备本身特性后发现, 风电机组本身具有巨大的转动惯性能, 存储在旋转风轮中。通过控制手段合理利用这部分能量, 可使风电机组具有对电网主动支撑的能力。

风电机组主动支撑电网的调频技术经过近几年的发展, 技术路线已经明了<sup>[8-13]</sup>。基于风机自身发电能力精确预留备用容量的技术路线需要保

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFB0904000); 国家电网公司科技项目(52153218000H)

National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904000); State Grid Corporation of China Research Program(52153218000H)

留风机 10% 的备用容量，因弃风率过高、经济损失过大而被舍弃。基于风轮自身惯量的单机风电主动支撑因风机退出时间同步，且主动支撑退出后风机需要吸收风能补充风轮惯性能，导致电网有功功率缺陷波动，有引起二次跌落风险。故此风电参与电网有功主动支撑策略层开发最好以一个风场为单位，有一个中央控制器协调整个风场风机进行合理有功支撑。

本文尝试开发既能够进行有效电网频率支撑，又在场站层面上能协调风机退出次序，保证所有风机退出过程不引发二次有功功率缺口的整场调频控制技术。在设计控制策略的过程中以不影响正常发电时的风机风能利用系数为前提，即风电不储能频率支撑技术。这就绕不开对风机本身特性的了解，故此研究调频能量分配过程风机本身的物理约束条件成为算法制定的研究重心。

### 1 场站调频设计框架构建

场站调频控制硬件设备由电网频率检测设备、主控制器、高速环网和各风机端数据交换设备组成，主控制器为硬件系统核心设备，本文所述算法全部在主控制器上实现。

#### 1.1 场站调频硬件系统开发

调频指令下发的时效性是场站调频控制器能否胜任调频的最大需求，这是由电网调频的时效指标所决定的，一般惯性调频的响应需求在 500 ms 以内，一次调频也在 10 s 以内。故此硬件设备要求高速的数据传输能力和强大的数据处理能力。

为实现风电场的整场调频控制，需要高速传输网络连接场内风机，基于 Powerlink 环网的场站控制系统可胜任此要求，其实现数据的快速传输，数据通信周期可达到  $\mu\text{s}$  级，能胜任机组之间数据分享和机组的协调控制。

硬件组成上，场站控制器选用 APC910 控制器，集成 3 个 Powerlink 卡，最多可组成 3 个环网，每个环网上可以链接 30 台风机数据交换模块，实现风机 PLC 和场站控制间通过 Powerlink 总线间的数据交换。最终把整个风电场的 PLC 通过环网的形式连接到场站控制器上，场站控制器作为主站，各 PLC 作为从站，进行主从站的通信和数据交互。其系统连接图如图 1 所示，每个环网的拓扑结构如图 2 所示。

