



用于风电功率平抑的飞轮储能阵列功率协调控制策略

陈玉龙, 武 鑫, 滕 伟, 柳亦兵

(华北电力大学先进飞轮储能技术研究中心, 北京 102206)

摘 要: 风电输出功率存在随机性和波动性的问题, 使得电网调频难度加大。采用飞轮储能匹配风电的形式可以减小其功率波动, 提高并网能力。以交流母线并联的飞轮储能阵列研究对象, 首先针对现有功率分配策略中存在的问题, 提出一种考虑功率分配上限和能使各单元荷电状态(SOC)趋于一致的功率协调控制策略。同时为保证功率控制精度和储能系统的响应速度, 采用对储能阵列进行分层分组控制的方法。然后建立了飞轮储能单元功率跟随控制模型和飞轮储能阵列功率控制模型, 并通过一组飞轮储能单元的充放电仿真验证了所提协调控制策略的可行性和优势。最后基于飞轮储能实时补偿风电功率中高频成分的方法来平滑风电输出功率的波动。采用 2 MW 的飞轮储能阵列匹配 10 MW 风电, 其中 2 MW 飞轮储能阵列由 8 台 250 kW/50 (kW·h) 飞轮储能单元组成, 10 MW 风电由 5 台 2 MW 风电机组组成。飞轮储能阵列采用仿真模型, 风电输出功率采用 200 min 的实测运行机组的数据。仿真结果验证了所提出的控制策略和分层分组控制方法的有效性, 也表明了飞轮储能匹配风电可以显著降低风电功率的波动量, 且能满足国家相关标准(GB/T 19963—2011)的要求。

关键词: 风电功率平抑; 飞轮储能阵列; 功率协调控制策略

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0421

中图分类号: TK 89

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 02-600-09

Power coordinated control strategy of flywheel energy storage array for wind power smoothing

CHEN Yulong, WU Xin, TENG Wei, LIU Yibing

(Advanced Flywheel Energy Storage Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Wind energy output often shows randomness and fluctuation, making it difficult to adjust the frequency of the power grid. In this study, wind energy is smoothed by flywheel energy storage to reduce its power fluctuation and improve its grid-connection ability. First, a power coordinated control method is proposed to ensure that the power value allocated to each unit does not exceed its rated power and that the state of charge (SOC) of each unit converges to the same value. Simultaneously, the layered and grouped control method for the energy storage array is adopted to ensure the accuracy of power regulation and the energy storage system's response speed. Then, we develop a power-following control model for the flywheel energy storage unit and a power-following control model for the flywheel energy storage array. The feasibility and superiority of the proposed coordinated control technique are verified through charge and discharge simulations of a group of flywheel energy storage units. Finally, a flywheel energy storage array is used to compensate for the high frequency

收稿日期: 2021-08-13; 修改稿日期: 2021-09-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0805905)。

第一作者: 陈玉龙 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞轮

储能系统充放电控制, E-mail: longyizhixin@163.com; 通讯作者: 武鑫, 副教授, 主要研究方向为储能系统和发电系统建模、控制, E-mail: wuxin@ncepu.edu.cn。

components of wind energy in real time, thereby smoothing out wind energy output power fluctuations. The 2 MW flywheel energy storage array is used to supplement 10 MW wind energy. The 2 MW flywheel energy storage array is composed of eight 250 kW/50 kW·h flywheel energy storage units, whereas the 10 MW wind energy system is composed of five 2 MW wind turbines. Finally, the flywheel energy storage is used to compensate for the high frequency components of wind energy in real time, thereby smoothing out the fluctuation in wind energy output power. The 2 MW flywheel energy storage array is used to supplement the wind farm's 10 MW capacity. The 2 MW flywheel energy storage array is composed of eight 250 kW/50 (kW·h) flywheel energy storage units, whereas the 10 MW wind energy system is composed of five 2 MW wind turbines. The flywheel energy storage array is modeled using simulation software, and the simulation data for 200 min of wind generation is used. The simulations verify the feasibility of the proposed control strategy and hierarchical grouping control method, as well as the fact that flywheel energy storage matched to wind energy can significantly reduce the fluctuation of wind power and satisfy the requirements of the national standards (GB/T 19963—2011).

Key words: wind power smoothing; flywheel energy storage array; power coordinated control strategy

近年来随着风力发电规模越来越大,渗透率越来越高,对电网灵活性提出了更高的要求^[1-2]。一方面,风力发电受自身特性约束,具有波动性、随机性、间歇性和反调节性等问题,大规模并入电网会影响电网中用电和发电的平衡,从而影响电网的稳定性^[3-4]。另一方面,我国主要以火电机组作为调频电源^[5],其参与电网调频时本身就存在动态特性差、爬坡速率低、响应时滞长、损耗大等问题^[6],加之风电本身的随机性和波动性问题,使系统调频难度进一步增大。从中长期发展来看,我国仍然需要在新能源电力系统灵活性建设方向上开展技术创新工作^[2]。

