

考虑机群主动升速的动态低频风电系统调度指令有功功率控制方法

袁宁谦¹, 郭灵瑜², 贾锋¹, 王麒铭¹, 章旭¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 风电场接入电网须具备按电网调度指令输出有功功率的能力。由于大幅削减了电力电子设备并采用恒压频比控制运行原理, 动态低频风电系统在深远海发展前景下更具经济性和可靠性。为解决该系统在接入电网时只具备最大功率跟踪能力而无法按电网调度指令输出有功功率的问题, 提出了一种优先机群主动升速的集中变频风电场调度指令有功功率控制方法。通过协调变频和变桨解决控制模式切换中出现的问题, 综合考虑动态低频风电系统利用集中输电频率的运行控制特性, 设计了平衡机组转速和减少桨距角动作的风电场有功功率分配方法。最后, 通过PSCAD仿真模型验证了所提方法的正确性和有效性。算例结果表明, 所提的有功功率控制方法能使动态低频风电场输出有功功率有效跟踪电网调度指令, 同时能存储更多动能, 有利于提高风电场控制水平。

关键词: 风力发电; 低频输电; 有功功率控制; 限出力; 功率分配

Active Power Control Method for Dynamic Low-Frequency Wind Power Systems Under Dispatch Instructions Considering Active Speed-Up of Turbine Cluster

YUAN Ningqian¹, GUO Lingyu², JIA Feng¹, WANG Qiming¹, ZHANG Xu¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: Wind farms must be able to output active power according to grid dispatch instructions when connected to the grid. Due to the significant reduction in power electronic devices and the adoption of constant voltage-to-frequency ratio control operation principle, dynamic low-frequency wind power systems are more economical and reliable in the development prospects of deep-sea areas. To solve the problem that this system can only track the maximum power and cannot output active power according to grid dispatch instructions, a centralized variable-frequency wind farm active power control method considering active speed-up of the turbine cluster is proposed. By coordinating variable-frequency control and variable-pitch control, the problems encountered during control mode switching is solved. Comprehensively considering the operating and control characteristics of dynamic low-frequency wind power systems utilizing centralized transmission frequency, a suitable active power allocation method for wind farms is designed, which balances turbine rotation speed and reduces pitch angle adjustments. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method are verified through PSCAD simulation models. The calculation results show that the proposed active power control method can effectively track grid dispatch instructions for active output of dynamic low-frequency wind farms, while also storing more kinetic energy, which helps to improve the control level of wind farms.

Key words: wind power generation; low-frequency power transmission; active power control; limited output; power distribution

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(22dz1206100); 国家电网有限公司科技项目(520940230007)。

Foundation item: Supported by the Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai (22dz1206100); the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(520940230007).

0 引言

海上风电资源丰富、靠近我国负荷中心,开发意义重大。随着近海优质风资源的日渐减少,海上风电向远海发展是必然的发展趋势^[1-3],因此需要同步解决远海输电问题。柔性直流输电海上换流站成本较高,低频输电经论证在 80~150 km 离岸距离的海上风电最具送出经济性^[4-5],但其交流-交流换流站灵活控制属性尚未充分挖掘^[6-8]。动态低频风电技术集成了风电场集中变频和低频交流输电两项技术^[9],通过岸上换流站建立变压变频交流电压直接满足了风电机群变速最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的需求,从而省去了机组背靠背变流器,具有低成本、高可靠的潜在优势^[7]。

同时,随着集中接入电网的风电容量不断扩大,电网的安全可靠运行面临挑战^[10-11]。为提高风电消纳水平,风电场应具备根据电网调度部门下发的指令控制其有功功率输出的能力^[12]。现有研究多聚焦于变速恒频风电场的有功功率控制,总体可分为两种方式:1)电网直接将功率指令下发给风电场中的每台机组;2)分层风电场功率控制^[13]。目前普遍采用第 2 种控制方式,风电场功率控制系统通常分为上层场站级控制和下层机组级控制,其中风电场接收电网的调度指令,根据风电场的实测数据以及预测信息,通过有功功率分配策略得到风电场各机组的有功功率参考值并下放至各机组,机组层根据功率参考值,通过基于电磁转矩的转速控制和桨距角控制实现风电场的功率调整,以达到电网的调度目标^[14]。在风电场控制层面,分配算法有根据风电场机组数量平均分配有功出力 and 根据机组装机容量按比例分配有功出力 2 种^[15-16],算法简单但未考虑机组特性及外部影响;文献[17]根据风速信息预测各机组功率并按功率值变比例分配有功出力,相较于固定比例的分配算法有所改进。文献[18]以避免风机频繁启停并最大限度利用风能为目标,提出了一种基于风电场预测信息及风机状态特性排序的风电场限出力有功出力分配策略;文献[19]根据预测风况信息和机组运行状况,提出了一种基于机组动态分类的风电场有功出力控制策略,以减少机组启停频次。在机组控制层面,主流变速变桨风力发电机组的有功功率控制方法主要有变速控制、变

桨控制两种^[20],变桨调节功率的原理是通过调节桨距角来改变风能利用系数 C_p 来增减有功功率出力,变速控制通过电磁转矩调节转子的转速,使转速偏离最大功率跟踪点以达到限功率的目的,现有研究更倾向于将两种方法结合。文献[21-22]同时控制机组桨距角和转子转速,使功率在全风速范围内平滑输出,但此类控制方法会导致桨距角频繁动作。文献[23]提出了一种将主动升速与桨距角结合的限功率控制策略,优先利用电磁转矩控制风机转速超过最大功率跟踪点,必要时再调节桨距角控制功率,一定程度上减少了桨距角动作,将弃风能量作为有功功率备用储存在转子动能中。文献[24]针对含高比例风电的送端交直流混联系统,提出了一种交直流有功功率协调控制策略,以应对换相失败引起的潮流转移和交流系统过载问题。文献[25]为充分利用转子在任何桨距位置的惯性动能、缓解频繁变桨动作,提出一种结合转子转速和桨距角调节的功率控制方法,利用转子速度变化平衡由湍流引起的小而高频的输入输出功率差异,同时保证功率参考跟踪的可持续性,减轻桨叶载荷。

由于动态低频风电系统省去了机组背靠背变流器,机组可控性较差,不能直接沿用主流风电技术所采用的风电场有功功率分配与控制策略,故需对集中变频的动态低频风电系统设计针对性地调度指令有功功率控制方法。本文针对动态低频风电系统设计了一种基于调度指令有功控制方法,该方法使整场机群优先主动升速,机群升速至额定转速后再基于优化分配指令有序变桨。本文研究解决了动态低频风电场仅能采用 MPPT 运行而不能按调度指令控制的不足,且所提调度指令有功功率控制方法使得远端风电场具备整场机群响应调度指令快速、风电场旋转动能储备丰富等优点。