主站平台的软件运行环境上，在 APC910 控制器上安装 Linux 操作系统和 Hypervisor 工控系统，得到可运行应用程序的平台；以此平台作

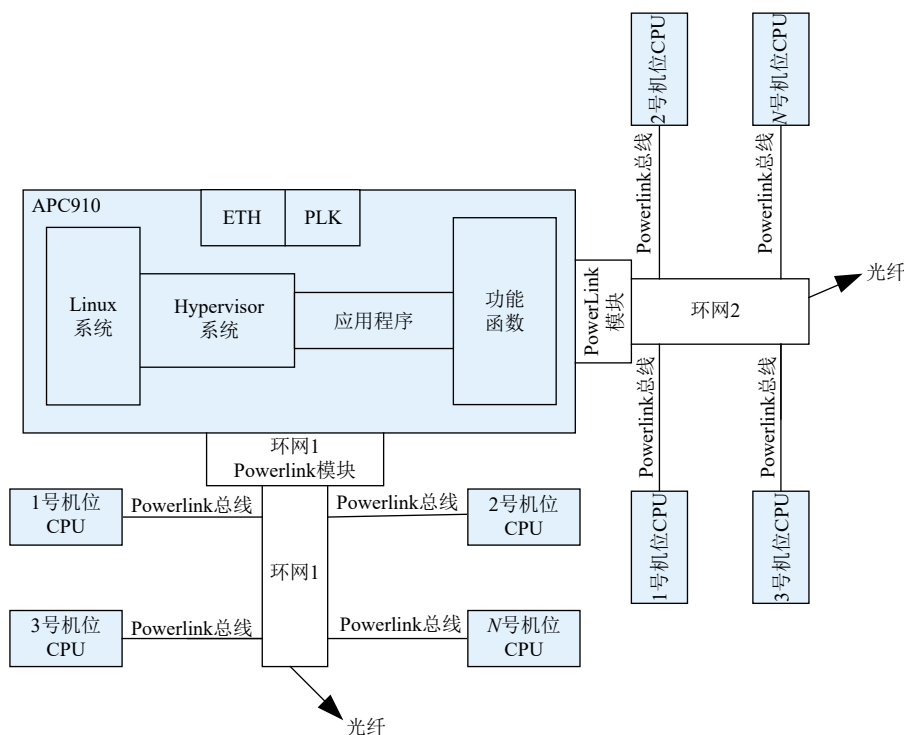


图 1 硬件系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of the structure of hardware system

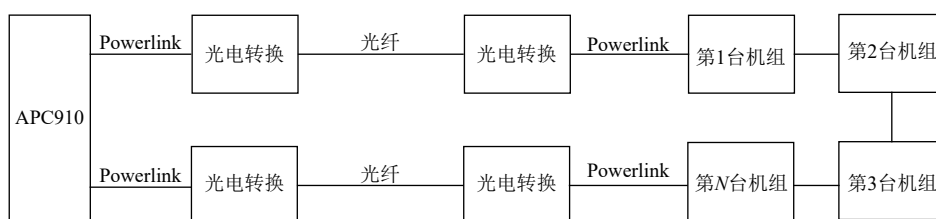


图2 单个环网的拓扑结构

Fig. 2 Topology of single ring network

为算法实现载体进行场站调频系统功能开发。系统的主要参数如下。

通信周期：按照1个主站，25个从站，交互数据各200字节配置测得，最小通信周期为5ms；主频：2.8GHz；内存：16384MB；硬盘：256GB；支持环网数量：最多可支持3组环网，每个环网具有25台机组。

### 1.2 电网频率与风机出力的耦合控制实现

电网频率与风机出力是解耦的，为实现同步机外特性，需在场站控制器端建立电网频率与风机出力之间的耦合关系，并利用风机控制器转矩指令干预的方式建立二者之间的耦合。有功支撑与电网频率之间的耦合函数关系如式(1)所示：

$$\Delta P = k_d \frac{df}{dt} + k_p \Delta f \quad (1)$$

转矩强制增加值应为

$$\Delta T = \Delta P / \omega \quad (2)$$

式中： $\Delta P$ 为相对于进入支撑时刻有功功率增加值； $\Delta T$ 为支撑功率转矩需求变化值； $k_d$ 为电网频率波动微分补偿系数，为电网惯性支撑权重系数； $k_p$ 为电网频率波动补偿系数，为电网一次调频支撑权重系数； $f$ 为电网频率采集值。

为发挥电力电子设备的主动支撑优势，在电网频率支撑策略设计中不需要严格模拟同步机外特性，可以根据电网对有功功率需求，制定优于同步机外特性的有功支撑方案。场站集中控制器对单台风机主动支撑控制框图可由图3表示。

场站控制器通过采集电站端电网频率后，由电网有功调节需求模块计算出每台参与调频的风机的有功支撑变化量，计算逻辑见图1。其中限幅逻辑考虑风机支撑特征，选择不超过单机额定容量10%作为风机支撑的极限功率，即有功支撑的限制值。控制器需要通过高速环网交互各风机的状态参数，风机侧传入变量为：风机电机转速 $\omega$ ；电机功率 $P$ ，电机转矩 $T$ ；风机侧接收控制指