针对上述问题,国家已有众多相关标准和政策出台,一方面对风电场的建设和运行进行严格要求,来增强风电自身功率的可控性;另一方面鼓励风电场配套储能,鼓励多能互补。国家发展改革委和国家能源局^[7]在2021年7月联合发布的文件提出:我国到2025年,要实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变,同时显著提高新型储能技术创新能力,装机规模达3000万千瓦以上,并且加快飞轮储能、钠离子电池等技术开展规模化试验示范,使新型储能成为能源领域达成碳达峰碳中和目标的关键支撑技术之一。

近年来国内外发展迅速的一种储能形式是电化

学储能,已有众多的示范电站,但是其存在燃烧和爆炸风险,对温度敏感、循环寿命相对较短和废旧回收等问题^[8]。国内飞轮储能的示范应用也在逐步推进^[9]。飞轮储能技术以其快速响应性和高功率密度的特点在辅助火电机组调频^[10-11]和提高新能源消纳^[12]等领域得到广泛的研究和应用。在平滑风电输出^[13]、提高风电场的一次调频能力^[14]等方面具有优势。

由于研制单台大功率大容量的飞轮储能单元不仅成本高,而且还可能受到技术条件的限制。因此常把多个飞轮储能单元并联,组成飞轮储能阵列来提高整个飞轮储能系统的功率和储能容量。在飞轮储能阵列中,由于各个储能单元的运行状态会有差别,甚至参数不同,需要对阵列进行协调控制,其目的在于:保证各单元充放电状态同步,即所有单元同时充电或同时放电;保持各单元荷电状态(SOC)值一致,即所有单元能同时充满电和同时放完电;确保阵列内部每个单元的功率跟随控制都能正常运行。

飞轮阵列的协调控制主要通过功率分配来实现。唐西胜等^[15]对比分析了飞轮阵列放电时的3种功率分配策略。金辰晖等^[16]对功率分配策略中SOC变化率进行了深入的对比分析。王磊等^[17]对用于平滑风力发电系统输出的飞轮储能阵列采用主从控制

模式,根据各储能单元可用电量按比例进行放电功率分配。曹倩等^[18]采用基于多智能体技术的一致性分布式算法进行功率分配。郭伟等^[19]针对风储微电网,将飞轮储能阵列作为能量缓冲环节,采用“能者多劳”的功率分配原则来实现风电计划出力的实时跟踪。Shi等^[20]基于等微增率准则,提出了飞轮储能阵列的充放电协同控制方法。

上述功率分配策略概括起来可以分为两类:等功率分配和按比例分配。其中等功率分配最简单,但不能协调各单元的SOC值,各单元的SOC值差距会随着运行时间的增加而增大。按比例分配可以有效地协调各单元SOC值,当各单元SOC值存在差距时,随着运行时间的增加其差距可以持续减小,但是其分配给内部单元的参考功率可能会超出单元额定功率范围,从而产生功率误差等问题。因此,本工作提出了一种考虑各储能单元功率上限和SOC一致性约束的功率协调控制策略,然后建立飞轮储能单元功率跟随控制模型和飞轮储能阵列功率控制模型,最后在风电输出功率平滑的场景中进

行仿真验证。

1 飞轮储能阵列控制原理

飞轮储能技术是集高强度材料及其制造技术、大功率电力电子器件及其控制技术、磁悬浮轴承技术、转子动力学和大功率高速双向电动发电机等技术为一体的储能技术^[21]。其在充电时,通过电力电子装置驱动飞轮转子加速旋转,将电能储存为飞轮转子的旋转动能;放电时通过电力电子装置驱动飞轮转子进行制动减速,飞轮转子的动能经过回馈制动转换为电能,再通过电力电子装置将电能输送给电网或负载,从而实现系统的充电和放电。

整个飞轮储能阵列的控制目标是实现对所给参考充放电功率的跟随,其中阵列功率协调控制把总的参考功率值实时地分配给每一个飞轮储能单元,每个单元对所给功率进行跟随控制,从而实现整个阵列的功率跟随控制。飞轮储能阵列整体的控制策略如图1所示。

