

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.013

基于 Hamilton 能量理论的飞轮储能系统 比率一致性控制

王 冰¹, 缪永来¹, 陈献慧¹, 李 伟¹, 曹智杰²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京豪庆信息科技有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 基于 Hamilton 能量理论, 提出一种飞轮储能系统比率一致性控制方法。该方法通过对飞轮储能单元转速的调节, 实现系统的比率一致性控制, 达到飞轮储能系统(FESS)内部功率的合理分配。(a) 建立飞轮储能单元端口受控 Hamilton(PCH)系统模型, 利用 PCH 系统反馈镇定原理, 获得端口受控耗散 Hamilton(PCH-D)模型;(b) 研究飞轮储能系统的比率一致性控制问题, 应用 Hamilton 能量成型的控制策略实现飞轮储能单元的转速调节, 确保所有飞轮储能单元可以按照同一比率进行能量的储存和释放, 实现功率的合理分配;(c) 通过仿真验证该控制策略的有效性。结果表明: 在比率一致性控制下, 所有的飞轮储能单元可以按照同一比例进行能量的储存和释放。
关键词: 功率分配; 飞轮储能系统; 反馈镇定; 能量成型; 比率一致性; Hamilton 能量理论
中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0467-06

Research on ratio consensus control of flywheel energy storage system based on Hamiltonian energy theory

WANG Bing¹, MIAO Yonglai¹, CHEN Xianhui¹, LI Wei¹, CAO Zhijie²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Nanjing Haoqing Technologies Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper proposed a ratio consensus control method based on the Hamiltonian energy theory. By adjusting the rotation speed of flywheel energy storage unit, the ratio consensus control of the system was achieved, and the internal power of the flywheel energy storage system (FESS) is reasonably distributed. First, the port-controlled Hamilton (PCH) model of the flywheel energy storage unit was established, and the port-controlled Hamiltonian model with dissipation (PCH-D) was obtained by using the feedback stabilization principle of the PCH system. Then, the problem of ratio consensus control of the flywheel energy storage system was investigated. The speed regulation of the flywheel energy storage unit was realized by using the Hamilton energy forming control strategy to ensure that all the flywheel energy storage units could store and release energy under the same ratio and realize the reasonable distribution of power. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy was verified by simulation.

Key words: power distribution; flywheel energy storage system; feedback stabilization; energy shaping; ratio consensus; Hamiltonian energy theory

基金项目: 国家自然科学基金(51777058)
作者简介: 王冰(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事风电机组控制、网络化系统协调与控制研究。E-mail: icekingking@hhu.edu.cn
引用本文: 王冰, 缪永来, 陈献慧, 等. 基于 Hamilton 能量理论的飞轮储能系统比率一致性控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 467-472.
WANG Bing, MIAO Yonglai, CHEN Xianhui, et al. Research on ratio consensus control of flywheel energy storage system based on Hamiltonian energy theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 467-472.

近年来,光伏、风电等可再生能源发展迅速,但是由于可再生能源本身具有间歇性和波动性,如果直接接入电网,会严重影响电网的电能质量^[14],储能是解决这一问题的方法。作为一种新型储能技术,飞轮储能系统(flywheel energy storage system, FESS)被广泛应用于风力机的功率平滑、电能质量调节和电压恢复中^[5-8]。

FESS 是由多个飞轮储能单元组成的储能系统。目前已经有了一些关于 FESS 与风电场之间协调控制的研究成果^[9-11],但是很少有涉及 FESS 内部的功率分配问题。王磊等^[9]提出了一种 FESS 的充电、放电及安全协调控制策略。周龙等^[10]介绍了一种将 FESS 应用于解决电网电压跌落的问题的方法。Itani 等^[11]给出了一种可行的 FESS 放电策略。对于大量配备在 FESS 中的飞轮储能单元,如何合理地分配它们之间的功率也是一个值得研究的问题。对于初始状态不同的飞轮储能单元来说,当飞轮在充电、放电过程中反复切换时,比率因子一致是其工作寿命的保障。本文基于一致性的基础,通过飞轮储能单元转速的调节实现比率因子的一致,确保飞轮储能单元可以按照同一比率进行能量的储存和释放,达到延长飞轮储能单元寿命的目的。