1 动态低频风电技术及其整场机群主动升速降功率原理

1.1 基于无通信集中变频的动态低频风电技术

低频输电无需建设高压大容量海上换流站,送出经济性好^[3]。风电场集中变频技术省去各机组变流器,海上风电场可靠性高^[9]。动态低频风电技术结合了低频输电和风电场集中变频的优势,采用变压变频的低频交流输电技术,具备频率、电压动态连续变化以实现风电机群变频调速 MPPT, 及以较

低上限频率实现低频远距离输电两大目标。针对用于频率变换的岸上交流-交流换流站远离海上风电场的问题,文献[9]提出了一种利用就地有功功率-频率控制的无通信集中变频原理,免除了交流-交流换流站与风电场之间的远距离高速通信依赖,该系统框架如图1所示。

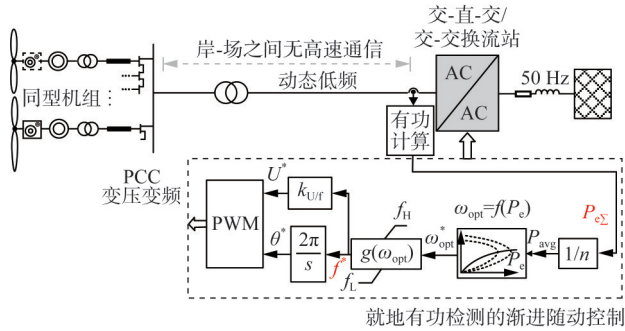


图1 动态低频风电系统

Fig. 1 Dynamic low-frequency wind power system

具体地,就地检测交流-交流换流站低频交流端口的瞬时有功功率 $P_{e\Sigma}$:

$$P_{e\Sigma} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1)$$

式中 u_a 、 i_a 、 u_b 、 i_b 、 u_c 、 i_c 分别为交流-交流换流站低频交流端口abc三相电压、电流。

利用功率信号反馈控制原理直接得到机群最优机群最优转速参考值 ω_{opt}^* :

$$\omega_{opt}^* = \sqrt[3]{\frac{P_{e\Sigma}}{nk_{opt}}} \quad (2)$$

式中: n 为机组台数量; k_{opt} 为风力机气动特性决定常数。进一步按转速开环恒压频比控制设计最优集中输电频率参考值 f_{opt}^* 和输电电压参考值 U^* [9]:

$$\begin{cases} f_{opt}^* = g(\omega_{opt}^*) = \frac{n_p}{2\pi} \omega_{opt}^* \\ U^* = k_{U/f} f^* \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_p 为发电极对数量; $k_{U/f}$ 为发电机获得额定磁通时电压与频率之比; f^* 为集中输电频率参考值; $g(\cdot)$ 为频率角速度变换函数。

1.2 风电场整场机群主动升速降功率的可行性分析

本节通过分析调整输电频率实现整场机群升速降功率的可行性,其中发电机采用鼠笼感应发电机。考虑到输电频率调整是从整场机群的角度对风电场进行整体调控,采用风电场单机聚合模型以简化分析。

图2中, T_e 为发电机电磁转矩, T_a 为风力机气动转矩, v_w 为风速, ω_g 为发电机转速。

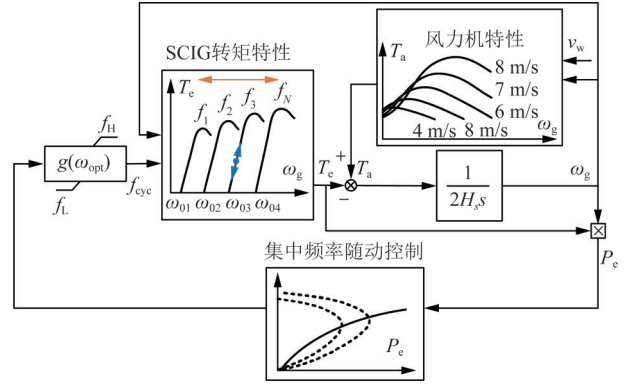


图2 动态低频风电系统的单机等效分析模型

Fig. 2 Dynamic low-frequency wind power system analysis model

由上述分析模型,感应电机机电准稳态时可得式(4)~(6):

$$2H_s \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e \quad (4)$$

$$P_e = \frac{U_s^2}{(x_s + x_r)^2 + (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2} \left(\frac{r_r}{s_{slip}} + r_s \right) \quad (5)$$

$$s_{slip} = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (6)$$

式中: H_s 为异步机的惯性常数; ω_r 为异步机的转子角速度; P_m 为电机的机械功率; P_e 为电磁功率; s_{slip} 为转差率; ω 为输电频率标么值,同时也是单台等效发电机的同步转速; s_{slip0} 为转差率初值; r_s 、 x_s 分别为定子绕组的等值电阻和漏抗; r_r 、 x_r 分别为转子绕组的等值电阻和漏抗。

由恒压频比控制的系统原理可得式(7)。

$$f_{cyc} = \frac{1}{2\pi} \omega \quad (7)$$

式中 f_{cyc} 为集中变频站交流端口输电频率。

建立小信号模型,可用小信号模型分析 f_{cyc} 发生变化时异步电机的有功功率变化情况,在某一稳态初始工作点线性化并进行拉氏变换,推导过程如式(8)~(12)所示。

$$\left(\frac{P_{e0}}{\omega_{r0}} - 2H\omega_{r0}s \right) \Delta\omega_r = -\Delta P_e \quad (8)$$

$$\Delta s_{slip} = \frac{\omega_{r0}}{\omega_0^2} \Delta\omega + \left(-\frac{1}{\omega_0} \right) \Delta\omega_r \quad (9)$$

$$\Delta U_s = k_{U/f} \frac{1}{2\pi} \Delta\omega \quad (10)$$

$$\Delta P_e = \frac{\left[(x_s + x_r)^2 - (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2 \right] U_{s0}^2 (-\frac{r_r}{s_{slip0}})}{\left[(x_s + x_r)^2 - (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2 \right]^2} \Delta s_{slip0} + \frac{2U_{s0} (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})}{(x_s + x_r)^2 + (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2} \Delta U_s$$

$$= k_{es} (\frac{\omega_{r0}}{\omega_{s0}^2} \Delta \omega_s - \frac{1}{\omega_{s0}} \Delta \omega_r) + k_{eU} k_U \Delta \omega_s$$

$$= k_{e1} \Delta \omega_s + k_{e2} \Delta \omega_r \quad (11)$$

$$\Delta \omega_{opt} = \frac{1}{3} (\frac{k_{opt}}{P_{e0}})^{\frac{2}{3}} \frac{1}{k_{opt}} \Delta P_e \quad (12)$$