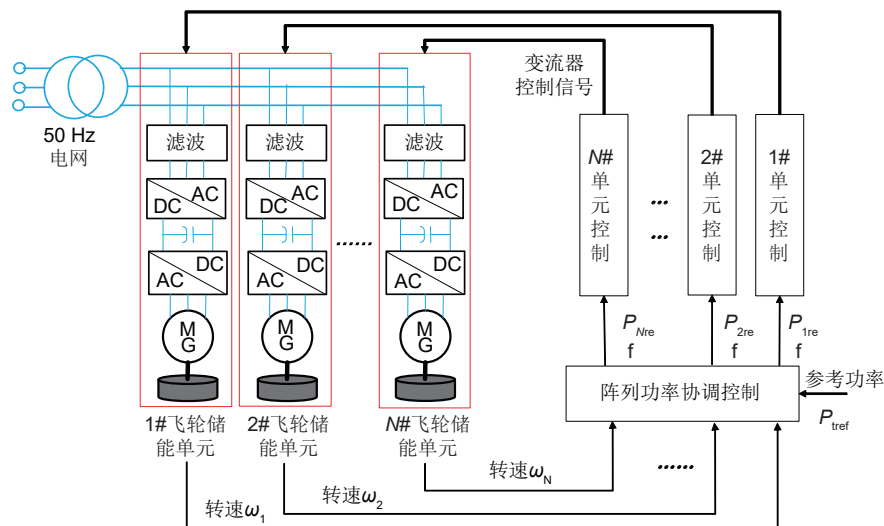


图1 飞轮储能阵列整体的功率控制策略

Fig. 1 The overall power control strategy of the flywheel energy storage array

飞轮储能阵列的功率分配策略的主要任务是实时计算各单元的功率分配比例系数 $k_1 \sim k_N$ 的值,且满足

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1, \text{ 且 } 0 \leq k_i \leq 1 \quad (1)$$

采用等功率分配时所有单元的分配比例系数都为 $1/N$,所有单元分到的参考功率都相等。按比例分配时,根据各单元的转速或电量进行有比例的分

配,其分配比例系数与各单元转速或电量有关。

2 飞轮储能阵列功率协调控制策略

2.1 两种按比例功率分配策略介绍

(1) 按电量比例分配策略:按电量比例分配的策略是等时间分配,其遵循的原则是无论此时每个单元的电量是多少,持续充电时要让所有单元能同

时充满,持续放电时所有单元能同时放完电。可以描述为

$$\begin{cases} t_t = \frac{\sum E_i}{P_{\text{tref}}} \\ P_{i\text{ref}} = \frac{E_i}{t_t} = \frac{E_i}{\sum E_i} P_{\text{tref}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_t 表示系统在当前参考功率下可持续运行的总时间; E_i 在充/放电时表示当前第 i 个单元剩余可充/放电量; P_{tref} 为阵列总参考功率; $P_{i\text{ref}}$ 为分配给第 i 个单元的参考功率。对于储能系统的功率,定义其值为正表示充电,其值为负表示放电。

等时间分配中,分配系数为

$$k_i = \frac{E_i}{\sum E_i} \quad (3)$$

(2) 按转速比例分配策略:按转速比例分配与郭伟等^[19]提出的‘能者多劳’分配策略类似,其遵循的原则是充电时,转速越低的飞轮储能单元分得的功率越多,转速越高的分得的越少,放电时相反。按转速比例分配的分配系数为

$$k_i = \frac{f(\omega_i)}{g(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)} = \begin{cases} \frac{\omega_i^{-1}}{\sum_{n=1}^N \omega_n^{-1}}, P_{\text{tref}} \geq 0 \\ \frac{\omega_i}{\sum_{n=1}^N \omega_n}, P_{\text{tref}} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

上述两种比例分配策略都可使阵列中各单元的SOC值趋于一致,上面只列出了电量和转速取一次幂时的分配系数形式,还可以取高次幂形式,使SOC趋近的速度加快。

如按转速比例分配时取

$$k_i = \begin{cases} \frac{\omega_i^x}{\sum_{n=1}^N \omega_n^x}, P_{\text{tref}} \geq 0 \\ \frac{\omega_i^{-x}}{\sum_{n=1}^N \omega_n^{-x}}, P_{\text{tref}} < 0 \end{cases} \quad (x = 2, 3, \dots) \quad (5)$$

按电量比例分配时,分配系数为

$$k_i = \frac{E_i^x}{\sum_{n=1}^N E_n^x} \quad (x = 2, 3, \dots) \quad (6)$$

2.2 功率协调控制策略

比例分配时会出现内部单元分配到的参考功率超过其额定功率的问题。例如,当飞轮储能阵列的参考功率为系统额定功率时,此时应使每个单元都以额定功率运行,即采用等功率分配,才能使整个阵列达到额定功率。而此时若采用比例分配,会出现某些单元所分到的功率已超过其额定功率的情况,那么实际输出功率将小于参考功率。而且这种情况在阵列参考功率较大和各单元电量差距较大时经常发生。

在等时间分配的基础上,考虑各储能单元功率上限和SOC一致性的约束,增加对每个单元分配值与额定功率之间大小的判断,然后对功率超出额定的部分进行再分配,从而保证阵列的输出功率稳定。改进的等时间功率分配策略如图2所示。

如图2所示的分配策略中,排序过程要消耗一定时间,而且阵列中单元数量越多,排序完成所消耗的时间越长,进而要求阵列控制策略的采样时间间隔足够长,才能保证整个分配和控制正常运行。但是控制采样时间间隔越大时,实际功率控制精度越低,控制效果越差。因此需要减少图3所示的分