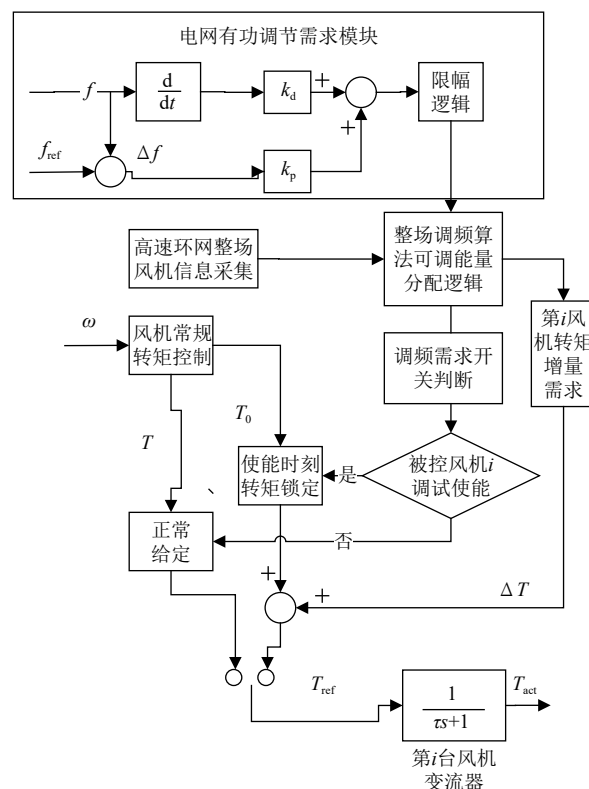


图3 控制系统结构图

Fig. 3 Structure of control system

令为：调频支撑开启指令，开启后转矩指令 $T_{ref}$ 。当电网频率在调频开启死区范围内时，风机变流器按正常运行转矩指令执行，正常运行转矩指令为风机侧PLC独立控制，当场站控制器判定第 $i$ 台风机调频使能后，则此风机变流器转矩控制指令被场站控制器接管，执行场站控制指令 $T_{ref}$ ，此时 $T_{ref}$ 为调频需求增量转矩 $\Delta T$ 和第 $i$ 台风机调频使能时指令保持值 $T_0$ 之和。整场调频算法可调能量分配逻辑模块为场站控制器整场可调能量分配总控制单元，其主要任务是计算风场各风机物理约束条件，规划调频退出机制，实现风场调频最优化退出目标值，此模块实现过程在第2节详细论述。



## 2 风机单机调频约束条件计算

单台风机调频时提供的有功支撑不是无限制的，除受到单台风机额定容量限制外，更重要的是受当前风机状态约束，如输入风速变化，当前风轮惯性储能情况等，同时风机调频过程部件载荷是否能够承受也需要重点考虑。为叙述方便，本节的讨论过程以风轮直径为 116 m 的 2 MW 双馈实例风机输出数值为例，进行分析论述。

### 2.1 风机惯性可调频能量约束条件

单台风机风轮中存储动能为

$$E(t) = \frac{1}{2} J \omega(t)^2 \quad (3)$$

式中： $J$  为风轮转子转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； $\omega$  为风轮旋转角速度， $\text{rad/s}$ 。

假设调频支撑开始时间电机转速为  $\omega_1$ ，调频结束时间转速为  $\omega_2$ ，则风轮惯量能支撑调频释放能量可表示为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J [(\omega_1/G)^2 - (\omega_2/G)^2] \quad (4)$$

实例风机发电机转速正常运行区间为 188.4 rad/s 至 106.6 rad/s，风轮惯量为  $23.2 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，齿轮箱变比  $G$  为 128，计最大支撑功率  $\Delta P_{\max}$  为 200 kW。则该机型风轮理论上最长惯性支撑持续时间  $\Delta t$  可预估为

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{\Delta P_{\max}} \approx 86 \quad (5)$$

该机型 86 s 的理论最长支撑时间，对电网支撑已经足够长，经统计，电网频率波动的恢复时间 90% 以上是在 10 s 以内恢复的短期波动。故此风机惯性实际支撑时间只需超过 10 s，对电网即有较大意义。

实际运行的风机可调能量的约束条件需对式 (5) 做限制，故此不会达到理想状态 86 s 的支撑时间，其中因风速原因， $\omega_1$  不会一直在额定转速处，因本文研究调频条件以不损失电网频率正常时的发电量为约束之一，故此不会应用提速储能方法更改风机最优功率曲线，此时风机可调能量计算以进入调频时刻所采集的电机转速为准。