式中: P_{e0} 为电磁功率的初值; ω_{r0} 为转子角速度的初值; U_{s0} 为端电压初值; ω_0 为输电频率初值; ω_{s0} 为同步角速度初值; $\Delta \omega_{opt}$ 为最优输电频率变化量; $\Delta \omega_s$ 为同步角速度变化量; ΔU_s 为端电压变化量; ΔP_e 为电磁功率变化率; Δs_{slip} 为转差率变化量;

$$k_U = \frac{k_{Uf}}{2\pi}, k_{es} = \frac{\left[(x_s + x_r)^2 - (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2 \right] U_{s0}^2 (-\frac{r_r}{s_{slip0}})}{\left[(x_s + x_r)^2 + (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2 \right]^2},$$

$$k_{eU} = \frac{2U_{s0} (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})}{(x_s + x_r)^2 + (r_s + \frac{r_r}{s_{slip0}})^2}, k_{e1} = k_{es} \frac{\omega_{r0}}{\omega_0^2} + k_{eU} k_U$$

和 $k_{e2} = k_{eU} k_U$ 分别为在初始工作点输电频率变化量 $\Delta \omega$ 和转子角速度变化量 $\Delta \omega_r$ 对应电磁功率变化量 ΔP_e 的斜率。

由此得到从输电频率扰动 Δf_{cyc} 到有功功率输出扰动 ΔP_e 的功率-频率特性小信号模型如图 3 所示。

图 3 表明通过调整集中输电频率 Δf_{cyc} 可改变风电场输出功率 P_e 的大小。以此为基础, 以风电场实

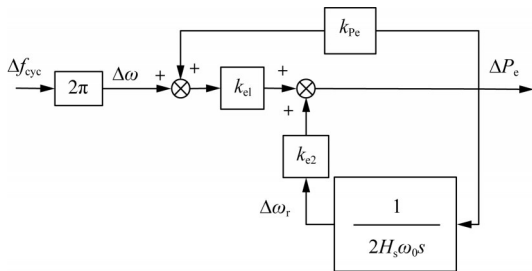


图 3 频率扰动下的功率-频率特性小信号模型

Fig. 3 Small-signal power-frequency characteristic model under frequency disturbances

时输出功率和电网调度指令的偏差作为输入, 构造基于 PI 调节器的闭环调节系统。

$$\Delta f_{cyc} = (k_p + \frac{k_i}{s}) (P_e - P_{set}) \quad (13)$$

式中: P_{set} 为风电场有功功率调度指令值; k_p 、 k_i 分别为 PI 调节器的比例增益和积分增益。

最后, 将 PI 调节器输出的 Δf_{cyc} 与 MPPT 模式下的集中输电频率参考值 f_{opt} 相加, 得到整场机群主动升速模式下的输电频率参考值 f_{cyc}^* 。

$$f_{cyc}^* = \Delta f_{cyc} + f_{opt} \quad (14)$$

对上述带有 PI 闭环调节的系统进行线性化分析, 可得输电频率的小信号响应 Δf_{cyc}^s 如式 (15) 所示。

$$\Delta f_{cyc}^s = (k_p + \frac{k_i}{s}) (\Delta P_{wf} - \Delta P^*) + \frac{1}{24\pi^3 k_{opt} f_{opt0}^2} \Delta P_{wf}$$

$$= (k_p + \frac{k_i}{s}) (\Delta P_{wf} - \Delta P^*) + k_{e3} \Delta P_{wf} \quad (15)$$

式中: ΔP_{wf} 风电场输出有功功率变化量; ΔP^* 有功功率调度指令变化量; f_{opt0} 为最优输电频率初值; $k_{e3} = 1/(24\pi^3 k_{opt} f_{opt0}^3)$ 。图 4(a) 展示了从调度指令扰动 ΔP_{set} 到风电场输出功率变化 ΔP_e 的小信号模型, 其中 $G(s)$ 为图 3 小信号模型的传递函数。对该模型开展频域特性分析, 结果见图 4(b), 可见 1Hz 以内的幅频响应为 0, 随 PI 控制系数的增大, 幅值响应相位滞后的效果有所改善, 表明所提闭环主动升速控制方法选取合适的参数后能够较好地跟踪调度功率指令。

2 动态低频风电系统的调度指令有功功率控制策略

目前风电场有功功率控制技术主要建立在变速恒频风电系统之上, 其有功功率控制通常分为风电场层控制和机组层控制, 有功功率分配算法和限功率控制方式分别是两层控制的核心。功率分配算法基于调度指令和风电机组状态信息, 计算出风电场内各机组的有功出力参考值并分配给各机组; 各机组的限功率控制模块根据参考值调整各自的有功功率, 主要的限功率方法可分为超速控制和变桨控制。

由第 1 节分析可知, 动态低频风电系统通过调节集中输电频率, 可统一调节整场机组总体转速,

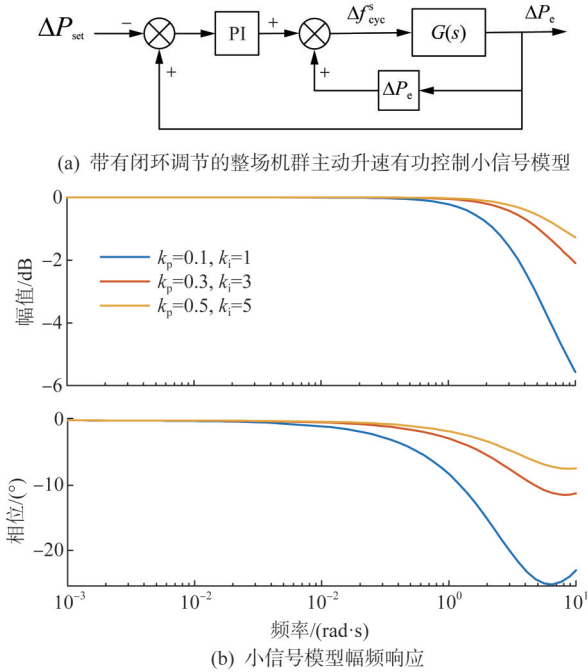


图 4 主动升速控制可行性分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feasibility analysis for active speed-up control

进而调整输出功率，与变速恒频风电系统的区别在于，各机组接收各自的参考功率后单独利用变速变桨方法进行有功功率控制，而动态低频风电系统依赖于集中输电频率，使得整个风电场内的机组转子同时变速，而变桨动作需要单独进行。因此，本文结合变速恒频风电机组功率控制理念，根据动态低频风电系统的特点，利用其频率-功率特性将变速控制与变桨控制相结合，提出以下控制设计思路：当机组需要降功率运行时，优先采用变速变频控制提高整场机组的运行速度，如果集中输电频率达到额定频率时机组未降至指令值，则进行变桨控制；当机组需要升功率运行时，若桨距角不为 0 则控制桨距角减小，同时控制集中输电频率 f_{cyc} 下降进行减速升功率。这一方案改进了变桨系统的运行工况，并将部分未被利用的风能转换存储为旋转风轮的动能，这有助于提升风电场的控制水平。

2.1 动态低频风电场主动升速降功率控制方法

本文首先分别讨论变频控制和变桨控制。在变频控制方面，由第 1 节原理可知，动态低频风电系统利用功率信号反馈（power signal feedback, PSF）控制计算可得系统 MPPT 运行模

