

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211553

# 基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略

徐波, 俞向栋, 杨逸欣, 李东东, 边晓燕

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 随着风电渗透率逐渐提高, 缺少传统调频资源的电网将面临频率安全稳定问题。因此提出一种基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略。首先, 各智能体利用平均一致性算法实现全局信息精确分享。然后, 根据获得的全局信息, 利用分布式经济性算法确定各台风电机组的最优减载率。当电网发生频率扰动时, 各智能体通过分布式方法整定控制参数, 控制相应风储设备协助同步发电机组参与惯量响应和一次调频。最后, 通过仿真验证了所提控制策略的有效性。结果表明, 所提控制策略能够保证电网频率满足动态响应指标。

**关键词:** 频率稳定; 风-储; 协同控制; 多智能体

## Distributed wind-storage coordinate frequency control strategy based on a multi-agent system

XU Bo, YU Xiangdong, YANG Yixin, LI Dongdong, BIAN Xiaoyan

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** With the gradual increase in the penetration rate of wind power, a power system lacking traditional frequency regulation resources will face the problem of frequency security and stability. Therefore, this paper proposes a distributed wind-storage coordinate frequency control strategy based on a multi-agent system. First, each agent uses the average consensus algorithm to accurately share global information, and then uses the distributed economic algorithm to determine the optimal load shedding ratio of each wind turbine according to the obtained global information. When a frequency disturbance occurs in the power system, each agent adjusts the control parameters through a distributed method, and controls the corresponding wind-storage equipment to assist the synchronous generator set to participate in the inertia response and primary frequency control. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation. The results show that the proposed control strategy can ensure that the system frequency meets the dynamic response index.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977128).

**Key words:** frequency stability; wind-storage; coordinate control; multi-agent

## 0 引言

为了满足可持续发展要求, 完成“双碳”目标, 风电等新能源将作为我国能源政策主要实施对象之一。其中风电机组通过电力电子器件接入电网, 与系统频率之间不耦合。因此风电接入电网后的频率稳定性问题是新的研究热点<sup>[1-9]</sup>。

目前国内外针对风电接入电网后的频率控制策略展开了大量的研究, 控制策略可以归类为集中控制策略和分布式控制策略<sup>[10-11]</sup>。集中控制策略大多采用等值单机法或使用中央控制器实现。例如文献

[12]较早提出利用风机转子动能实现调频。以此为基础, 文献[13]提出一种飞轮储能配合不同风速风机的两层协同频率控制策略, 有效提高系统频率动态特性。然而提取转子动能容易造成二次跌落的问题。文献[14]通过结合虚拟惯量和桨距角控制的方法来解决此问题。文献[15]和文献[16]分别提出一种利用风机减载来实现频率控制的策略, 改善频率动态响应并留有一定有功备用。但是没有考虑不合理的减载率带来的成本问题。文献[17]提出一种考虑风机不同运行工况下结合不同控制方式参与系统频率控制的策略。文献[18]考虑通过切换不同运行模式使得风机能够有效地支撑系统频率稳定。在缺少调频资源的电网中, 加入储能是一种较为有效的方

式。然而上述文献没有考虑储能，或者没有很好地解决不同风机之间以及与储能之间的配合问题，并且采用的集中控制策略灵活性和稳定性较低。

分布式控制策略具有灵活性足和可靠性高的优势<sup>[4]</sup>，近年来发展迅速。文献[19-20]运用一致性算法实现微网的能量管理。文献[21]提出了基于一致性算法的改进功率下垂控制策略。文献[22]提出了一种应用于非线性系统的改进分布式控制策略，合理分配负荷功率并提高微网的电压和频率质量，但没有考虑风电机组。文献[23]针对微网中传统下垂控制的稳态误差问题，设计了用于二次频率控制和电压控制的分布式控制器，加强了微网的稳定性。基于多智能体系统(multi-agent system, MAS)，文献[24]提出了一种实现微网一次二次频率控制的分布式协同控制策略，保证微网频率稳定。文献[25]为各智能体制定不同控制策略来协助微网实现电压和频率稳定，但存在数据传输不稳定的问题。这些分布式控制策略中都存在通信网络结构过于复杂的问题，为此，文献[26]提出一种基于牵制一致性的微网分布式控制策略，通过控制部分智能体达到协同系统所有智能体的效果，有效简化了通信网络结构。上述文献中提出的分布式控制策略均应用于微网。随风电渗透率提高，大电网可能会逐渐呈现出分布式的特点，研究含有风电和储能的电力系统的分布式协同频率控制策略具有重要意义。

因此，本文提出一种基于 MAS 的分布式风储协同频率控制策略。首先利用平均一致性算法在各智能体之间分享全局关键信息，各智能体根据获得的信息利用分布式经济性算法在满足“N-1”安全准则的前提下确定各双馈风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)最优减载率。系统频率发生扰动时，各智能体通过分布式方法确定各控制参数，然后各自控制相应风储设备参与频率稳定控制。在 PSCAD/EMTDC 中搭建改进的 IEEE 5 机 14 节点仿真电网，并通过 MATLAB 和 PSCAD/EMTDC 接口技术对多智能体通信网络建模。最后仿真验证了所提控制策略的有效性。

### 1 基于 MAS 的分布式协同频率控制框架

为了克服集中式控制策略的短板，有学者提出集中-分区分布式控制策略和集中-单元分布式控制策略<sup>[27]</sup>。与集中控制策略相比较，这两种策略的信息互动性有所加强，但仍需中央控制器，无法从根本上解决通信网络不灵活的问题。为了实现无中央控制器的完全分布式协同频率控制，采用基于 MAS 的分布式协同频率控制框架。在协同频率控制过程

中，每一个智能体控制其管辖的分布式发电单元。每个智能体具有独立的信息接收、分析和传递能力，通过分享并分析其他智能体的控制信息，改善自己的控制策略。

基于 MAS 的分布式协同频率控制框架如图 1 所示。图中各智能体对电网中相应 DFIG、同步发电机和储能等不同类型分布式单元实现了协同控制。

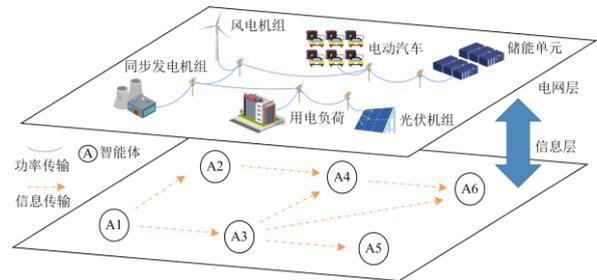


图 1 协同频率控制框架

Fig. 1 Coordinate frequency control framework

MAS 源于模拟生物界中的集体运动，在此过程中个体和群体之间保持相同的速度和相对位置<sup>[28]</sup>，最终完成复杂的集体行为。框架中采用基于 MAS 的一致性算法以实现分享信息的目的。此算法中各智能体在具有通信约束的电网中工作，每个智能体只能与相邻智能体进行通信。与使用中央控制器协调各个单元的集中控制策略相比，MAS 能够分享分布式全局信息并分别控制各相应单元，这种控制方式更能适应未来电网所呈现出的分布式特点。