Hamilton 能量方法是一种明确物理背景和工程意义的设计方法,它从能量角度为非线性系统的控制提供了有效的途径^[12-13]。本文针对飞轮储能单元端口受控耗散 Hamilton (port-controlled Hamilton with dissipation, PCH-D) 系统,应用 Hamilton 能量理论中能量成型方法^[14],通过改变能量函数实现飞轮储能单元的转速调节。本文基于 Hamilton 能量成型的控制策略,通过飞轮储能单元转速调节实现比率因子的同步,使每个飞轮储能单元以同一比率储存和释放能量,实现 FESS 内部功率的合理分配。

1 问题描述

由于风能的随机性和间歇性,风电场所发出的电能具有波动性。为平滑风电场的输出功率,可在风场接入大型储能装置,下面介绍风电场与飞轮储能系统的功率关系。

风电场实际释放功率与参考功率之差即为飞轮储能系统应该释放和存储的功率:

$$\Delta P = P_w - P^* \tag{1}$$

式中: P^* ——上层的指令参考功率; P_w ——系统实际释放的功率; ΔP ——FESS 储存和释放的功率。

当 $\Delta P > 0$ 时, FESS 充电; 当 $\Delta P < 0$ 时, FESS 放电。

1.1 比率因子的定义

比率因子定义为飞轮储能单元充电、放电裕量与充电、放电功率之比。飞轮储能单元的充电裕量^[15]定义为

$$y_{char,i} = \frac{E_i - E_{i0}}{t} \tag{2}$$

式中: $y_{char,i}$ ——飞轮储能单元的充电裕量; E_i ——第 i 个 FESS 单元的充电终端存储能量,与飞轮的转速有关; E_{i0} ——第 i 个 FESS 单元初始状态储存能量; t ——时间。

对于飞轮储能单元来说,其充电、放电功率表达式为

$$P = \tau_e \Delta \omega \tag{3}$$

式中: P ——FESS 单元充电、放电的功率; τ_e ——FESS 单元的电磁转矩; $\Delta \omega$ ——FESS 单元充电、放电过程转速的变化。

飞轮储能单元存储能量的表达式为

$$E_i = \frac{1}{2} J_i \omega_i^2 \tag{4}$$

式中: J_i ——FESS 单元的转动惯量; ω_i ——第 i 个 FESS 单元的转速。

根据比率因子的定义,把飞轮储能单元初始转速定义为 ω_{i0} , 充电过程可达到的能量记为 E_{ic} , 对应的飞轮转速为 ω_{ic} , 则每个飞轮储能单元充电时的比率因子 $r_{char,i}$ 为

$$r_{char,i} = \frac{y_{char,i}}{P_{char,i}} = \frac{E_{ic} - E_{i0}}{t \tau_e \Delta \omega} = \frac{J_i (\omega_{ic}^2 - \omega_{i0}^2)}{2 t \tau_e (\omega_{ic} - \omega_{i0})} = \frac{J_i (\omega_{ic} + \omega_{i0})}{2 t \tau_e} \tag{5}$$

1.2 比率一致性

对于 FESS 来说,确保每个飞轮储能单元的比率因子一致是有效工作的保证。这时,飞轮储能单元按照

同一比率进行能量的释放与储存,不仅能完成 FESS 内部功率的分配任务,而且可起到延长飞轮储能单元寿命的作用。对于充电过程的飞轮储能单元来说,实现比率一致性需要满足的条件为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| r_{\text{char}_i} - r_{\text{char}_j} \| = 0 \tag{6}$$

对于转动惯量和负载转矩相同的飞轮储能单元来说,要实现飞轮以同一比率存储能量,满足的条件为

$$\omega_{i0} + \omega_{ic} = T_1 \tag{7}$$

式中: T_1 ——一常数值,表示飞轮储能单元充电时的初始转速和期望转速之和恒定。

2 飞轮储能单元的数学模型

以永磁同步电机作为飞轮驱动电机,在 d - q 坐标下飞轮储能单元充电时的数学模型可表示为^[16]

$$\begin{cases} L_{fd} \frac{di_{fd}}{dt} = -R_s i_{fd} + n_p \omega L_{fq} i_{fq} + u_{fd} \\ L_{fq} \frac{di_{fq}}{dt} = -R_s i_{fq} - n_p \omega L_{fd} i_{fd} - n_p \omega \Phi + u_{fq} \\ J_f \frac{d\omega}{dt} = \tau_e - \tau_L = 1.5 n_p \Phi i_{fq} - \tau_L \end{cases} \tag{8}$$