式下的发电机群最优平均转速 ω_{opt} ，进一步计算可得最优集中输电频率参考值 f_{opt} ；根据超速控制的原理，当转子转速超过最大功率跟踪点的最优转速 ω_{opt} 时，机组功率降低，因此当机组需要限功率运行时，可通过调节集中输电频率主动升速来实现。

由 1.2 节分析可知，本系统中的转速增量 $\Delta\omega$ 可由风电场并网有功功率检测值和电网下发的功率调度指令值经动态 PI 控制得到，进一步计算可得集中输电频率调节量 Δf_{cyc} ，本文设置主动升速控制模块实现以上功能，再由发电机群最优转速参考值 ω_{opt} 经计算得到的最优集中输电频率参考值 f_{opt} ，将其与集中输电频率调节量 Δf_{cyc} 相加，经限幅得到集中输电频率参考值 f_{cyc}^{ref} 。根据参考频率 f_{cyc}^{ref} 进一步得到的相位角和集中变频换流站交流端口三相电压的参考值；根据三相电压参考值对应的触发信号控制所述集中变频换流站的通断。

由风力机特性可知，机组可通过调整桨距角来改变风能利用系数 C_p 以调节功率，变桨控制根据机组各自的实时功率、接收到的有功功率指令信号以及采集到的风电场实时运行信息，生成控制信号来控制桨距角。各机组有功功率指令信号可由有功功率分配单元接收电网调度指令、风电场输出有功功率和各机组实时信息计算得到。本文优先使用变频控制，单台机组桨距角调节模块首先依据集中输电频率 f_{cyc} 判断变桨动作，即当 f_{cyc} 达到近似额定频率 $f_n - \varepsilon$ 时才允许变桨系统启动，否则将桨距角控制为 0；当允许变桨系统作用时，再进一步通过 PI 控制器计算得到各自的桨距角参考值，进而控制输出的有功功率。本文提出的总体控制方法如图 5 所示。

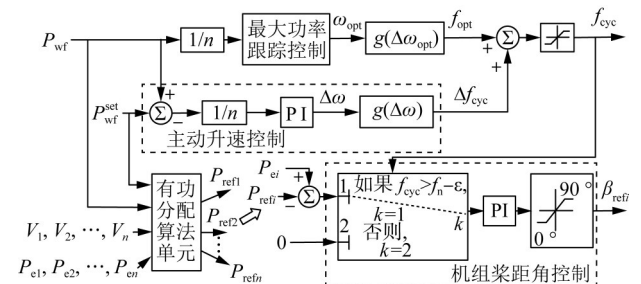


图 5 动态低频风电系统有功功率控制方法

Fig. 5 Active power control methods of dynamic low-frequency wind power system

2.2 动态低频风电系统机组变桨有功功率分配算法

传统风电场有功功率分配算法主要有有功功率平均分配和按比例分配, 其中按最大功率比例分配确保各机组的有功功率目标与其有功功率上限成比例, 按可调裕度比例分配则根据机组的发电裕度比例来分配调节量。动态低频风电系统利用 PSF 控制, 取机组的平均功率作为发电机群的功率参考值, 经计算得到发电机群的转速参考值 ω_{opt} , 并将其转化为相应的集中输电频率参考值, 因而在进行有功功率分配时需要考虑机群有功出力的平衡。本文基于集中变频风电场的特点, 提出一种兼顾各机组转子转速平均化和桨距角动作频次少的机群有功功率分配算法。

本文所提分配算法首先根据风电场实时有功功率输出和调度指令的大小判定风电场进行降功率或升功率控制, 利用优先顺序法将机组实时功率动态排列, 然后优先选取序号靠前的部分机组依次进行变桨调节(在降功率时优先使功率较大的部分机组动作, 在升功率时优先使功率较小的部分机组动作), 相比于使每台机组都参与变桨调节的平均分配或按比例分配的算法, 既能均衡各机组转子转速, 又能减少风电场总体机组的变桨频次。

当风电场输出有功功率大于调度指令功率时, 需要降功率运行, 将机组实时功率值按由大到小进行排列, 各机组按序号排列的输出功率分别为 $P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{ek}, \dots, P_{en}$, 假设前 k 台机组动作共可减载功率 ΔP_{dk} , 将需降功率 ΔP_{dref} 与 ΔP_{dk} 依次比较, 计算如下。

$$\Delta P_{d1} = P_{e1} - P_{e2} \quad (16)$$

$$\Delta P_{dk} = \Delta P_{d(k-1)} + k(P_{ek} - P_{e(k+1)}) \quad (17)$$

$$\Delta P_{dref} = P_{wf} - P_{wf}^{ref} \quad (18)$$

式中 P_{wf} 、 P_{wf}^{ref} 分别为风电场输出有功功率和风电场输出有功功率期望值。

一旦 $\Delta P_{dk} \geq \Delta P_{dref}$, 即可确定序列前 k 台机组变桨动作, 进而算得前 k 台机组的输出功率指令值为 $P_{refi} (i = 1, 2, \dots, k)$, 其余机组保持不变。

$$P_{refi} = P_{e(k+1)} + \frac{\Delta P_{dk}}{k} \quad (19)$$

当风电场输出有功功率小于调度指令功率时, 需要升功率运行, 将机组实时功率值按由小到大顺

序进行动态排序, 各机组按序号排列的输出功率分别为 $P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{ek}, \dots, P_{en}$, 假设前 k 台机组动作共可提升 ΔP_{uk} 的功率, 将需升功率 ΔP_{uref} 与 ΔP_{uk} 依次比较, 其中:

$$\Delta P_{u1} = P_{mppt1} - P_{e1} \quad (20)$$

$$\Delta P_{ui} = \Delta P_{u(i-1)} + P_{mppti} - P_{ek} \quad (21)$$

$$\Delta P_{dref} = P_{wf}^{ref} - P_{wf} \quad (22)$$

式中 P_{mpptk} 为第 k 台机组的最大有功功率。

一旦 $\Delta P_{uk} \geq \Delta P_{uref}$, 即可确定序列前 k 台机组变桨动作, 进而算得前 $k-1$ 台机组输出功率指令值为:

$$P_{refi} = P_{mppti}, i = 1, 2, \dots, (k-1) \quad (23)$$

第 k 台机组的输出功率指令值为:

$$P_{refi} = P_{mppti} - \Delta P_{uk} + \Delta P_{uref}, i = k \quad (24)$$

其余机组保持不变。

本文采用 fortran 语言编写了有功功率分配算法并内嵌于 PSCAD 软件的自定义元件, 流程如图 6 所示。

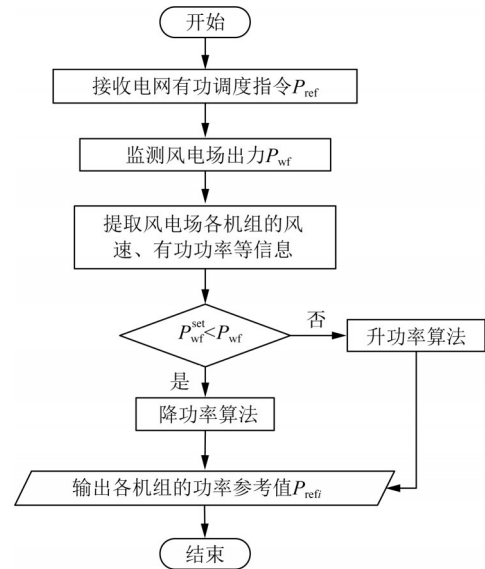


图 6 有功功率分配算法流程图

Fig. 6 Flow chart of active power distribution algorithm

2.3 控制器优化设计

本文方法涉及到变频控制和变桨控制两种方式, 针对控制方式交互时出现的问题, 设计了提前变桨单元对两者间的衔接方式作相应的协调, 以充分利用两者优势继而取得较好的控制效果。当电网要求输出功率下降而当前频率小于额定频率 f_n 时, f_{cyc} 升高, 上升过程中转子动能增加, 电功率可保持

为电网调度功率指令值,然而在新的稳态中气动功率实际只能降为该状态下所对应的值 P_{v,r,f_i} ,故当 f_{cyc} 上升至额定频率 f_n 时,输出的电功率迅速上升为 P_{v,r,f_i} ,而机械装置响应速度的限制导致桨距角无法及时调整以降低功率,造成变频与变桨切换时功率短暂激增。

为解决上述问题,本文设计了提前变桨预决策单元,可根据频率 f_{cyc} 的状态、各机组风速信息和风电场实时输出功率 P_{wf} 得到提前变桨信号 S 和当前状态下所对应的理论输出功率值 P_{v,r,f_i} ,以此控制输入有功功率分配单元的风电场输出功率值,并将信号 S 发送至各机组桨距角调节模块,使得机组能够提前变桨,又由于 f_{cyc} 上升过程中增加的转子动能使输出的电功率保持为期望值 P_{set} ,桨距角的上升对此时的输出功率造成影响较小,而当 f_{cyc} 上升至额定频率 f_n 时,桨距角已接近实际减载所需变桨角度,输出功率尖峰将大大削减。

将有功功率分配单元和提前变桨预决策单元相结合组成风电机组功率指令模块,提前变桨预决策单元根据当前风电场并网点频率检测值 f_{cyc} 和风电场并网有功功率检测值 P_{wf} 判断风电机组是否需要提前变桨,即当 f_{cyc} 上升且在处于接近于额定频率的一小段时间内且 $P_{wf} > P_{wf}^{set}$ 时,输出提前变桨信号 $S=Y$,否则 $S=N$,并将信号传送给有功功率分配单元。有功功率分配单元增设理论有功功率计算部分和信号选择器,理论有功功率计算由 f_{cyc} 和各机组风速信息经计算得到当前状态下所对应的理论输出功率值 P_{v,r,f_i} ,信号选择器接收并根据提前变桨信号 S 选择,原先传输给有功功率分配算法的风电场并网有功功率检测值 P_{wf} 变为可选量,即在有功功率检测值 P_{wf} 和理论输出功率 P_{v,r,f_i} 之间进行选择, $S=N$ 时选择 P_{wf} , $S=Y$ 时选择 P_{v,r,f_i} 。

同时,单台机组桨距角调节模块中决定变桨与否的选择判定变为:根据集中输电频率 f_{cyc} 、提前变桨信号 S 和桨距角状态选择机组桨距角PI调节器的输入量。为了减少控制信号冲突的可能,设置了提前变桨的频率下限值 f_p ,即只有当 $f_p \leq f_{cyc} < f_n - \varepsilon$ 时,提前变桨才能起作用;当 $f_{cyc} \geq f_n - \varepsilon$ 或当 $f_p \leq f_{cyc} < f_n - \varepsilon$ 且提前变桨信号 S 为 N 时,选择器输出 $(P_{ei} - P_{refi})$;当 $f_p \leq f_{cyc} < f_n - \varepsilon$ 且提前变桨信号 S 为 Y 且桨距角不为

0或 $f_{cyc} < f_p$ 且桨距角不为0时,选择器输出负值使桨距角变小;当 $f_p \leq f_{cyc} < f_n - \varepsilon$ 且提前变桨信号 S 为 Y 且桨距角为0或 $f_{cyc} < f_p$ 且桨距角为0时,选择0以保持桨距角不变。

2.4 协调控制策略

考虑机群主动升速的集中变频风电场有功功率调度控制方法的控制框架如图7所示。

该控制系统接收电网下发的有功功率调度指令和检测模块采集到的风电机组相关运行信息,经计算得到频率调整参考值和各机组的桨距角参考值;该控制系统可划分为主动升速控制模块、风电机组限功率指令分配模块和单台机组桨距角调节模块。

其中,主动升速控制模块在常规的集中变频换流站风场侧交流端口频率 f_{opt} 的基础上,根据调度指令 P_{wf}^{set} 和风电场并网有功功率检测值 P_{wf} 计算得到集中输电频率调节量 Δf_{cyc} ,将其与 f_{opt} 相加经限幅得到集中输电频率参考值 f_{cyc}^{ref} ,以此实现风电场中各转子转速控制,并调节风电场有功出力。风电机组功率指令分配模块根据调度指令 P_{wf}^{set} 、风电场并网有功功率检测值 P_{wf} 、风电场并网点频率检测值 f_{cyc} 、各机组风速信息、每台风电机组的实时功率 $P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{ek}, \dots, P_{en}$,得到提前变桨信号 S 和每台风电机组的输出功率指令 $P_{ref1}, P_{ref2}, \dots, P_{refk}, \dots, P_{refn}$,并将其发送至各机组桨距角调节模块。单台机组桨距角调节模块接收提前变桨信号 S 和各自功率参考值 P_{refi} 判断桨距角动作与否,进一步根据风电场并网点频率检测值 f_{cyc} 、每台机组的实时功率 P_{ei} 和桨距角 β_i ,计算得到各自的桨距角参考值 β_{refi} ,通过控制桨距角来调节风电场有功出力。

由以上3个模块达到的控制效果为:当风电系统需要降功率运行时,优先通过变频的方式控制集中输电频率 f_{cyc} 上升,进行升速降功率,桨距角保持不变;当 f_{cyc} 接近额定值时,按理论输出功率对桨距角提前变桨,若 f_{cyc} 达到额定值 f_n 系统功率仍需下降时, f_{cyc} 保持为额定值 f_n ,机组继续变桨降功率。当风电系统需要升功率运行时,若此时桨距角不为0,则控制桨距角减小,并控制集中输电频率 f_{cyc} 下降进行减速升功率。若 f_{cyc} 达到最优频率 f_{opt} 且桨距角归0时,风电场有功功率输出仍小于有功功率调度指令值,则风电场以最大功率跟踪方式运行。