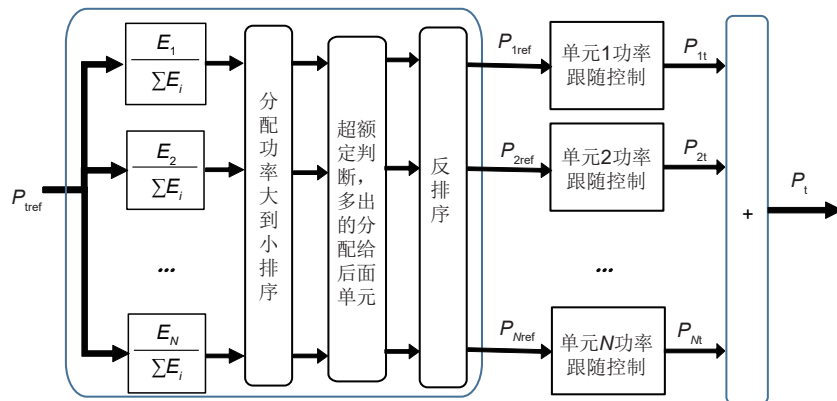


图2 改进的等时间功率分配策略

Fig. 2 Improved equal time power allocation strategy

配策略中排序所消耗时间。可以采用两层的分配策略, 先把所有单元分为 M 组, 采用改进的等时间功

率分配方法; 然后每组内再按比例分配功率, 进而得到飞轮储能阵列功率协调控制策略(图3)。

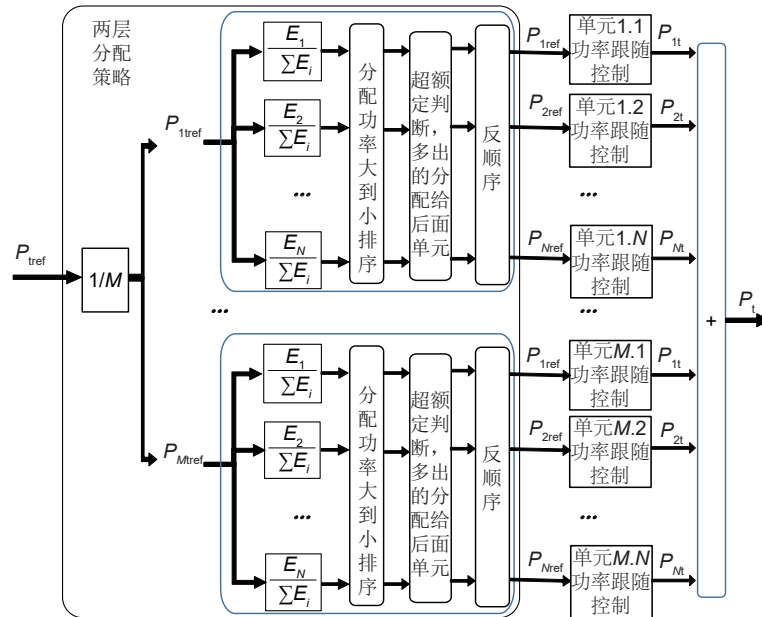


图3 飞轮储能阵列功率协调控制策略

Fig. 3 Flywheel energy storage array power coordinated control strategy

3 仿真实验

3.1 飞轮阵列功率协调控制策略验证

采用4台某公司250 kW/50 kW·h的飞轮储能单元为一组组成阵列, 仿真验证所提策略在功率分配和控制中的优势。其中飞轮储能单元的参数如表1所示, 其转速和SOC之间的关系如式(7)所示。飞轮储能没有过充和过放电问题, 可以完全充满电, 也可完全放完电, 不影响自身性能, 即可工作在SOC为0~100%的整个区间内。

表1 飞轮储能单元参数

Table 1 The flywheel energy storage unit parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_0/kW	250	额定转速 $n_{\text{base}}/(\text{r/min})$	3600
额定电压 U/V	380	额定频率 $F1_{\text{base}}/\text{Hz}$	120
最低运行转速 $n_{\text{min}}/(\text{r/min})$	3600	电机极对数 n_p	2
最高运行转速 $n_{\text{max}}/(\text{r/min})$	11500	额定转矩 $T_{e_{\text{base}}}/\text{Nm}$	663
储能量 $E_f/(\text{kW}\cdot\text{h})$	50	转子总转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	250

$$\text{SOC}_i = \frac{E_i}{E_n} \times 100\% = \frac{\omega_i^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \times 100\% = \frac{n_i^2 - n_{\min}^2}{n_{\max}^2 - n_{\min}^2} \times 100\% \quad (7)$$