### 2 风储设备频率控制参数整定

随着风电渗透率不断提高，单独依靠同步机不足以保证频率的稳定，因此各智能体在上文所提控制框架下需合理地控制风储设备参与频率控制，充分挖掘风储设备的频率稳定支撑能力。

当电网出现功率波动的时候，系统频率会随之改变。若频率上升，可以通过减少同步机组出力或减载 DFIG 的方式来稳定频率，本文主要讨论频率下降的问题。本节考虑加入电池储能配合 DFIG 参与频率稳定控制，根据 DFIG 和电池储能不同的运行特性分别参与频率稳定控制中的不同阶段。

风储设备模型如图 2 所示，其中 DFIG 与电池储能分别通过 AC/DC 与 DC/DC 换流器与网侧换流器相连，然后汇聚的电能通过网侧换流器、变压器与交流母线相连，负荷和交流电网则直接连接到交流母线上<sup>[29]</sup>。

#### 2.1 基于一致性算法的全局信息分享

各智能体控制分布式单元参与频率稳定控制需要建立在基于图论的一致性算法上。各智能体通过

通信网络交互信息, 通信网络图 G 如图 3 所示。

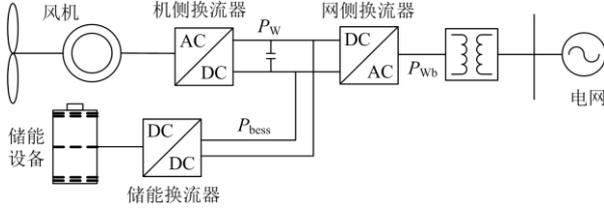


图 2 风储设备模型

Fig. 2 Wind-storage equipment model

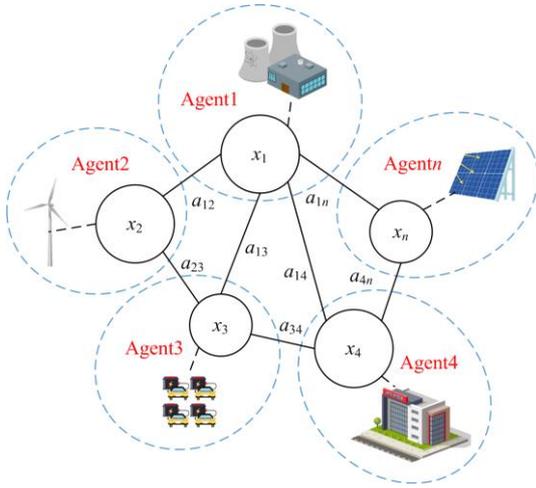


图 3 基于图论的多智能体通信网络图 G

Fig. 3 Multi-agent communication network graph G based on graph theory

各智能体在一阶系统模型中完成对关键全局信息的分享, 且各智能体之间均是双向通信, 各信息在分享过程中具有一阶动态特性。为了确保所有智能体的状态变量能够最终趋向相同的值, 需满足式(1)。

$$\dot{x} = \sum_{j \in N_G} a_{ij} (x_j - x_i) \quad (1)$$

式中:  $N_G$  为图 G 中  $n$  个智能体的集合;  $a_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间的节点权重;  $x_i$  为节点  $i$  的状态信息, 包含功率输出、有功备用等电气量。

由于通信时延对于频率控制的影响较小, 因此本文不考虑通信时延问题<sup>[24]</sup>。为更好地分析算法的应用过程, 使用离散一致性来描述电网的动态特性。

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - \varepsilon \sum_{j=1}^n l_{ij} \times x_j^{(k)}, i=1, 2, L, n \quad (2)$$

式中:  $l_{ij}$  为系统  $L$  矩阵各元素;  $\varepsilon$  为迭代步长。

文献[27]采用节点收缩后的通信网络凝聚度来表示权重, 但是计算过程较为复杂。通信权重会决定在多智能体系统中全局信息的分享过程最终收敛情况以及收敛的速度。本文采用一种通信权重的确

定方式, 以达到提高收敛速度适应实时控制要求的目的, 权重矩阵元素可表示为

$$l_{ij} = \begin{cases} -\frac{2}{\theta(n_i + n_j)} & j \in D_i, j \neq i \\ \sum_{j \in N_G} \frac{2}{\theta(n_i + n_j)} & j \in D_i, j = i \\ 0 & j \notin D_i \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $n_i$  和  $n_j$  分别表示与智能体  $i$  和  $j$  相邻的智能体个数;  $\theta$  为设置参数;  $D_i$  为所有与节点  $i$  相连的节点构成的集合。稳定性的证明详见附录 A。

基于一致性算法, 各智能体通过 MAS 局部信息来获取重要的全局信息。电网运行的时候, 各个智能体对可能导致电网频率大范围波动的功率进行监测, 如直流馈入功率、发电机组输出功率、区域联络线功率等。需要分享的重要全局信息包括参加信息分享的智能体总个数  $n$ 、电网的总有功缺额  $\Delta P$  和电网此时的风电渗透率  $\xi$  等。

信息分享的原理是各智能体利用各自信息逼近平均值来间接地获得全局信息。例如不同智能体监测到本地的有功功率缺额  $\Delta P_i$  和本地的风电功率接入量  $P_i$ , 分别将  $\Delta P_i$  和  $P_i$  作为第  $i$  个智能体参与通信的局部信息初始值。在信息交互过程中, 每个智能体的局部信息  $\Delta P_i$  和  $P_i$  都会逐渐逼近平均值, 之后每个智能体所分享得到的信息就是全局信息的平均值。通过平均值乘以  $n$  即可获取全局信息。运用公式表达信息交流过程如式(4)和式(5)所示。

$$\Delta P_i^{[k]} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta P_j^{[0]}}{n} \quad (4)$$

$$P_i^{[k]} = \frac{\sum_{j=1}^n P_j^{[0]}}{n} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta P = \Delta P_i^{[k]} \times n \\ P = P_i^{[k]} \times n \end{cases}$$

式中:  $\Delta P_j^{[0]}$  和  $P_j^{[0]}$  分别是第  $j$  个智能体监测得到的有功功率缺额初始值和风电功率接入初始值;  $\Delta P_i^{[k]}$  和  $P_i^{[k]}$  分别是第  $i$  个智能体经过  $k$  次迭代之后得到的全局变量平均值;  $\Delta P$  和  $P$  分别为电网总的有功缺额和总的风电功率接入量。