同时  $\omega_2$  在实际调频时不能降低到最低转速，因在最低转速处风机自身需要停机保护。为不使风机在调频过程中停机，需研究不使风机拖入最低转速统计数据。

风机的风能转换效率与叶片的等效入流角成一定的函数关系，叶片的等效入流角可以转化为叶尖风速比和固定的桨叶安装角度的形式，尖速比可以表示为

$$\lambda = \frac{v_T}{v} = \frac{R\omega}{v} \quad (6)$$

式中： $R$  为叶片半径，m； $v$  为等效风速，m/s； $v_T$  为叶尖线速度。

当变桨角为设计角度  $0^\circ$  时，桨叶安装角度即确定为定值，则风机功率系数  $C_p$  与叶尖速比  $\lambda$  的函数关系如图 4 所示。由图 4 可知，在某一尖速比下，风能利用系数有最大值，风机的运行效率最高，保持风能利用系数最大的尖速比称为最佳叶尖比  $\lambda_{\text{opt}}$ ，正常风机控制目标即是保持此尖速比为定值。在调频使能过程中，因调频时间短暂，可以认为外界风速暂时恒定的假设成立。当调频使惯性能释放导致  $\lambda$  向减小的方向移动，从而导致风机吸收风能的能力非线性降低，转速变化量越大， $C_p$  降低的越严重。最坏的情况出现在极限转速  $\omega_2$  确定以后，调频初始功率接近额定的情况下。经多次试验， $\omega_2$  取值为 1200 r/min 时可保证任何工况下风机不会因调频不能维持转速而脱网。

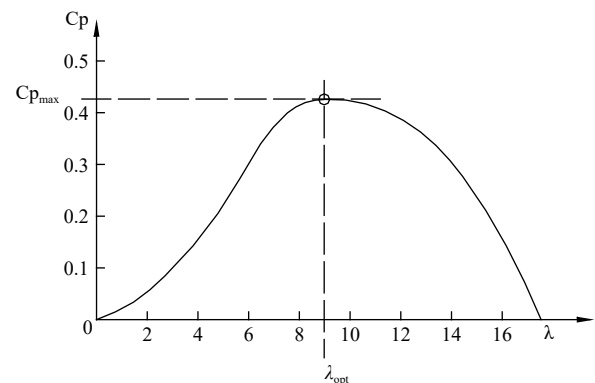


图 4  $0^\circ$  桨距角下风电机组的  $C_p$ - $\lambda$  曲线

Fig. 4 The  $C_p$ - $\lambda$  curve of wind power generating set when pitch angle is  $0^\circ$

同时，由  $C_p$ - $\lambda$  可知，调频过程中，使接近额定功率的风机尽量早地恢复，有利于调频退出后的功率快速恢复为正常值，避免较大二次功率缺口。

### 2.2 风机调频中机械受力约束条件及测量规避控制

风机参与调频过程为电网故障工况，主动支

撑电网频率调节的控制策略是风机电网友好的技术体现；对于风机而言，在电网友好控制策略实施的同时，需要保证调频过程中风机自身的安全，即风机控制策略的机械友好。为保证频率支撑过程机组载荷安全，需编制风机各风速历程的调频工况组，加入风机全生命周期工况组中进行载荷计算分析。表1为进行3次载荷计算所得到的风机各主要部件极限载荷标么化结果，其中1代表设计载荷，各部件极限载荷标么化后超过1则代表有极大危险性。

表1 风机各主要部件极限载荷标么化结果  
Table 1 Per unit values of ultimate loads of wind turbine's main parts