式中: u_{fd} ——电机的 d 轴电压; u_{fq} ——电机 q 轴电压; R_s ——定子电阻; i_{fd} ——电机 d 轴电流; i_{fq} ——电机 q 轴电流; L_{fd} 、 L_{fq} ——电机 d 轴、 q 轴电感(满足 $L_{fd} = L_{fq}$); Φ ——电机转子的磁链; n_p ——电机的极对数; J_f ——转动惯量; τ_e ——电机的电磁转矩; τ_L ——负载转矩。这里, i_{fd} 、 i_{fq} 、 ω 是状态变量, u_{fd} 和 u_{fq} 是输入变量。

2.1 飞轮储能单元充电时的 Hamilton 模型

针对式(8),选飞轮储能单元的 Hamilton 能量函数为

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x} = \frac{1}{2} \left(\frac{x_1^2}{L_{fd}} + \frac{x_2^2}{L_{fq}} + \frac{x_3^2}{J_f} \right) \tag{9}$$

其中

$$\begin{aligned} x_1 &= L_{fd} i_{fd} & x_2 &= L_{fq} i_{fq} & x_3 &= J_f \omega \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{fd}} & \frac{1}{L_{fq}} & \frac{1}{J_f} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

基于以上 Hamilton 能量函数,式(8)可以表示为 PCH 系统形式如下:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \nabla H(\mathbf{x}) + \mathbf{G} \mathbf{u}_c \tag{10}$$

其中

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} L_{fd} i_{fd} \\ L_{fq} i_{fq} \\ J_f \omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & n_p x_2 \\ 0 & 0 & -n_p (x_1 + \Phi) \\ -n_p x_2 & n_p (x_1 + \Phi) & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}_c = \begin{bmatrix} u_{fd} \\ u_{fq} \\ -\tau_L \end{bmatrix} \quad \nabla H(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ \omega \end{bmatrix}$$

2.2 平衡点的确定和反馈控制器的设计

当负载转矩已知时,对于给定的转速 ω_0 ,可得飞轮储能单元的平衡点 $\mathbf{x}_0$ 为^[17]

$$\mathbf{x}_0 = [x_{10} \quad x_{20} \quad x_{30}]^T = [0 \quad L_{fq} \tau_L / n_p \Phi \quad J_f \omega_0]^T \tag{11}$$

当负载转矩已知时,对于给定的转速 ω_0 ,可得平衡点的飞轮储能单元的反馈控制器 $\boldsymbol{\alpha}_c(\mathbf{x})$ ^[17],则对应的

PCH-D 模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] + \mathbf{G} \boldsymbol{\mu}_c \\ \mathbf{y}_d = \mathbf{G}^T \nabla H_d(\mathbf{x}) \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\mathbf{J}_d = \begin{bmatrix} 0 & kx_3 & 0 \\ -kx_3 & 0 & -n_p \Phi \\ 0 & n_p \Phi & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_d = \begin{bmatrix} R_s + r_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_s + r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \nabla H_d = \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} - \frac{\tau_L}{n_p \Phi} \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{y}_d$ ——FESS 基于平衡点的输出; $\boldsymbol{\mu}_c$ ——能量成型控制策略; r_1 、 r_2 ——第 1 个和第 2 个飞轮储能单元的比率因子。

3 FESS 的能量成型控制策略

FESS 依据上层的功率分配指令转化为飞轮储能单元的转速指令,通过能量成型控制策略达到所需指令的要求。飞轮储能单元能量成型的主要思路为:已知当前的 Hamilton 函数为 $H_d(\mathbf{x})$,对应的输出为 $\mathbf{y}_d=\mathbf{G}^T \nabla H_d(\mathbf{x})$;而期望的 Hamilton 函数为 $H_r(\mathbf{x})$,对应的输出为 $\mathbf{y}_r=\mathbf{G}^T \nabla H_r(\mathbf{x})$,则能量成型控制策略需要满足^[15]。

$$\mathbf{y}_r=\mathbf{G}^T \nabla H_r(\mathbf{x})=\mathbf{y}_d+\mathbf{d}$$
$$\mathbf{y}_d=\left[\begin{matrix} i_{fd}-i_{fd0} & i_{fq}-i_{fq0} & \omega-\omega_0 \end{matrix}\right]^T$$
$$\mathbf{y}_r=\left[\begin{matrix} i_{fd}-i_{fd0}+d_1 & i_{fq}-i_{fq0}+d_2 & \omega-\omega_0+d_3 \end{matrix}\right]^T$$