设定4个单元起始的SOC分别为0.4、0.6、0.8和0.2, 对此阵列进行1 min满功率(1 MW)放电, 接着1 min满功率充电, 再1 min从满功率充电逐渐降功率到0, 最后1 min从功率为0逐渐升功率为满功率放电, 仿真结果如图4所示。其中本文所提功率协调控制策略在满功率充电和放电以及较大功率充电和放电时, 4个单元所分配到的功率都不超过其额定值。对于比例分配策略, 可以看出在放电功率较大时, 单元2和3分到的功率超过了其额定值, 充电功率较大时, 单元1和4分到的功率超过了其额定值。但实际在单元控制环节中, 单元的输出功率并不能跟随超额定的值, 这最终造成整个阵列的功率控制出现误差甚至失效。当所有单元保持相同的状态时, 等功率分配最简单有效, 但在实际阵列系统中, 单元之间不可避免地存在微小差别, 在长期运行中各单元的SOC差距会越来越大, 最终将导致控制失效。而提出的功率协调控制策略能使各单元SOC值趋于一致, 如图5所示。

3.2 飞轮储能阵列平抑风电功率波动

由于风电功率本身波动大, 对风电场配储能来进行功率平滑时应首先考虑配功率型的储能, 即功率大而容量相对较小的储能系统。因此, 本工作

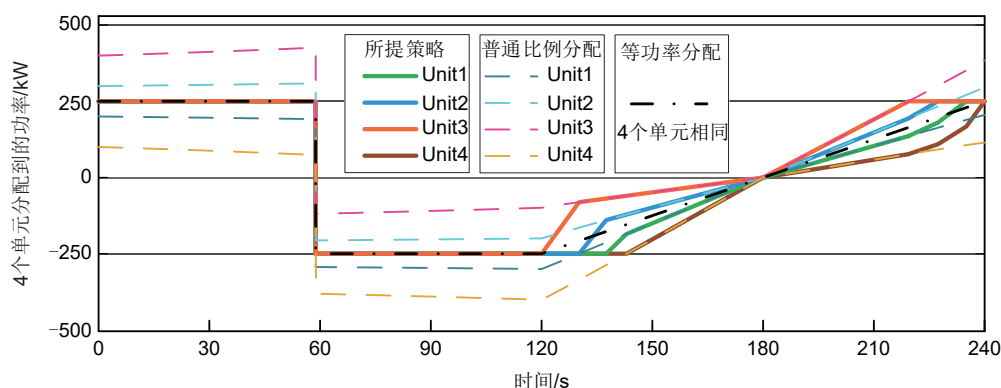


图4 3种策略的功率分配情况对比

Fig. 4 Comparison of three power allocation strategies

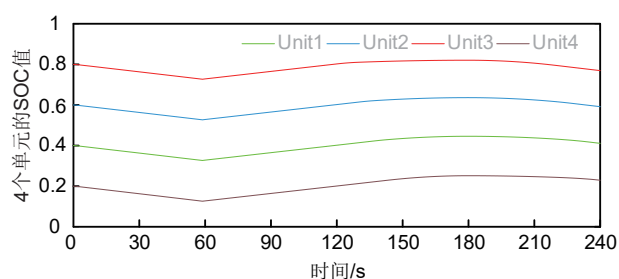


图5 4个飞轮储能单元的SOC变化曲线

Fig. 5 SOC curve of 4 flywheel energy storage units

采用集中接入的方式为风电场配置20%额定装机容量的飞轮储能系统。此飞轮储能系统通过交流母

线并联的方式接入风电场。飞轮储能系统接入和控制原理如图6所示。用8台250 kW/50 kW·h的飞轮储能单元组成阵列匹配5台2 MW风电机组组成的10 MW风电场，采用风电机组的实测输出功率数据作为风电系统输出功率，在Matlab/Simulink平台建立模型，其中建立的飞轮储能单元控制模型如图7所示，8台飞轮储能单元4台为一组，分为两层两组。按所提的功率协调控制策略，建立飞轮储能阵列功率控制模型。针对200 min内风电输出功率进行平滑仿真，结果如图8所示，平滑后的风电输出中的快速波动显著降低。