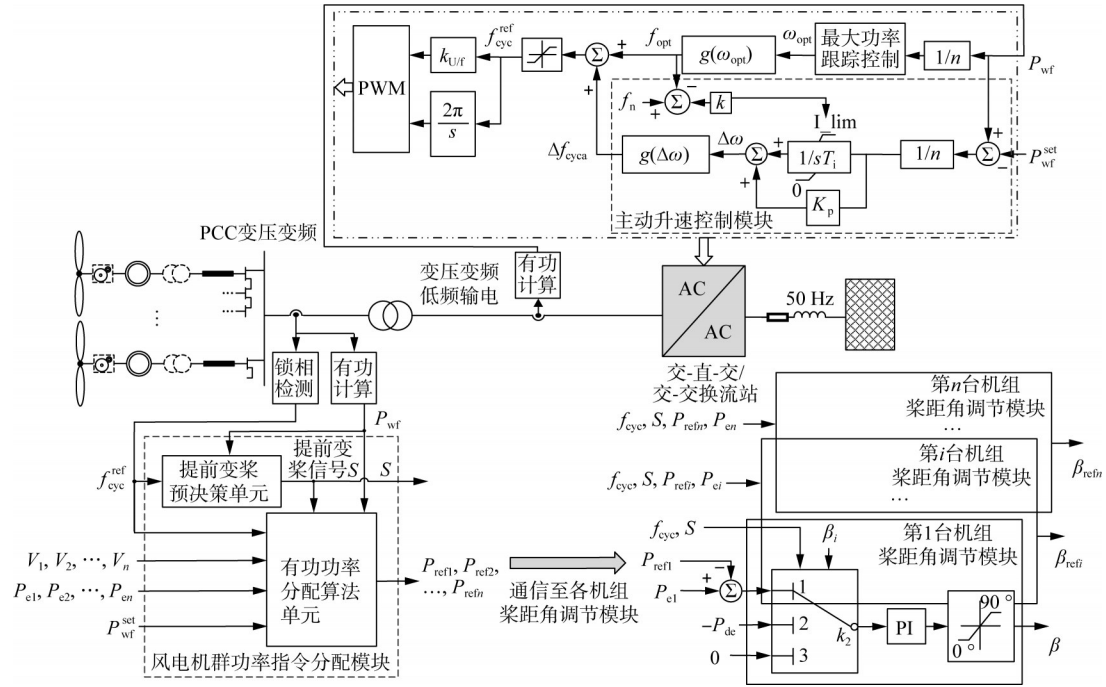


图 7 动态低频风电系统有功功率控制框图

Fig. 7 Active power control block diagram of dynamic low-frequency wind power system

3 仿真分析

3.1 系统简介

本文利用PSCAD搭建动态低频风电系统的电磁暂态仿真模型对文中所提策略进行验证,该风电场由36台额定功率为6 MW的鼠笼式风力发电机组组成,总容量为216 MW,以某风电场某天的风速信息为例,给定各台机组风速在5 m/s~11 m/s之间的随机风,手动设定风电场阶梯式有功功率调度指令进行仿真分析,在1—100 s时段以MPPT方式运行,100—170 s、170—230 s、230—300 s和300 s以后的时段分别设置调度指令为90 MW、70 MW、100 MW、120 MW和110 MW,风电机组每秒接收一次桨距角指令。为验证本文所提出的有功功率控制策略的有效性,本文将所提控制策略和分配算法,分别与现有用于传统风电系统的方法进行比较分析。

3.2 全风速运行模式下控制策略对比分析

在仿真测试中,将本文提出的考虑机群主动升速的集中变频风电场有功功率调度控制与桨距角单独作用的机组无主动升速有功功率控制策略、基于传统风电系统限功率控制策略而未进行协调的有功功率控制策略进行对比仿真,如图8所示。

由图8可见,桨距角单独作用的机组未主动升速有功功率控制策略与调度指令的偏差较为明显,且在风电场有功功率输出相对较低时,集中输电频率由恒压频比控制原理作用而处于较低水平,导致机组的平均转速也随之降低。而采用本文优先调整集中输电频率后变桨的控制策略后,风电场有功功率输出的指令跟踪效果大大改善,机群的平均转速即风电场机组的总体转速显著上升,有效地将大量未被利用的风能存储于机组的旋转动能中,并且以风场中某台机组为例,其桨距角的变化幅度明显降低,有利于减少桨距系统的磨损,延长使用寿命。

此外,机组未主动升速的有功功率控制策略在300 s出现了12 MW左右的功率尖峰;未进行协调的控制策略下运行的风电场在222 s出现了5 MW左右的功率尖峰,在250 s左右出现了12 MW左右的功率尖峰,原因在于转子随 f_{cyc} 升速过程中能调整转速变化率以降低电功率跟随电网指令,而 f_{cyc} 上升至额定频率 f_n 的新稳态时,转子变化率骤降无法再变速,而气动功率尚未下降至指令值,且由于机械装置响应限制桨距角无法及时响应以降低功率,从而在集中输电频率 f_{cyc} 上升至额定频率时易出现功率尖峰。

具体地,以250 s左右的运行状态及某台机组

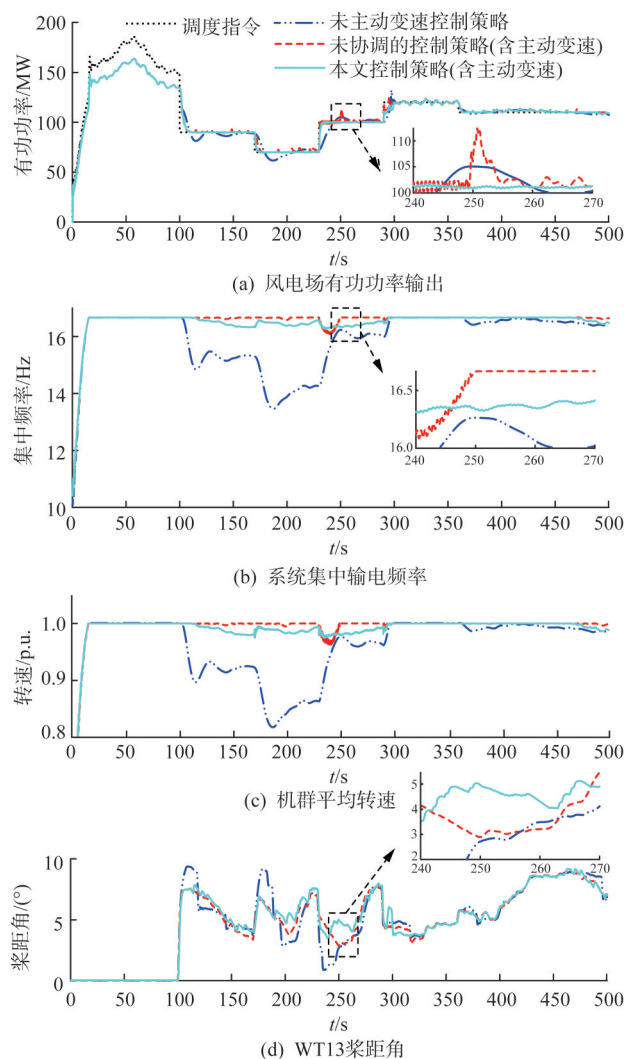


图8 不同控制策略下风电场输出有功功率和集中输电频率对比

Fig. 8 Comparison of active power output and concentrated transmission frequency of wind farm under different control strategies