## 2.2 DFIG 控制参数

智能体可以控制 DFIG 进行频率调节, 即采用提取转子动能或者留有一定有功备用的控制方法。

提取 DFIG 的转子动能很难稳定地提供功率支撑,而且容易造成频率的二次跌落。随着风电渗透率的提高,同步机组的有功备用逐渐不足,本文考虑智能体通过桨距角控制来实现对 DFIG 的减载,从而预留有功备用以参与频率调节<sup>[10]</sup>。桨距角控制的速度较为缓慢,无法在较短时间内提供惯量支撑功率,因此仅考虑通过桨距角控制来实现一次调频的功能。现有风机参与调频的控制策略大多不仅不考虑风机减载率整定,而且不考虑不同机组不同运行工况下的配合。本文控制策略中提出一种智能体通过分布式算法较为经济且合理地整定相应 DFIG 一次调频控制参数的方法。

### 1) 减载率整定

风机减载必然会造成弃风的情况出现,会造成经济上的损失。因此对于减载率的整定尤为重要。智能体首先根据“N-1 安全准则”确定预设最大功率扰动,确定这种情况下所需的总预留功率。然后根据运行成本最小的原则利用分布式算法分配各 DFIG 机组所需预留的功率,以此来确定最为经济的减载率。

根据相应 DFIG 和同步发电机提供一次调频支撑功率的运行成本,各智能体确定各自独立的目标。并要求各自提供的支撑功率运行成本最低。处于同一电网内的各单元的运行需要满足总体功率平衡等要求,因此各单元在达到各自支撑功率运行成本最低的同时,也实现了电网频率稳定控制成本最低的总体目标。其目标函数可表示为

$$\min F = \sum_{i=1}^N c_i^w(P_{w,i}) + \sum_{j=1}^M c_j^x(P_{x,j}) \quad (6)$$

式中:  $F$  为各单元提供支撑功率的总成本;  $N$ 、 $M$  分别为提供支撑功率的 DFIG 和同步发电机的总数;  $P_{w,i}$  和  $c_i^w(P_{w,i})$  分别为第  $i$  台 DFIG 提供的支撑功率大小和成本;  $P_{x,j}$  和  $c_j^x(P_{x,j})$  分别为第  $j$  台同步发电机提供的支撑功率大小和成本。

本文控制策略考虑各台 DFIG 运行在次优曲线,留有有功备用,能在一次调频阶段以及电网进入准稳态时也能提供稳定的功率支撑。考虑减载成本及 DFIG 增发功率的成本,DFIG 运行在次优曲线时总成本函数可表示为

$$c_i^w(P_{w,i}) = k_i^a (P_w^{\max} - P_{w,i})^2 + k_i^b P_{w,i}^2 \quad (7)$$

式中:  $k_i^a$  和  $k_i^b$  分别表示第  $i$  台 DFIG 的减载成本系数和增发功率成本系数;  $P_w^{\max}$  为可调节功率的最大值。

同步发电机增发功率成本可以用二次函数表示为<sup>[27]</sup>

$$c_j^x(P_{x,j}) = a_x P_{x,j}^2 + b_x P_{x,j} + c_x \quad (8)$$

式中:  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$  分别为同步发电机成本函数各次项的系数。

各成本函数中的参数详见参考文献[27]。除各智能体分享得到的全局信息之外,还需要满足式(9)所示约束条件。

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{w,i} + \sum_{j=1}^M P_{x,j} = \Delta P_{\max} \\ P_{w,i}^{\min} \leq P_{w,i} \leq P_{w,i}^{\max} \\ P_{x,j}^{\min} \leq P_{x,j} \leq P_{x,j}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta P_{\max}$  为电网可能发生的最大功率总缺额;  $P_{w,i}^{\max}$  和  $P_{w,i}^{\min}$  分别表示第  $i$  台 DFIG 能够释放的功率上下限,可根据不同风速修改;  $P_{x,j}^{\max}$  和  $P_{x,j}^{\min}$  分别表示第  $j$  台同步发电机能够释放的功率上下限。

在求取最优减载率的过程中,提取各分布式单元(包括各 DFIG 以及同步发电机)的一致性变量  $\lambda$ ,各智能体通过信息交互使各自的一致性变量趋于一致,以此来求得分布式优化问题的最优解<sup>[27]</sup>。

应用拉格朗日乘子法对成本函数进行处理,在不考虑式(9)中不等式范围约束的条件下,将原来的优化问题转化为

$$\min \Phi = \sum_{i=1}^N c_i^w(P_{w,i}) + \sum_{j=1}^M c_j^x(P_{x,j}) + \lambda (\Delta P_{\max} - \sum_{i=1}^N P_{w,i} - \sum_{j=1}^M P_{x,j}) \quad (10)$$

将式(10)分别对  $P_{w,i}$ 、 $P_{x,j}$  和  $\lambda$  求偏导,根据等微增量准则,当所有偏导趋于一致时达到最优解。取各机组对应偏导为一致性变量,即得到以下方程:

$$\begin{cases} \lambda_{w,i} = \frac{\partial c_i^w(P_{w,i})}{\partial P_{w,i}} = 2k_i^a (P_{w,i} - P_{w,i}^{\max}) + 2k_i^b P_{w,i} \\ \lambda_{x,j} = \frac{\partial c_j^x(P_{x,j})}{\partial P_{x,j}} = 2a_x P_{x,j} + b_x \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\lambda_{w,i}$  和  $\lambda_{x,j}$  分别为各台 DFIG 和同步发电机的一致性变量。

在各智能体的一致性变量收敛过程中,还需要考虑功率的平衡约束条件。为了保证计算过程中功率的平衡,需要在一致性变量迭代的公式中加入功率调整项,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{w,i}(k+1) = \lambda_{w,i}(k) - c(k) \sum_{t \in S} l_{wi,t} \lambda_t(k) + \sigma \mu_{w,i} \\ \lambda_{x,j}(k+1) = \lambda_{x,j}(k) - c(k) \sum_{t \in S} l_{xj,t} \lambda_t(k) + \sigma \mu_{x,j} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $S$  为系统内  $n$  个智能体构成的集合;  $c(k)$  为

增益调整函数;  $l_{wi,t}$ 、 $l_{xj,t}$  为  $L$  矩阵各对应元素;  $\mu_{w,i}$  和  $\mu_{x,j}$  分别为第  $i$  台 DFIG 和第  $j$  台同步发电机的功率调整项;  $\sigma$  为一致性收敛系数。

功率调整项的计算更新过程如式(13)<sup>[30]</sup>。

$$\begin{cases} \mu_{w,i}(k+1) = \mu_{w,i}(k) - c(k) \sum_{r \in S} l_{wi,t} \mu_r(k) + (P_{w,i}(k+1) - P_{w,i}(k)) \\ \mu_{x,j}(k+1) = \mu_{x,j}(k) - c(k) \sum_{r \in S} l_{xj,t} \mu_r(k) + (P_{x,j}(k+1) - P_{x,j}(k)) \end{cases} \quad (13)$$