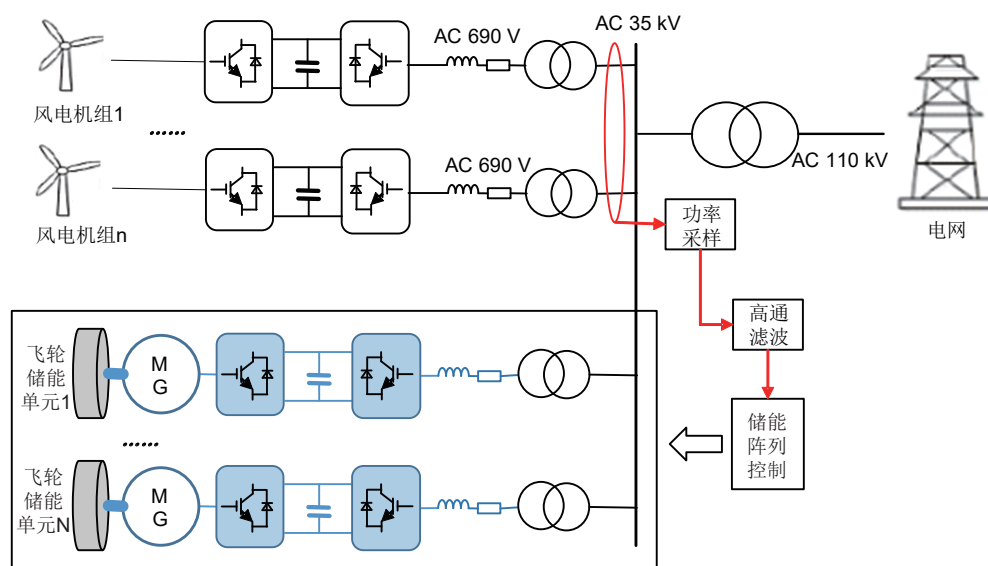


图6 飞轮储能平滑风电输出功率的原理图

Fig. 6 Schematic diagram of flywheel energy storage smoothing wind power output

风电场输出功率在平滑前后的1 min和10 min内波动量如图9和图10所示。考虑风电场的装机容量多数在30~150 MW之间，根据国家标准：标准

风电场接入电力系统技术规定(GB/T 19963—2011)

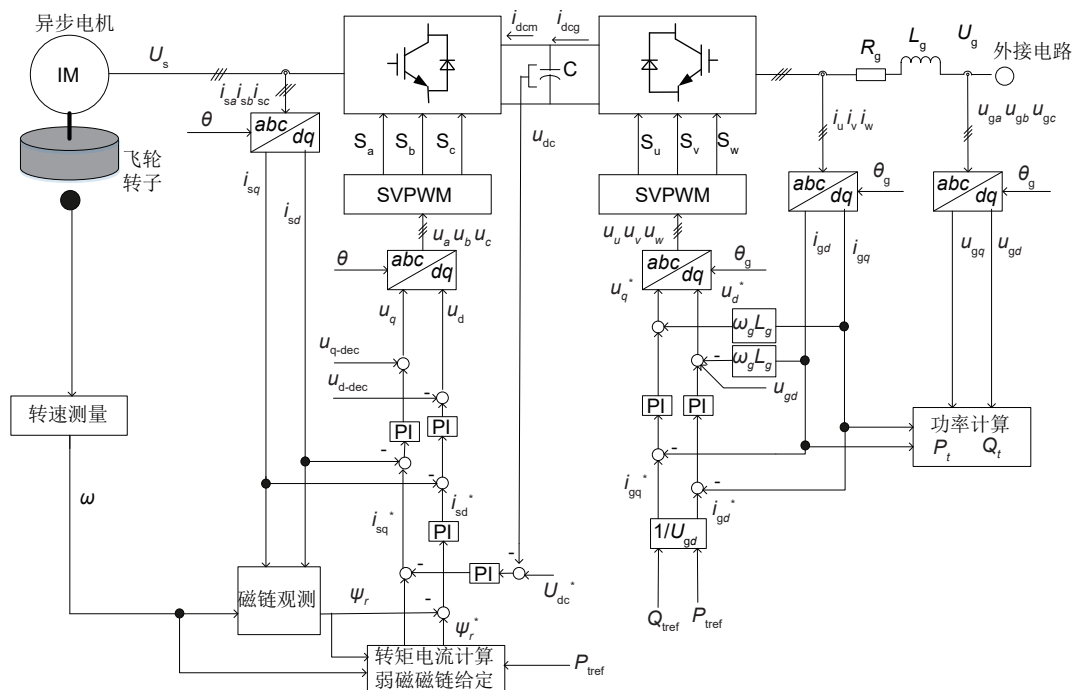


图7 飞轮储能单元功率控制模型

Fig. 7 Flywheel energy storage unit power control model

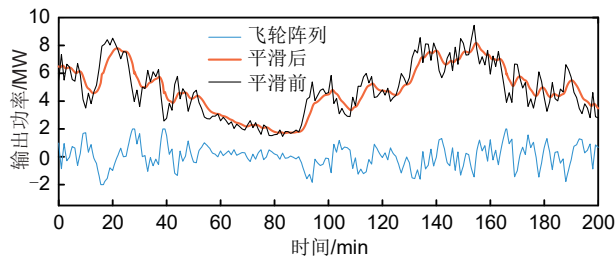


图8 平滑前后的风电输出功率对比图

Fig. 8 Comparison of wind power output power before and after smoothing

的要求, 风电输出功率在 1 min 和 10 min 内的波动量上限分别取额定功率的 1/10 和 1/3, 即此处对应的功率变化上限分别为 1 MW 和 3.33 MW。由图 9 和图 10 可得, 平滑后风电输出功率的波动量显著降低, 并满足了国家标准要求。

8 个飞轮储能单元在运行过程中的 SOC 变化曲线如图 11 所示, 其中设置两组共 8 个单元的初始 SOC 各不相同, 图中虚线为第一组 4 个单元的曲线, 实线为第二组。初始 5 min 的 SOC 放大在右侧。从图中可以看出随着运行时间的持续, 8 个单元的 SOC 逐渐趋于一致。同时整个阵列的功率能快速跟随给定值, 验证了提出的飞轮储能阵列功率协调分配策略的有效性。