桨距角为例, 机组未进行协调的控制策略下在集中输电频率 f_{cyc} 上升至 f_n 时功率激增, 而此时此刻该机组桨距角仍处于较小值, 未能及时动作以降低功率。而本文所提控制策略在集中输电频率上升至接近 f_n 时提前变桨, 如图8所示, 240 s之后 f_{cyc} 超过16.3 Hz, 此时率先控制桨距角增大, 在减缓频率上升的同时, 由于桨距角的提前动作减小了实际的气动功率, 在该控制方式下未出现明显的功率尖峰, 可见本文的协调控制方法能大大削弱功率尖峰, 使得功率波动更为平缓, 达到了较好的控制效果。

3.3 全风速运行模式有功功率分配算法对比分析

目前, 现有多数风电场使用的有功功率分配算法主要为比例分配算法, 其原理是根据风电场内各风机的最大功率、有功功率备用裕度等参数确定其在整场风电输出有功功率所占比例。本文对比了用于传统风电场的基于各机组最大功率、基于有功功率备用裕度的变比例算法和本文提出分配算法在调度控制方面的表现。

由图9可知, 按最大功率比例分配算法的指令跟踪效果明显不如其余两种算法, 且集中输电频率低于额定频率时的跟踪效果优于等于额定时的效果。

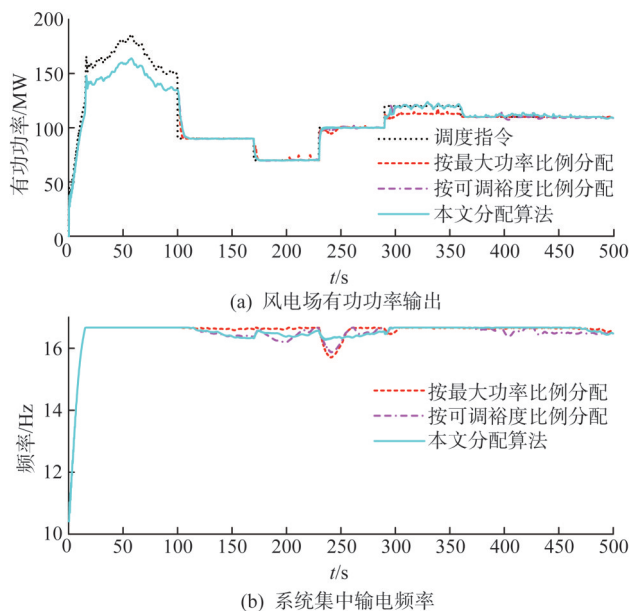


图9 不同分配算法下风电场输出有功功率和集中输电频率对比

Fig. 9 Comparison of active power output and concentrated transmission frequency of wind farm under different allocation algorithms

本文分别计算了各分配算法下100~500 s内5 000个测试点的平均相对误差(MAPE)和均方根误差(RMSE), 计算结果如表1所示。

由表1可见, 与其他两种分配算法相比, 本文

表1 不同分配算法下的误差对比

Tab. 1 Errors comparison of different allocation algorithms

算法	MAPE 值/%	RMSE 值/%
按最大功率比例分配算法	1.812 1	4.448 9
按可调裕度比例分配算法	1.143 7	4.005 3
本文分配算法	1.064 6	3.168 5

的分配算法能更好地跟踪调度指令,平均相对误差为 1.064 6%,均方根误差为 3.168 5%;而采用按最大功率比例分配和按可调裕度分配算法的误差均大于本文分配算法。

对机组运行状况进一步分析,本文给出了第 1、7、13、22、28、34 台风电机组的运行控制情况,各台机组在某一时段的风速、有功功率出力、桨距角变化以及机组平均转速的变化情况如图 10 所示。

由图 10(b)各机组的输出功率曲线及计算所得的各机组实时输出有功功率的方差可知,本文所使用的分配算法相比于现有两种分配算法,实现了风电机组输出功率的更均衡分布,由于动态低频风电系统的集中输电频率是基于各台机组的平均转速所得,故机组有功功率输出均衡对系统更为有利。由图 10(c)可知,本文分配算法下各机组的桨距角动作曲线更平缓,减少了动作频次,有利于降低机组的机械损耗。如图 10(d)所示,本文的有功功率分配算法相较于现有两种分配算法,机群平均转速总体更高且相对更为稳定,因此能存储更多动能,留有更多有功功率调节裕量。

4 结论

本文针对现有动态低频风电系统仅能实现最大功率跟踪而无法响应电网调度指令功率控制的问题,分析了通过整场风电主动升速降功率的技术原理和可行性,设计了综合考虑系统运行特性和变桨频次的功率分配算法,并解决了风电场主动升速和机组变桨之间的平滑切换问题。最终形成一种优先风电场主动升速、随后各机组有序变桨的机组-整场机群协调有功功率控制方法,使动态低频风电系统在最大功率跟踪中具备准确跟踪电网调度指令输出有功功率的能力。

最后,基于电磁暂态仿真验证了所提控制策略的有效性,仿真表明本文控制方法能够准确跟踪电网调度指令,通过整场风电优先升速能够储备更多的转动动能并延缓机组变桨,所提功率分配算法能够较好地均衡各机组出力并进一步减少桨距角动作频次。