根据上述分布式经济性分配方法, 在保证“N-1”安全准则的情况下确定各台 DFIG 的最优减载率。因为其快速整定的能力, 可以每隔一段时间重新整定, 以保证最优减载率的实时更新。

## 2) 一次调频参数整定

各智能体在确定相应 DFIG 的最优减载率之后, 当系统发生频率波动时, 以减载率为依据整定各 DFIG 的一次调频参数。

桨距角控制示意图如图 4 所示, 当系统频率  $f_{\text{grid}}$  下降偏离参考值  $f_{\text{ref}}$  时, 出现频率偏差  $\Delta f$ 。该频率偏差经过下垂控制得到一次调频功率增量  $\Delta P_N$ 。再考虑 DFIG 的减载率, 得到  $P_{\text{ref}}$ 。最后各智能体通过  $P = f(\beta)$  函数求取桨距角  $\beta$ 。

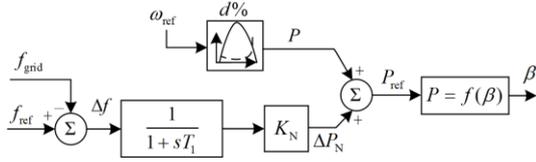


图 4 桨距角控制示意图

Fig. 4 Pitch angle control schematic diagram

由上文可知, 智能体主要通过一次调频参数对 DFIG 的有功输出大小进行控制。参数的选取对于一次调频具有重要的作用<sup>[31-33]</sup>。增大 DFIG 的一次调频参数, 有助于减小最大频率偏差, 更快恢复到准稳态频率。在电网运行过程中, 为了能够更有效地起到功率支撑的作用, 根据不同大小的电网功率缺额需要确定较为合适的一次调频参数。

各个智能体分享电网全局关键信息, 然后各智能体通过获取的信息来求取频率扰动发生后系统所需要的一次调频参数大小。首先针对电网频率响应进行理论分析<sup>[34]</sup>。根据同步发电机特性, 同时考虑 DFIG 一次调频参数, 联立式(14)中所示方程。

$$\begin{cases} \frac{d\omega_G}{dt} = \frac{1}{T_J} [(P_{G0} + \Delta P_G) - (P_{L0} + \Delta P_L)] \\ P_{G0} = P_{L0} \\ T_G \frac{d\Delta P_G}{dt} + \Delta P_G = -(K_G + K) \Delta f \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\omega_G$  为同步发电机转速;  $T_G$  为调速器动作时间常数;  $T_J$  为同步发电机惯性时间常数;  $P_{G0}$ 、 $\Delta P_G$  分别为同步发电机初始输出功率和功率变量;  $P_{L0}$ 、 $\Delta P_L$  分别为负荷初始大小和负荷变量;  $K_G$  为同步发电机一次调频参数;  $K$  为 DFIG 一次调频参数。

联立方程可得

$$T_G T_J \frac{d^2 f}{dt^2} + T_J \frac{df}{dt} + (K_G + K) f = (K_G + K) - \Delta P_L \quad (15)$$

通过求解式(15)可以得到频率  $f$  的表达式。令  $df/dt = 0$ , 得到频率最低点表达式为

$$f_{\min} = 1 - \frac{\Delta P_L}{(K_G + K)} \left( 1 - e^{-\frac{1}{2T_G} t_m} \sqrt{\frac{(K_G + K) T_G}{T_J}} \right) \quad (16)$$

根据电力系统安全稳定控制技术导则, 设置频率最低点为 49.5 Hz。设定频率变化率 (Rate of Change of Frequency, RoCoF) 为 0.5 Hz/s<sup>[35]</sup>, 估计到达频率最低点时间  $t_m$  为 1 s。在  $f_{\min}$  和  $t_m$  确定的情况下, 根据式(16)求解全部 DFIG 需提供的一次调频参数  $K_{\text{sum}}$  为

$$K_{\text{sum}} = \frac{\Delta P_L^2}{4(1 - f_{\min})^2} \left( -e^{-\frac{1}{2T_G} t_m} \sqrt{\frac{T_G}{T_J}} + \sqrt{\frac{T_G}{T_J} e^{-\frac{1}{T_G} t_m} + \frac{4(1 - f_{\min})}{\Delta P_L}} \right)^2 - K_G \quad (17)$$

在求取一次调频参数的过程中, 由式(17)可知, 调速器动作时间常数  $T_G$  和同步机惯性时间常数  $T_J$  对参数的影响较大。通过分析计算可知, 当两个时间常数误差都在 10% 左右时, 一次调频参数误差不超过 10%, 具有较高的精度。

根据一次调频总量减去同步发电机提供的调频量, 智能体即可获得全部 DFIG 需要提供的一次调频量的大小。然后通过信息分享得到各台 DFIG 的减载率, 并确定本智能体所控制 DFIG 的有功备用占有所有 DFIG 有功备用的比例, 最后按照比例计算自身所需的一次调频参数, 如式(18)所示。

$$K_i = \frac{d_i P_{Ni}}{\sum_{j=1}^N d_j P_{Nj}} K_{\text{sum}} \quad (18)$$

式中:  $K_i$  为第  $i$  台 DFIG 一次调频参数;  $d_i$  和  $P_{Ni}$  分别为第  $i$  台 DFIG 的减载率和额定功率;  $d_j$  和  $P_{Nj}$  分别为第  $j$  台 DFIG 的减载率和额定功率。

## 2.3 储能控制参数

当系统发生功率扰动时, 各智能体根据风储设备中电池储能快速释放功率的特点来提供惯量响应阶段的功率支撑。

惯量响应控制示意图如图 5 所示, 智能体在电

池储能功率控制环节引入惯量响应环节, 系统频率  $f_{\text{grid}}$  通过微分环节得到频率变化率 RoCoF, 然后经过比例环节得到惯量响应功率。增大惯量响应参数, 能够有效地减缓频率跌落速度从而为一次调频争取时间<sup>[31-33]</sup>。

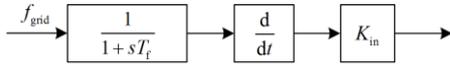


图 5 惯量响应控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inertia response control

确定合适的惯量响应参数是一个重要的问题。模糊算法具有结果清晰、系统性强的特点, 并且能比较好地解决模糊的、难以量化的问题。各智能体通过平均一致性算法分享关键全局信息, 然后各智能体通过模糊算法在考虑电网有功缺额大小和风电渗透率两种条件下确定所控制电池储能合适的控制参数。其中渗透率  $\xi$  由获得的风电功率接入总量  $P$  除以所有机组总容量来求得。基于模糊算法的惯量响应参数整定效果图如图 6 所示, 首先参考同步发电机惯量响应参数, 设置控制参数上下限。各智能体内部将总功率缺额  $\Delta P$  和渗透率  $\xi$  作为双维输入变量, 通过模糊算法得到合适的控制参数, 之后各智能体通过整定得到的参数控制相应电池储能参与惯量响应阶段。