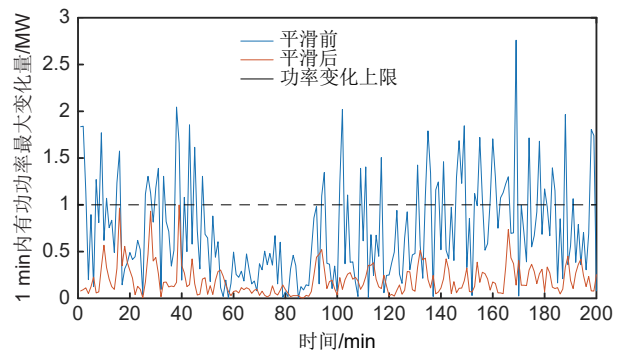


图9 1 min内风电输出功率平滑前后波动量

Fig. 9 The fluctuation of wind power output in 1 min before and after smoothing

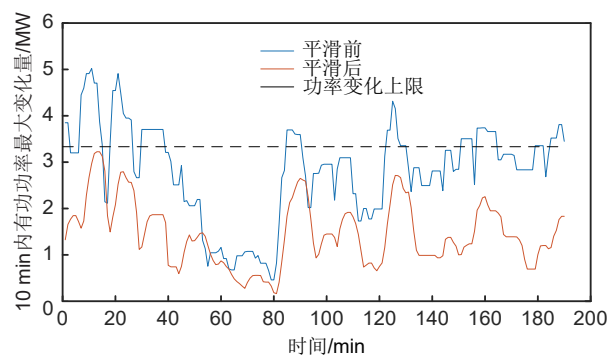


图10 10 min内风电输出功率平滑前后波动量

Fig. 10 The fluctuation of wind power output in 10 min before and after smoothing

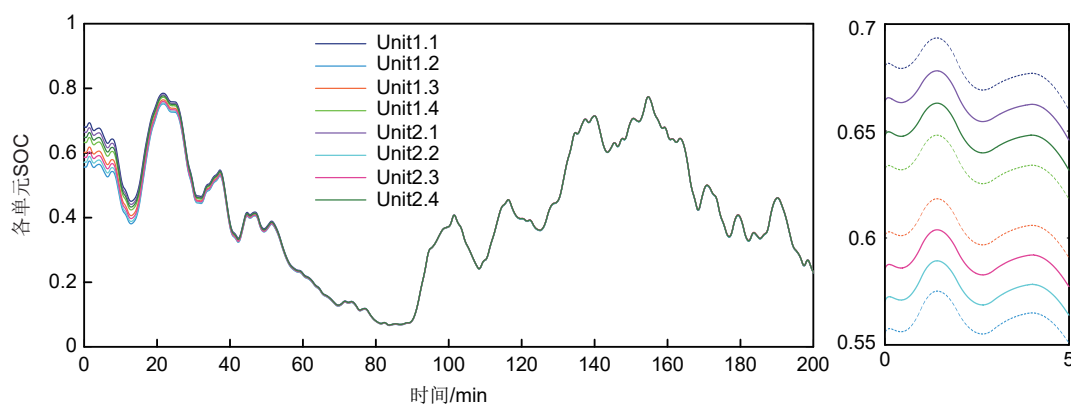


图11 8个飞轮储能单元转子的SOC曲线
Fig. 11 SOC of eight flywheel energy storage units

4 结 论

(1) 采用飞轮储能阵列通过交流母线并联接入到风电场的形式来平滑风电输出功率的波动，深入分析了飞轮储能阵列的功率控制方法。

(2) 现有比例分配策略存在分配功率值会超额定值的问题，等功率分配存在不能使SOC趋于一致的问题。基于此提出了改进的功率协调控制策略，不仅考虑了单元分配功率上限约束，保证了功率控制的稳定，实现各单元SOC值逐渐趋于一致，同时采用分层分组的方法确保了功率控制精度和响应速度。

(3) 通过仿真实验，验证了所提飞轮储能阵列功率协调控制策略的优势，同时验证了其对风电输出功率进行平滑的有效性。能显著降低风电输出的波动量，满足国家标准(GB/T 19963—2011)要求。

符 号 说 明

E_i	储能阵列中第 <i>i</i> 个单元的剩余可充电量或剩余可放电量, J
E_n	飞轮储能单元额定储能量, kW·h
E_t	飞轮储能单元实时的剩余可放电量, J
F_{1_base}	飞轮电机额定频率, Hz
J	飞轮转子的总转动惯量, kg·m ²
k_i	功率分配时, 第 <i>i</i> 个单元分到的功率在总分配功率中的占比系数(取0~1), 1
n_p	飞轮电机极对数
n_{base}	飞轮电机的额定转速, r/min
n_{max}	飞轮转子充放电过程中最高运行转速, r/min
n_{min}	飞轮转子充放电过程中最低运行转速, r/min
N	飞轮储能阵列中总单元数, 或飞轮储能阵列

分组中总单元数(取1, 2, 3...)