部件载荷变量名	设计载荷	未加调频工况	加入调频工况	调频策略优化后
叶片 $M_x$	1	0.89	0.9	0.88
叶片 $M_y$	1	0.97	0.92	0.92
叶片 $M_{xy}$	1	1.0	0.93	0.95
叶片 $M_z$	1	0.94	0.97	0.92
轮毂 $M_x$	1	0.85	1.04	0.96
轮毂 $M_y$	1	0.93	1.0	0.93
轮毂 $M_z$	1	0.94	0.9	0.95
轮毂 $M_{yz}$	1	0.96	1.0	0.91
偏航轴承 $M_x$	1	0.91	1.0	0.99
偏航轴承 $M_y$	1	0.93	0.87	0.91
偏航轴承 $M_{xy}$	1	0.95	0.9	0.95
偏航轴承 $M_z$	1	0.9	0.96	0.87
塔架 $M_x, 0m$	1	0.93	0.93	0.93
塔架 $M_y, 0m$	1	0.91	0.94	0.91
塔架 $M_{xy}, 0m$	1	0.91	0.94	0.91
塔架 $M_z, 0m$	1	0.9	0.96	0.87

由表1加入调频工况极限载荷可知，调频导致轮毂 $M_x$ 极限载荷超标。轮毂 $M_x$ 正好代表风轮电磁力矩的大小，经单个工况实时数据分析可知，轮毂 $M_x$ 载荷最大时刻出现在风机以大功率进入有功增发支撑的工况，且载荷最大值出现在支撑末端因触及及最低转速时刻。根据此工况特征。为避免机械载荷超标，需提高调频退出的极限转速 $\omega_2$ 。在实时控制中 $\omega_2$ 需提高到具体值可由下式确定。

$$\omega_2 = \frac{P_{\max}}{T_{\text{hubmax}}} \quad (7)$$

式中： $P_{\max}$ 为进入功率支撑时的机组有功出力最

大值； $T_{\text{hubmax}}$ 为轮毂 $M_x$ 可承受的安全载荷值。

### 3 场站调频目标制定及控制策略实现

本节的调频策略即为图3中整场调频算法可调能量分配逻辑的详细实现方案。场站控制器实时采集各台风机的运行状态参数：转速、功率、桨距角，并按照第2节所述调频物理约束条件计算出每台风机最大可支持时间 $\Delta t_{\max}$ 。同时，场站控制器实时监测电网频率的变化，随时准备接管单台风机转矩给定指令进行调频支撑控制。在支撑控制开启后，场站控制器的任务转化为有序退出各台风机转矩控制指令的接管，保证整场有功平稳过度，避免因风机集中退出导致电网频率二次跌落。

为制定退出机制，首先根据风机状态对风机支撑能力进行分组。

第1组：不可支撑组，电机转速小于1250 r/min；第2组：弱支撑组，电机转速大于1250 r/min，小于1450 r/min；第3组：可支撑组，电机转速大于1450 r/min，小于1650 r/min；第4组：强支撑组，电机转速大于1650 r/min，小于1800 r/min，且功率小于1500 kW；第5组：功率参考支撑组，电机转速大于1650 r/min，小于1800 r/min，且功率大于1500 kW，此组风机支撑能力相对较弱，初始功率越大支撑能力反而越弱。

制定各组间及组内恢复策略时，首先制定控制目标函数如下：

$$\max \sum_{i=1}^n \Delta T_i N_i \quad (8)$$

式中： $\Delta T_i$ 第*i*组风机实际支撑时间； $N_i$ 第*i*组风机台数； $n$ 为分组数。

对于以上目标值，建立如下恢复约束：

$$\begin{cases} \xi < \Delta T_{\text{onmin}} \leq T_{i,\text{off}} \\ |\Delta T_i - \Delta T_j| \geq \Delta T_{k,9} \\ \Delta T_i < \Delta t_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

$$k = \begin{cases} i, \Delta T_i < \Delta T_j \\ j, \Delta T_i > \Delta T_j \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\xi$ 为电网频率扰动到恢复估计时间的概率最大值，本文取10 s； $\Delta T_{\text{onmin}}$ 为弱支撑组首台风机开始恢复时间； $T_{i,\text{off}}$ 为第*i*组风机平均退出时间； $\Delta T_{k,9}$ 为第*k*组风机由退出到功率恢复到开始支撑时刻功率的90%所需时间，此恢复时间高度