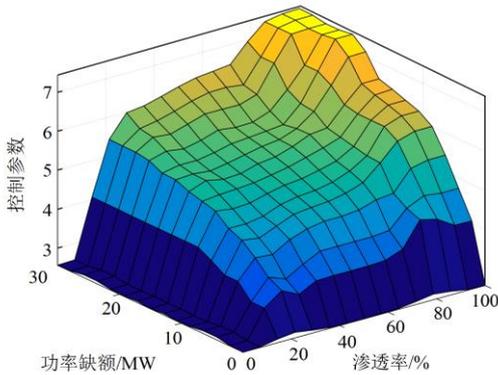


图 6 基于模糊算法的惯量响应参数整定效果图

Fig. 6 Effect picture of inertia response parameter tuning based on fuzzy algorithm

### 3 分布式风储协同频率控制策略

控制策略结构示意图如图 7 所示。在协同频率控制策略中, 各智能体控制相应风储设备协助同步发电机参与频率稳定控制。本文所提控制策略主要考虑风储之间协同配合, 在频率控制过程中新能源增发功率一般不会超过线路设计传输容量, 因此不考虑潮流和电压(无功)的影响。

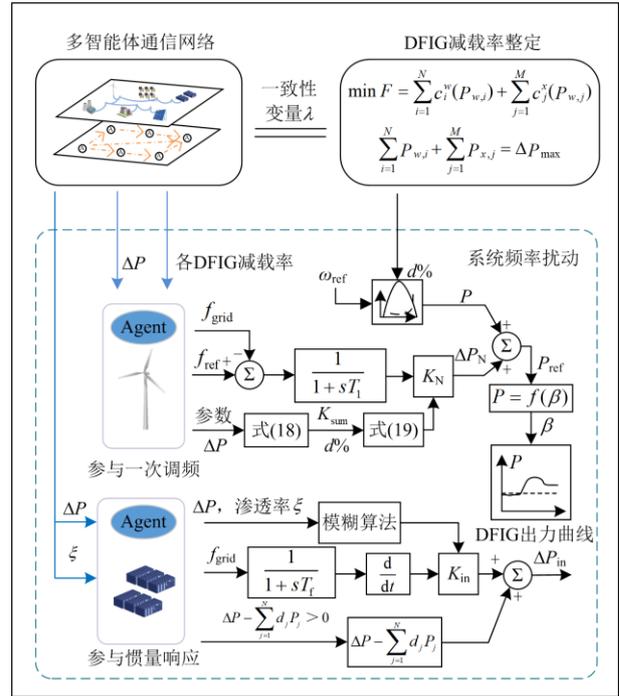


图 7 分布式风储协同频率控制策略

Fig. 7 Distributed wind-storage coordinate frequency control strategy

Step1, 建立分布式协同频率控制框架, 各智能体控制各分布式单元。

Step2, 各智能体之间基于平均一致性算法分享重要的电网全局信息。分享的全局信息包括智能体总个数  $n$  和电网此时的风电渗透率  $\xi$  等实时信息, 以及电网的各个运行参数。运行参数可以保存在各智能体中, 方便整定计算。

Step3, 根据各台 DFIG 和同步发电机的运行成本, 在满足“N-1”安全准则的前提下, 确定各台 DFIG 最优减载率。分布式经济性算法能够较快计算最优减载率, 根据电网运行状态变化, 可以每隔一段时间重新整定。

Step4, 系统发生频率扰动时, 各智能体根据分布式算法快速整定控制参数。风储设备中储能单元参与惯量响应阶段, 各台 DFIG 参与一次调频。当风速发生变化, 若 DFIG 的计算出力大于最大有功备用, 由储能单元协助 DFIG 增发功率至计算出力。

Step5, 各智能体控制相应风储设备协助同步发电机参与频率稳定控制。

### 4 仿真实验

#### 4.1 仿真设置

基于 PSCAD/EMTDC 搭建改进的 IEEE 5 机 14

节点电网,对风储协同频率控制策略进行仿真验证。电网结构如图 8 所示,其中虚线框内代表各分布式单元及其对应的智能体。通过应用 Matlab 和 PSCAD/EMTDC 的接口技术对多智能体系统进行建模。为了验证控制策略的有效性,在电网中的 G2 到 G4 同步发电机组并网点加入风储设备,均包含 DFIG 和电池储能,并均由该节点一个智能体控制。电网包含控制 5 台同步发电机与 4 处风储设备的共计 9 个智能体。电网频率为 50 Hz。基础恒功率负荷为 220 MW。其余电网参数见附录 A。

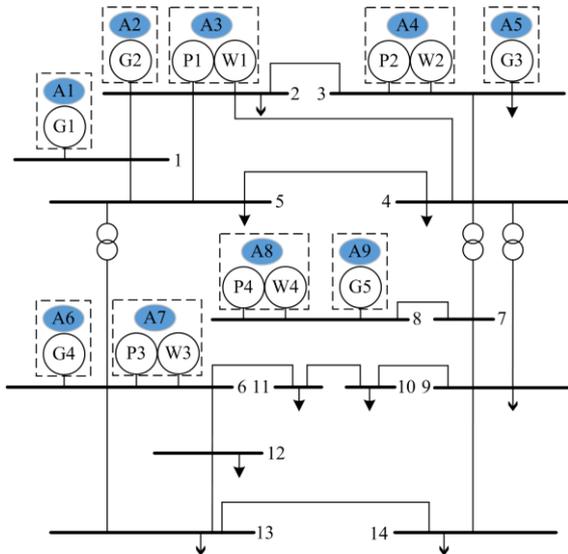


图 8 改进的 IEEE 5 机 14 节点电网

Fig. 8 Improved IEEE 5-machine 14-bus system

为了能够验证高风电渗透率下控制策略的有效性,风电总接入容量为 120 MW,渗透率为 55%。根据文献[36-37],设置储能容量大小为总负荷大小的 5%。根据系统的总容量和“N-1”安全准则,本文考虑最大容量同步发电机脱网为最大功率扰动事件,预估功率缺额为 25 MW。根据分布式经济性算法,对各 DFIG 与各同步发电机对应的智能体分配有功备用,并确定风机最优减载率。各分布式单元有功备用大小如表 1 所示。分布式经济性算法计算过程收敛时间为 0.433 s。各一致性变量以及功率调整项收敛动态过程如图 9 所示。

本文仿真设置 2 个应用场景,在每个场景中分别测试不同控制方式。不同场景的通信网络及信息共享内容如图 10 所示,场景 A 中,设置功率扰动为 10 MW。场景 B 中,节点 8 处 15 MW 同步发电机退出电网。