P_0	飞轮储能单元额定功率, kW
P_{iref}	控制过程中第 <i>i</i> 个单元分配到的参考功率, W
P_{it}	控制过程中第 <i>i</i> 个单元的实际充放电功率, W
P_{itref}	分组分层控制时, 控制过程中第 <i>i</i> 个飞轮组分到的总参考功率, W
P_t	飞轮储能阵列实际总充放电功率, W
P_{tref}	控制过程中飞轮储能阵列总的参考功率, W
SOC_t	飞轮储能单元运行中实时的剩余可放电量在额定储能量中的占比
t_t	当前参考功率下可持续充电或放电的总时间, s
Te_{base}	飞轮电机的额定转矩, N·m
U	飞轮电机额定电压, V
ω_{max}	飞轮转子充放电过程中最高运行转速, rad/s
ω_{min}	飞轮转子充放电过程中最低运行转速, rad/s
ω_t	飞轮转子运行中的实时转速, rad/s

参 考 文 献

- [1] REMON D, CAÑIZARES C A, RODRIGUEZ P. Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(11): 2958-2964.
- [2] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
ZHAO D Y, HU N, FU J, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [3] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Y S, LEI X, XUE F, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [4] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].

- 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [5] 丁冬, 杨水丽, 李建林, 等. 辅助火电机组参与电网调频的 BESS 容量配置[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4): 302-307.
- DING D, YANG S L, LI J L, et al. Capacity configuration of battery energy storage as an alternative to thermal power units for frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4): 302-307.
- [6] 李飞. 储能系统辅助火电机组调频的建模及控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- LI F. Research on the modeling and control strategy of energy storage system in thermal power unit frequency regulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. (2021-07-23) [2021-09-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321_ext.html.
- [8] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- ZHANG W L, QIU M, LAI X K. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [9] 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 765-782.
- DAI X J, WEI K P, ZHANG X Z, et al. A review on flywheel energy storage technology in fifty years[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 765-782.
- [10] 张兴, 阮鹏, 张柳丽, 等. 飞轮储能在华中区域火电调频中的应用分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1694-1700.
- ZHANG X, RUAN P, ZHANG L L, et al. Application analysis of flywheel energy storage in thermal power frequency modulation in central China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1694-1700.
- [11] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1679-1686.
- HE L X, LI W Y. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units with the auxiliary of flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1679-1686.
- [12] 涂伟超, 李文艳, 张强, 等. 飞轮储能在电力系统的工程应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 869-877.
- TU W C, LI W Y, ZHANG Q, et al. Engineering application of flywheel energy storage in power system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 869-877.
- [13] HOWLADER A M, URASAKI N, YONA A, et al. A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 135-146.
- [14] 陈斌, 范林源, 张俊武, 等. 基于飞轮储能装置的双馈风电机组并网系统联合调频控制研究[J]. 电工技术, 2018(12): 71-73, 76.
- CHEN B, FAN L Y, ZHANG J W, et al. Research on joint frequency modulation control of the grid-connected system for DFIG based on flywheel energy storage device[J]. Electric Engineering, 2018(12): 71-73, 76.
- [15] 唐西胜, 刘文军, 周龙, 等. 飞轮阵列储能系统的研究[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 208-221.
- TANG X S, LIU W J, ZHOU L, et al. Flywheel array energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 208-221.
- [16] 金辰晖, 姜新建, 戴兴建. 微电网飞轮储能阵列协调控制策略研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 834-840.
- JIN C H, JIANG X J, DAI X J. Coordinated control strategy of flywheel energy storage array for micro-grid[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 834-840.
- [17] 王磊, 杜晓强, 宋永端. 用于风电场的飞轮储能矩阵系统协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3406-3412.
- WANG L, DU X Q, SONG Y D. Coordinated control of flywheel energy storage matrix system for wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3406-3412.
- [18] 曹倩, 宋永端, 王磊, 等. 基于比率一致性算法的飞轮储能矩阵系统分布式双层控制[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3024-3029.
- CAO Q, SONG Y D, WANG L, et al. Hierarchical distributed control for flywheel energy storage matrix system based on ratio consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3024-3029.
- [19] 郭伟, 张建成, 李翀, 等. 针对并网型风储微网的飞轮储能阵列系统控制方法[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 810-814.
- GUO W, ZHANG J C, LI C, et al. Control method of flywheel energy storage array for grid-connected wind-storage microgrid[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 810-814.
- [20] SHI C L, WEI T Z, TANG X S, et al. Charging-discharging control strategy for a flywheel array energy storage system based on the equal incremental principle[J]. Energies, 2019, 12(15): doi: 10.3390/en12152844.
- [21] 戴兴建, 邓占峰, 刘刚, 等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 133-140.
- DAI X J, DENG Z F, LIU G, et al. Review on advanced flywheel energy storage system with large scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 133-140.