非线性，可通过实验经验获得，一般在 3~5 s。

在各组恢复时间确定之后，组内各风机恢复次序逻辑为：以 2 组之间的恢复时间差为总恢复时间，平均分配给每一台风机；同一时刻不允许 2 台风机同时恢复；组内恢复次序除功率参考支撑组外，以转速低者优先恢复，功率参考支撑组以进入调频时间的功率为依据，功率高者优先恢复。

## 4 实验验证及指标分析

### 4.1 系统响应指标验证

实验场景：控制系统现场接一台真实风机用于指标提取实验，其余风机节点接模拟终端，时刻进行相应数据量的信号传输。控制系统模拟接收到一次电网频率的跌落，对真实风机的响应数据进行分析。

数据结果：检测到电网频率变化时间为 0 ms；发出转矩接管指令时间为 60 ms；收到风机有功动作时间为 480 ms；有功达到指令目标值 95% 的时间为 560 ms。

分析：系统响应时间为 480 ms，响应完成时间为 560 ms，可以满足调频响应时间 1 s，响应完成时间 3 s 的要求。

系统调频过程平均有功功率为 1638 kW，下发目标值为 1643 kW，调节精度误差为 2.5%，在响应精度指标 5% 以内。该风机实时响应曲线如图 5 所示。

### 4.2 整场有功支撑算法效果验证

实验场景：系统连接 5 台以 bladed 软件为核心的模拟风机；在 5 组分组下各设置 1 台模拟运

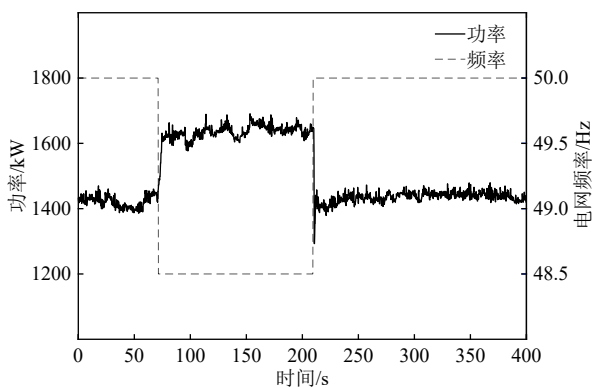


图 5 响应曲线

Fig. 5 Response curve

行风机。做无调频正常发电过程、单机调频发电过程、场站调频发电过程仿真，然后取 3 次仿真总输出功率进行对比，结果如图 6 所示。

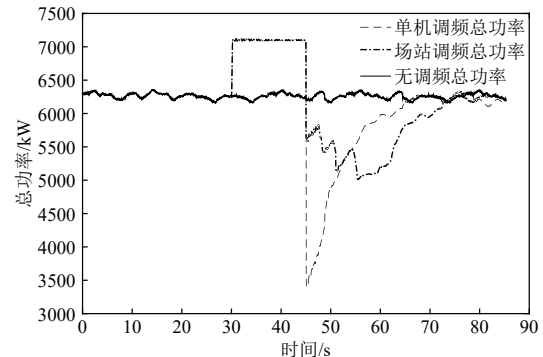


图 6 场站调频控制效果

Fig. 6 Effect of station-level frequency modulation control

由图 6 可知，协调控制方案有功功率二次跌落现象明显改善，功率 2 次跌落最低点深度由 48% 减小到 16%。减小幅度为 67%，控制效果明显。

## 5 结论

本文以风机无储备能量条件下风电场整场调频策略开发为研究对象，以有效防止整场有功输出二次跌落为重心展开，形成结论如下：

1) 测试结果表明场站控制器响应速度满足指标要求，响应速度在 300 ms 内，响应完成时间在 1 s 内，功率响应精度在 95% 以内，场站控制有效退出机制在有功功率二次跌落的改善上效果明显，有功二次跌落最大幅度减小 65% 以上；

2) 风电机组在调频支撑中后期会出现高扭矩低转速工况，易超出风电机组载荷承受能力，在调频控制策略设计中增加调频时间退出约束条件和机组转速边界约束条件，可在满足调频目标的同时兼顾机组本身物理约束限制；

3) 场站控制算法的控制目标函数和约束条件，可实现风机调频的有序退出控制，实验数据显示，风电场整场调频控制策略在防止有功功率二次跌落问题上改善作用明显，整场有功功率二次跌落最大幅度减小 65% 以上。

## 参考文献

[1] 代林旺, 李少林, 秦世耀, 等. 含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 20-27.