表 1 各分布式单元有功备用大小

Table 1 Active power reserve of each distributed unit

分布式单元	有功备用/MW	减载率/%
DFIG1	1.63	6.5
DFIG2	2.03	8.1
DFIG3	1.98	7.9
DFIG4	2.40	9.6
G1	5.84	0
G2	3.25	0
G3	3.43	0
G4	3.27	0
G5	1.17	0

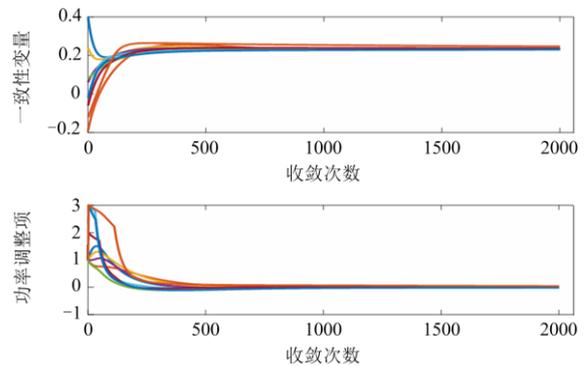
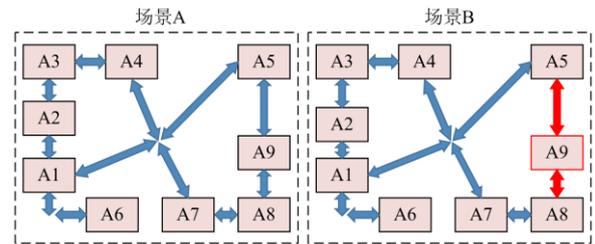


图 9 变量收敛过程

Fig. 9 Convergence process of variable



智能体	相邻	场景A			场景B		
		输出	缺额	减载率	输出	缺额	减载率
1	2,4,5,6,7	0	0	0	0	0	0
2	1,3	0	0	0	0	0	0
3	2,4	25	0	6.5	25	0	6.5
4	1,3,5,7	25	0	8.1	25	0	8.1
5	1,4,7,9	0	0	0	0	0	0
6	1	0	10	0	0	0	0
7	1,4,5,8	25	0	7.9	25	0	7.9
8	7,9	25	0	9.6	25	0	9.6
9	5,8	0	0	0	0	15	0

图 10 通信网络及信息共享内容

Fig. 10 Communication network and sharing information

## 4.2 仿真分析

### 1) 场景 A

系统发生功率扰动后,首先各个智能体分享关键全局信息,包括全局有功功率缺额以及各台 DFIG 减载率,信息共享用时 0.263 s。其中各分布式单元

减载率大小信息分享过程如图 11 所示。此次功率缺额所需要的 DFIG 一次调频参数为 24 左右。各智能体根据减载率为相应 DFIG 分配一次调频参数，根据两个全局变量经模糊算法得到相应储能的惯量响应参数，将控制参数通过接口技术传递到 PSCAD 中控制各处风储设备参与频率控制。

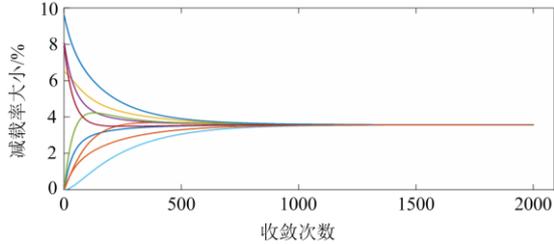


图 11 减载率信息分享过程

Fig. 11 Load shedding rate information sharing process

分别仿真风储设备不参与调频、仅 DFIG 参与一次调频、风储设备同时参与惯量响应和一次调频(常规控制)以及风储设备同时参与惯量响应和一次调频(协同控制)等 4 种不同情形。不同控制方式下，仿真得到频率响应曲线与 DFIG 出力曲线分别如图 12 和图 13 所示，各电池储能出力曲线如图 14 所示。

本文控制策略所需时间包括信息分享时间和分布式单元的控制时间。仿真中信息分享的时间较短。在实际情况下，风机变桨距控制中变桨执行机构时间常数 0.3 s，变桨输出延迟 0.12 s，总耗时为 0.5 s 左右<sup>[38]</sup>。电化学储能设备的响应时间为毫秒级别。根据最新国家标准 GB/T19963.1-2021<sup>[39]</sup>，控制策略的响应时间满足频率稳定控制时间尺度要求。

场景 A 中，各智能体在频率发生扰动时通过模糊算法得控制参数来控制各储能参与惯量响应，在图 14 中，储能在较短时间内增发惯量响应支撑功率，其值随 RoCoF 增大而增大，最大支撑功率为 0.8 MW。当检测到 RoCoF 减少至零时退出惯量响应。从图 12 中也可以看出，加入了储能之后，频率响应曲线在功率刚发生扰动时，相比较风储设备不参与调频和风储设备只参与一次调频这两种控制方式，RoCoF 得到明显改善，有效减缓了频率下跌的速度，延后了到达最低频率点的时间。在图 13 中，对比各台 DFIG 出力曲线可以看出，在常规控制策略中，各台 DFIG 出力基本一致，并没有考虑不同有功备用的情况，减载率小的 DFIG 最大出力为 0.9 MW 左右。而在协同频率控制中，减载率小的 DFIG 分配支撑功率较小，最大出力为 0.7 MW 左右。两种控制方法 DFIG 总有功出力差不多，频率响应曲线在两种控制方法之下相差不大，均满足频