其中

式中: $\mathbf{y}_r$ ——系统期望的输出; $\mathbf{d}$ ——常数向量,表示飞轮接收上层指令后的调整量, d_1 、 d_2 和 d_3 对应 i_{fd} 、 i_{fq} 和 ω 的调整参数,设定 $d_1=d_2=0$,通过调节 d_3 的值实现转速的调节。

设计飞轮储能单元的能量成型控制策略为 $\boldsymbol{\mu}_c$,在其作用下式(12)可改为

$$(\mathbf{J}_d-\mathbf{R}_d) \nabla H_d(\mathbf{x})+\mathbf{G} \boldsymbol{\mu}_c=(\mathbf{J}_d-\mathbf{R}_d) \nabla H_r(\mathbf{x})$$

(14)

注意到式(10)中 $\mathbf{G}$ 为列满秩矩阵,能量成型控制策略可表示为

$$\boldsymbol{\mu}_c=(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{J}_d-\mathbf{R}_d)(\nabla H_r(\mathbf{x})-\nabla H_d(\mathbf{x}))$$

(15)

基于以上过程,设计飞轮储能单元的控制策略,可得到以下定理。

定理 1:考虑飞轮储能单元充电时的 PCH-D 模型式(12),基于能量成型方法,设 Hamilton 能量控制策略为

$$\boldsymbol{\mu}_c=\left[\begin{matrix} -(R_s+r_1) d_1+k x_3 d_2 \\ -k x_3 d_1-(R_s+r_2) d_2-n_p \Phi d_3 \\ n_p \Phi d_2 \end{matrix}\right]$$

(16)

使得系统模型式(12)在新的 Hamilton 函数 $H_r(\mathbf{x})$ 下满足式(13),飞轮储能单元的输出达到指令所给的参考值。

飞轮储能单元的比率因子与飞轮储能单元的转速和电磁转矩有关。对于恒定负载转矩的飞轮储能单元来说,其比率一致性控制转化为飞轮储能单元转速的调节问题。针对不同初始转速的飞轮储能单元,应用能量成型控制策略,使其转速满足式 $\omega_{ic}+\omega_0=T_1$,进而实现比率一致性的控制目标。

4 仿真实现

以与风电场相连的 FESS 为例进行 MATLAB 仿真。FESS 包含 6 台飞轮储能单元,在负载转矩 $\tau_L=5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的条件下运行。FESS 有 2 种工作模式,当 $\Delta P=2700 \text{ kW}$ 和 $\Delta P=-3200 \text{ kW}$ 时,FESS 分别工作在充电与放电模式下。当 $\Delta P>0$ 时,6 个比率因子收敛于一个正数,意味着 6 个飞轮储能单元以同一比率储存能量; $\Delta P<0$ 时,6 个比率因子收敛于一个负数,意味着 6 个飞轮储能单元以同一比率释放能量。

4.1 充电、放电模式下 FESS 的比率一致性

当 FESS 工作在充电模式下,即当 $\Delta P=2700 \text{ kW}$,转化为转速的调节指令。在 6 个飞轮初始转速分别为 100 rad/s 、 80 rad/s 、 90 rad/s 、 120 rad/s 、 110 rad/s 、 130 rad/s 时,在能量成型控制策略的作用下,转速输出如图 1 中红色曲线所示。

从图 1 中红色曲线可以得出:在 $0 \sim 20 \text{ s}$ 内,为飞轮初始转速输出曲线;20 s 之后,当 $\Delta P=2700 \text{ kW}$,FESS 充电,在能量成型控制策略作用下,取 $\mathbf{d}_3=[-100 \quad -140 \quad -120 \quad -60 \quad -80 \quad -40]^T$,飞轮储能单元按照同一比率储存能量。其比率因子的输出曲线如图 2 中红色曲线所示,在 $0 \sim 20 \text{ s}$ 内,FESS 工作在保持状态,其比率因子为 0;20 s 之后,当 $\Delta P=$