DAI Linwang, LI Shaolin, QIN Shiyao, et al. Control and

- analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 20–27(in Chinese).
- [2] 万天虎, 李华, 唐浩, 等. 基于全场控制的风电场一次调频控制方式及其工程化应用[J]. *智慧电力*, 2019, 47(1): 41–46.
- WAN Tianhu, LI Hua, TANG Hao, *et al.* Primary frequency regulation control method for wind farm and its engineering application based on full-field control[J]. *Smart Power*, 2019, 47(1): 41–46(in Chinese).
- [3] 卢晓光, 李朝锋, 徐丰友, 等. 风电场能量管理系统仿真研究[J]. *机电一体化*, 2016(1): 38–42.
- LU Xiaoguang, LI Chaofeng, XU Fengyou, *et al.* Simulation study on wind farm energy management system[J]. *Mechatronics*, 2016(1): 38–42(in Chinese).
- [4] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 50–58.
- WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, *et al.* Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 50–58(in Chinese).
- [5] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 85–90.
- WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, *et al.* Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 85–90(in Chinese).
- [6] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchroinverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259–1267.
- [7] 孟祥辉, 冯爽, 骆宏艳, 等. 计及系统调频需求的风电场有功调控策略[J]. *陕西电力*, 2015, 43(1): 24–27.
- MENG Xianghui, FENG Shuang, LUO Hongyan, *et al.* Control strategy for wind farm active power considering system frequency regulation demand[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2015, 43(1): 24–27(in Chinese).
- [8] 卢晓光, 岳红轩, 吴鹏, 等. 大型风机偏航状态力学分析及偏航控制策略研究[J]. *可再生能源*, 2014, 32(7): 973–977.
- LU Xiaoguang, YUE Hongxuan, WU Peng, *et al.* Mechanical analysis and control strategy of yaw for large-scale wind turbine[J]. *Renewable Energy Resources*, 2014, 32(7): 973–977(in Chinese).
- [9] 赵巧娥, 郭敏. 基于预测控制储能系统平抑风电场并网波动功率[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(5): 94–100.
- ZHAO Qiaoe, GUO Min. Based on energy storage system to stabilize prediction of grid connected power fluctuation in wind farm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(5): 94–100(in Chinese).
- [10] 龚文忠. 风电场虚拟惯性对互联系统功角暂态稳定影响分析[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(8): 41–45.
- GONG Wenzhong. Impact of wind farms virtual inertia on the transient angle stability of interconnected power systems[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(8): 41–45(in Chinese).
- [11] 蔡婷婷, 刘宿彤. 风电参与电网调频技术回顾与展望[J]. *智慧电力*, 2019, 47(3): 1–7, 53.
- CAI Tingting, LIU Sutong. Retrospect and prospect of technology research for wind farm participating in power grid frequency regulation[J]. *Smart Power*, 2019, 47(3): 1–7, 53(in Chinese).
- [12] GAUTAM D, GOEL L, AYYANAR R, *et al.* Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 214–224.
- [13] 万玉良, 刘鑫, 吴晓丹, 等. 风电与多能源储能联合调峰多场景动态鲁棒优化模型[J]. *可再生能源*, 2020, 38(5): 690–695.
- WAN Yuliang, LIU Xin, WU Xiaodan, *et al.* Dynamic robust optimization model of wind power and multi energy storage combined for power grid peak regulation[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(5): 690–695(in Chinese).

收稿日期: 2020-10-11

作者简介:

常东旭(1982), 男, 本科, 工程师, 主要从事特高压直流设备运维管理工作, E-mail: honggang0402@163.com;

吴宁(1979), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事特高压直流系统生产管理工作;

刘辛裔(1987), 男, 本科, 工程师, 主要从事特高压直流设备运维管理工作;

李红刚(1984), 男, 硕士, 工程师, 主要从事特高压直流系统工作;

卢晓光(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 通信作者, 主要从事机电一体化方向的研发工作, E-mail: luxiaoguang326@163.com。