率稳定的要求。

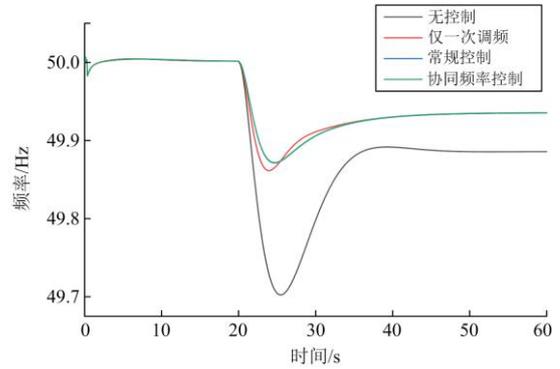


图 12 频率响应曲线

Fig. 12 Frequency response curve

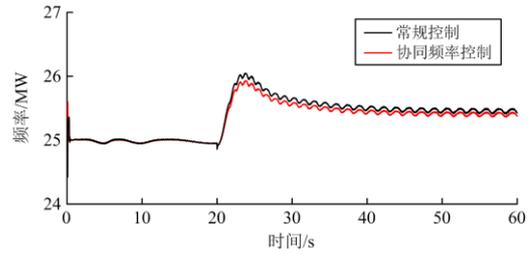


图 13 DFIG1 出力曲线

Fig. 13 DFIG1 active power curve

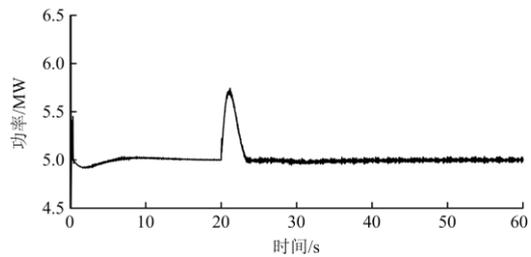


图 14 储能出力曲线

Fig. 14 Energy storage active power curve

### 2) 场景 B

在本场景中，发电机 G5(节点 8 处)因故障退出电网，此时所发生的功率扰动比场景 A 更大。仿真中各智能体分享全局关键信息的过程大概耗时 0.255 s。此次功率缺额下，系统所需要的 DFIG 一次调频参数为 37 左右。协同频率控制流程与场景 A 一致。仿真得到频率响应曲线与 DFIG 出力曲线分别如图 15 和图 16 所示，各电池储能出力曲线如图 17 所示。

从图 17 可以看出，储能输出最大支撑功率为 1.2 MW 左右。在图 16 中，因为常规控制中各个 DFIG 的控制参数均一致，减载率较小的 DFIG 已经达到有功备用上限，最大支撑功率需要接近 2 MW，已经超过 1.6 MW，在频率偏差最大的几秒钟内无法按照要

求提供相应的功率支撑。但是其他减载率较高的 DFIG 还有部分有功备用, 没有充分利用所有 DFIG 的有功备用。而采用协同控制分配各 DFIG 输出功率大小, 减载率小的 DFIG 最大输出功率为 1.5 MW, 并未超过有功备用上限。

从图 15 可以看出, 没有风储设备参与调频, 系统频率跌落最低点达到 49.6 Hz 左右, 频率过低造成系统处在较为危险的区域, 随着加入惯量响应功率支撑和一次调频功率支撑, 频率响应逐步优化。当系统承受更大的功率扰动时, 对于 DFIG 参与一次调频的需求更大, 因此各 DFIG 的控制参数相应增大。由于常规控制并没有增发足够的一次调频支撑功率, 所以在频率响应曲线上效果要比协同频率控制差。

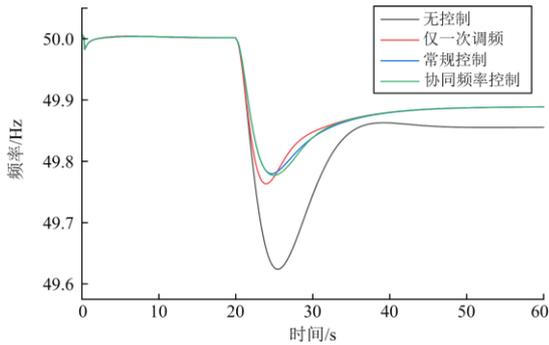


图 15 频率响应曲线

Fig. 15 Frequency response curve

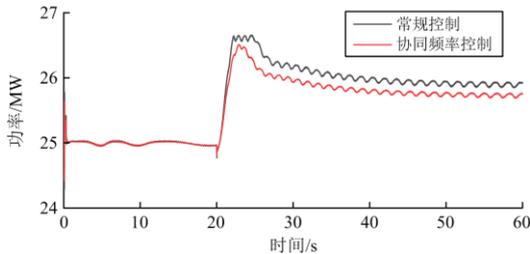


图 16 DFIG1 出力曲线

Fig. 16 DFIG1 active power curve

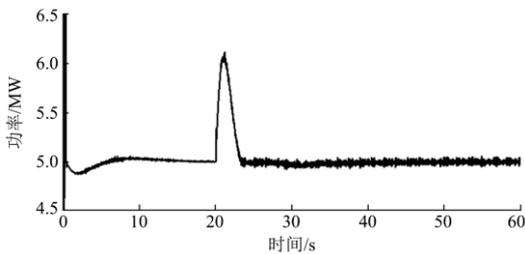


图 17 储能出力曲线

Fig. 17 Energy storage active power curve

比较场景 A 与场景 B 可以看出, 各智能体通过控制风储设备参与频率稳定控制能够很好地改善频

率响应曲线, 满足频率稳定要求。并且与常规控制相比, 协同频率控制能够根据 DFIG 不同运行工况合理分配输出功率大小, 更有效地改善了频率响应曲线。

## 5 结论

本文提出了一种基于 MAS 的分布式风储协同频率控制策略, 并进行了仿真验证, 结论如下:

1) 提出的分布式协同频率控制策略可以避免集中控制带来的弊端, 能够在系统发生故障时通过各智能体快速且有效地控制相应风储设备参与频率稳定控制。

2) 提出的 DFIG 分布式控制参数整定方法实现了 DFIG 与同步发电机之间的有功备用经济分配, 并能在频率扰动发生时有效整定控制参数, 根据不同运行工况合理分配支撑功率大小。

3) 仿真结果表明发生功率缺额时, 各智能体可以通过协同控制风储设备使系统满足惯量响应和一次调频的要求, 实现频率稳定。

## 附录 A

本文采用的信息交互权重确定方式稳定性证明如下:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - \varepsilon \sum_{j=1}^n l_{ij} \times x_j^{(k)}, i=1,2,L,n$$

采用矩阵形式表达为

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - \varepsilon \mathbf{L} \times \mathbf{X}^{(k)} = (\mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L}) \mathbf{X}^{(k)} = \mathbf{P} \mathbf{X}^{(k)}$$

式中,  $\mathbf{X}$  矩阵的各元素即网络中各个智能体之间对应的交换信息。

为了进行稳定性分析, Lyapunov 正定函数定义如下:

$$\mathbf{V}^{[k]} = (\mathbf{X}^{[k]})^T \mathbf{X}^{[k]}$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{V}^{[k+1]} - \mathbf{V}^{[k]} = [(\mathbf{X}^{[k]})^T (\mathbf{P}^T \mathbf{P} - \mathbf{I}) \mathbf{X}^{[k]}] \leq$$

$$- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ (p_{ij} + p_{ij}^2) (x_j^{[k]} - x_i^{[k]})^2 \right] +$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ (n_i + n_j - 2) p_{ij}^2 (x_j^{[k]} - x_i^{[k]})^2 \right\} \leq$$

$$- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{2 - (n_i + n_j) p_{ij}}{2} \right) p_{ij} (x_j^{[k]} - x_i^{[k]})^2 \right] \leq$$

$$- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\varepsilon (1 - \varepsilon)}{n_i + n_j} (x_j^{[k]} - x_i^{[k]})^2 \right]$$