本文所提方法通过陆上集中变频站的就地控制,实现远端风电场的场站级有功功率快速跟踪控制,相对于其它远海风电技术实现调度控制时完全

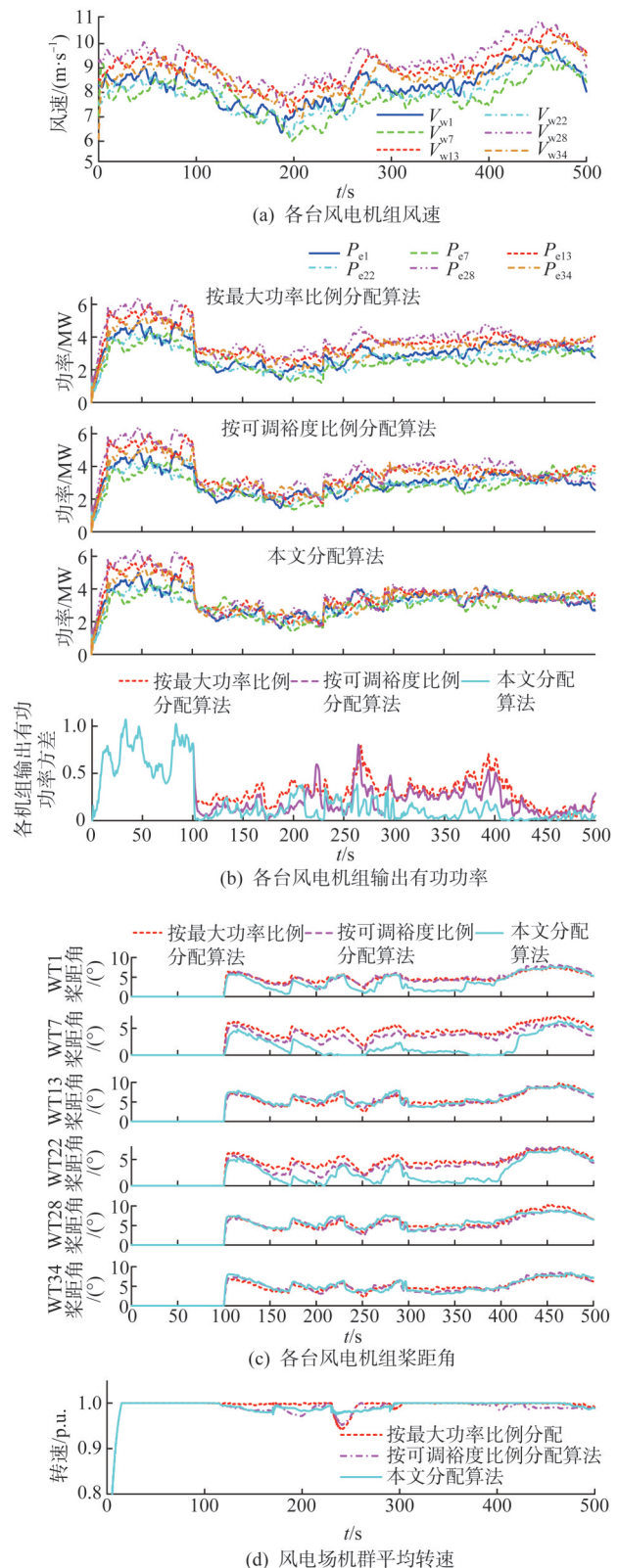


图 10 不同分配算法下第 1、7、13、22、28、34 台风电机组的运行状态

Fig. 10 Operation status of the 1st, 7th, 13th, 22nd, 28th and 34th power units under different allocation algorithms

依赖于多级指令分解和单机响应具有一定潜在优势。所提方法沿用了变速恒频风电场主流的先升速后变桨的降功率思想,对于提升动态低频风电系统的电网频率支撑能力打下基础。

参考文献

- [1] LAURIA S, SCHEMBARI M, PALONE F, et al. Very long distance connection of gigawattsize offshore wind farms: extra high-voltage AC versus high-voltage DC cost comparison[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 713–720.
- [2] 李政轩, 宋强, 曾嵘, 等. 海上风电中频汇集和分布式串联直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7608–7621.
LI Zhengxuan, SONG Qiang, ZENG Rong, et al. A novel HVDC system integrating offshore wind farms using series-connected distributed MMCs and medium-frequency AC collection network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7608–7621.
- [3] KUNJUMHAMMED L P, PAL B C, GUPTA R, et al. Stability analysis of a PMSG-based large offshore wind farm connected to a VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1166–1176.
- [4] 赵泽昕, 陈维江, 赵国亮, 等. 海上风电柔性低频交流送出系统输电能力计算与分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 1–8.
ZHAO Zexin, CHEN Weijiang, ZHAO Guoliang, et al. Calculation and analysis of power transmission capacity of flexible low-frequency AC transmission system for offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 1–8.
- [5] 李浩原, 周国梁, 王刚, 等. 海上风电柔性直流送出海缆过电压研究[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 56–61.
LI Haoyuan, ZHOU Guoliang, WANG Gang, et al. Study on overvoltage of submarine cable applied in offshore wind power VSC-HVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 56–61.
- [6] FISCHER K, PELKA K, BARTSCHAT A, et al. Reliability of power converters in wind turbines: exploratory analysis of failure and operating data from a worldwide turbine fleet[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6332–6344.
- [7] 李宇扬, 杨勇, 李颖毅, 等. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6021–6031.
LI Yujun, YANG Yong, LI Yingyi, et al. Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6021–6031.
- [8] 杨仁焯, 张琛, 蔡旭. 具有频率实时镜像和自主电网同步能力的风场-柔直系统控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 496–506.
YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu. Control of VSC-HVDC with real-time frequency mirroring and self-synchronizing capability for wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 496–506.
- [9] 贾锋, 符杨. 风电功率跟踪的渐进随动本质与无通信的风电场集中变频原理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5877–5890.
- JIA Feng, FU Yang. The gradual follow-up essence of wind power tracking and the non-communication centralized power conversion principle for wind turbine cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5877–5890.
- [10] 罗炜, 曾至君, 李凌飞, 等. 风电机组变流器对海上风电场可靠性的影响[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 22–33.
LUO Wei, ZENG Zhijun, LI Lingfei, et al. Influence of wind power converter on the offshore wind farm reliability[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 22–33.
- [11] 曹毅, 涂亮, 聂金峰, 等. 欧洲海上风电标准化经验及其对我国的启示[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 3–11.
CAO Yi, TU Liang, NIE Jinfeng, et al. European experience on standardization of offshore wind power and its enlightenment to China[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 3–11.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] TENNAKOON A P, ARULAMPAM A, EKANAYAKE J B, et al. Operational restrictions with maximum power extraction of DFIG connected wind farms[D]//2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24–27, 2008, Singapore. New York: IEEE, 2008: 960–965.
- [14] 叶林, 任成, 李智, 等. 风电场有功功率多目标分层递阶预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6327–6336, 6597.
YE Lin, REN Cheng, LI Zhi, et al. Stratified progressive predictive control strategy for multi-objective dispatching active power in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6327–6336, 6597.
- [15] RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTE S, BURGOS J C. Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(2): 279–284.
- [16] 汤奕, 王琦, 陈宁, 等. 采用功率预测信息的风电场有功优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 1–8.
TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning, et al. An optimal active power control method of wind farm based on wind power forecasting information[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 1–8.
- [17] YAO X, SU X, TIAN L. Wind turbine control strategy at lower wind velocity based on neural network PID control[C]//2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, May 23–24, 2009, Wuhan, China. New York: IEEE, 2009: 1539–1543.
- [18] 林俐, 谢永俊, 朱晨宸, 等. 基于优先顺序法的风电场限出力有功控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 960–966.
LIN Li, XIE Yongjun, ZHU Chenchen, et al. Priority list-based output-restricted active power control strategy for wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 960–966.
- [19] 梅华威, 米增强, 李聪, 等. 采用机组风速信息动态分类的风电场有功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6058–6065.
MEI Huawei, MI Zengqiang, LI Cong, et al. An active control strategy based on wind speed information dynamic classification for WTGS in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6058–6065.

(下转第 178 页 Continued on Page 178)