其中设置参数  $\theta$  根据计算步长  $\varepsilon$  满足下式:

$$0 < \frac{\varepsilon}{\theta} < 1$$

本文设置  $\varepsilon / \theta$  接近于 1, 则有:

$$\Delta V \leq 0$$

因此可以证明所提权重确定方式的稳定性。

表 A1 电网各 DFIG 出力机组成本函数参数

Table A1 Cost function parameters of each DFIG's generating unit of power system

配置参数	DFIG1	DFIG2	DFIG3	DFIG4
系数	0.125,0.1	0.105,0.12	0.135,0.14	0.115,0.16
出力上限	2.5	2.5	2.5	2.5
出力下限	0	0	0	0

表 A2 电网各同步机出力机组成本函数参数

Table A2 Cost function parameters of each synchronous generator's generating unit of power system

配置参数	G1	G2	G3	G4	G5
系数	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
出力上限	10	10	10	10	10
出力下限	0	0	0	0	0

## 参考文献

- [1] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.  
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [2] 杨蕾, 王智超, 周鑫, 等. 大规模双馈风电机组并网频率稳定控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 186-194.  
YANG Lei, WANG Zhichao, ZHOU Xin, et al. Frequency stability control strategy for large-scale grid connections with DFIG units[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 186-194.
- [3] 肖友强, 林晓煌, 文云峰. 直流和新能源高渗透型电网惯性水平多维度评估[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 19-27.  
XIAO Youqiang, LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng. Multi-dimensional assessment of the inertia level of power systems with high penetration of HVDCs and renewables[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 19-27.
- [4] 邹京希, 秦汉, 刘东, 等. 考虑频率约束下提升风储联合发电系统可靠性的储能系统控制策略[J]. 供用电, 2020, 37(2): 73-78.  
ZOU Jingxi, QIN Han, LIU Dong, et al. Energy storage system control strategy for improving the reliability of an integrated power generation system of wind and energy storage unit under frequency constraint[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 73-78.
- [5] 皇甫成, 邱婷, 梁吉, 等. 一种考虑电力系统频率安全的新能源并网限值评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 85-90, 98.  
HUANGFU Cheng, QIU Ting, LIANG Ji, et al. A sustainable energy penetration limit evaluation method considering power system frequency security[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 85-90, 98.
- [6] 游广增, 杭志, 陈凯, 等. 基于改进粒子群算法的风机频率控制研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 43-50.  
YOU Guangzeng, HANG Zhi, CHEN Kai, et al. Wind turbine generator frequency control based on improved particle swarm optimization[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 43-50.
- [7] 郭小龙, 刘方蕾, 胥国毅, 等. 风电机组参与调频的虚拟惯量控制与快速频率控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 1-7.  
GUO Xiaolong, LIU Fanglei, XU Guoyi, et al. Virtual inertia control and fast frequency control of wind turbine participating in frequency regulation[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 1-7.
- [8] PAPADOPOULOS P N, GUO T, MILANOVIC J V. Probabilistic framework for online identification of dynamic behavior of power systems with renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 45-54.
- [9] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [10] ATTYA A B, DOMINGUEZ-GARCIA J L, ANAYA-LARA O. A review on frequency support provision by wind power plants: current and future challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2071-2087.
- [11] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.  
YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [12] DE ALMEIDA R G, PEAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [13] 梁恺, 彭晓涛, 秦世耀, 等. 基于协同控制优化风储系

- 统频率响应的策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2628-2641.
- LIANG Kai, PENG Xiaotao, QIN Shiyao, et al. Study on synergetic control strategy for optimizing frequency response of wind farm augmented with energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2628-2641.
- [14] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-3822.
- ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3815-3822.
- [15] WILCHES-BERNAL F, CHOW J H, SANCHEZ-GASCA J J. A fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1496-1505.
- [16] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2385-2391.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [17] ZHANG Z S, SUN Y Z, LIN J, et al. Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator based wind power plants[J]. IET Transactions on Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 38-47.
- [18] 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.
- [19] 阮博, 俞德华, 李斯吾. 基于一致性的微网分布式能量管理调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 23-28.
- RUAN Bo, YU Dehua, LI Siwu. Consensus algorithm based distributed energy management strategy of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 23-28.
- [20] XU Y, YANG Z, GU W, et al. Robust real-time distributed optimal control based energy management in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1568-1579.
- [21] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
- ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Zi'ang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [22] 王召健, 陈来军, 刘锋, 等. 考虑可控负荷调节能力的多微电网分布式频率控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 47-52, 66.
- WANG Zhaojian, CHEN Laijun, LIU Feng, et al. Distributed frequency control of multi-microgrids with regulation capacity constraints of controllable loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 47-52, 66.
- [23] SIMPSON-PORCO J W, SHAFIEE Q, DORFLER F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.
- [24] LIU W, GU W, SHENG W, et al. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 446-456.
- [25] LI Q, CHEN F, CHEN M, et al. Agent-based decentralized control method for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 637-649.
- [26] LIU W, GU W, SHENG W, et al. Pinning-based distributed cooperative control for autonomous microgrids under uncertain communication topologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1320-1329.
- [27] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(一): 基于一致性理论的分布式协调控制系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2841-2848, 3135.
- XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of AND (part I): consensus based distributed coordination system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2841-2848, 3135.
- [28] LEWIS F L, ZHANG H, HENGSTER-MOVRIC K, et al. Cooperative control of multi-agent systems[M]. London: Springer, 2014.
- [29] 张丽丽. 基于虚拟同步发电机的风储协调控制方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
- ZHANG Lili. Research on coordinated control method of wind power and energy storage based on virtual synchronous generator[D]. Jilin: Northeast Power Electric University, 2020.

- [30] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(二): 考虑非理想遥测环境的一致性算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3244-3254.  
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of ADN (part II): consensus algorithm considering non-ideal telemetering network: consensus based distributed coordination system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3244-3254.
- [31] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.  
DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8.
- [32] 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(3): 807-815.  
QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering second frequency drop[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 807-815.
- [33] 王凡, 李海峰, 胥国毅, 等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 1-8.  
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.
- [34] 付艳阳. 复杂电力系统频率态势感知基础模型及其控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
FU Yanyang. Research on basic model and control strategy of frequency situation awareness in complex power system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [35] NGUYEN H T, YANG Guangya, NIELSEN A H, et al. Combination of synchronous condenser and synthetic inertia for frequency stability enhancement in low-inertia systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(3): 997-1005.
- [36] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.  
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [37] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.  
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.
- [38] 叶杭治, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(12): 1321-1328.  
YE Hangye, PAN Donghao. Dynamic analysis of variable speed and pitch controlled wind turbines[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(12): 1321-1328.
- [39] 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电: GB/T19963.1—2021[S].

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2022-03-11

作者简介:

徐波(1981—), 男, 博士, 硕士生导师, 从事新能源并网分析与控制研究; E-mail: xubo@shiep.edu.cn

俞向栋(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网频率稳定控制。E-mail: yuxiangdongnb@163.com

(编辑 魏小丽)