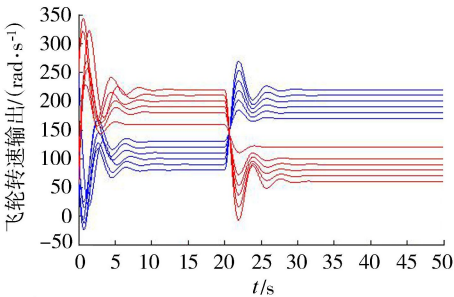


图1 充电、放电模式下 FESS 转速输出曲线
Fig.1 Output curves of rotate speed of FESS in charging and discharging modes

2 700 kW,飞轮工作在充电状态,经过转速的调节,系统以同一比率因子充电。

当 FESS 工作在放电模式下,即当 $\Delta P = -3\,200\text{ kW}$,转化为转速的调节指令。在 6 个飞轮初始转速分别为 200 rad/s、220 rad/s、180 rad/s、210 rad/s、160 rad/s、190 rad/s 时,在能量成型控制策略的作用下,转速输出如图 1 中蓝色曲线所示。

从图 1 中蓝色曲线可以得出:0 ~ 20 s 内,为飞轮初始转速输出曲线;20 s 之后,当 $\Delta P = -3\,200\text{ kW}$,FESS 进行充电,能量成型控制策略作用下,分别取 $d_3 = [120\ 160\ 80\ 140\ 40\ 100]^T$,使飞轮储能单元按照同一比率进行释放能量。其比率因子的输出曲线如图 2 中蓝色曲线所示,在 0 ~ 20 s 内,FESS 工作在保持状态,其比率因子为 0;20 s 之后,当 $\Delta P = -3\,200\text{ kW}$,飞轮工作在放电状态,经过转速的调节,系统以同一比率因子进行放电。

4.2 充电、放电切换模式下 FESS 的比率一致性

实际应用中,FESS 频繁工作在充电和放电的切换中。以 6 个飞轮储能单元组成的 FESS 为例说明。假定 FESS 在前 20 s 工作在初始转速状态;20 s 之后取 $\Delta P = 3\,200\text{ kW}$;40 s 后取 $\Delta P = -2\,100\text{ kW}$;在 6 个飞轮储能单元的初始转速分别为 100 rad/s、80 rad/s、90 rad/s、120 rad/s、110 rad/s、130 rad/s 时,在能量成型控制策略下,FESS 的转速输出结果如图 3 所示。

从图 3 的仿真结果可得:0 ~ 20 s 内,为飞轮储能单元的初始转速曲线;20 s 之后,当 $\Delta P = 2\,700\text{ kW}$,FESS 工作在充电模式下,能量成型控制策略下,取 $d_3 = [-100\ -140\ -120\ -60\ -80\ -40]^T$,可使飞轮储能单元按照同一比率进行储存能量,实现上层功率指令的有效分配;40 s 之后,当 $\Delta P = -2\,100\text{ kW}$,FESS 工作在放电模式下,在能量成型控制策略作用下,取 $d_3 = [80\ 120\ 100\ 40\ 60\ 20]^T$,可使飞轮储能单元按照同一比率进行释放能量,转速输出曲线也反映出能量状态的变化,实现上层功率指令的有效分配。其比率因子的输出仿真如图 4 所示。

从图 4 的仿真结果可得:0 ~ 20 s,FESS 工作在保持状态,飞轮储能单元的比率因子为 0;20 ~ 40 s,FESS 以同一比率因子充电;40 s 之后,FESS 从充电模式切换到放电模式下,FESS 以同一比率因子放电。

5 结 语

本文研究 FESS 的功率分配问题,基于 Hamilton 能量成型的控制策略,通过飞轮储能单元的转速调节实现比率一致,进而实现功率的有效分配。从理论角度出发,将比率一致性控制转变为对 FESS 的转速调节,基于转化的思想,实现功率的有效分配。理论分析和仿真验证可知,比率一致性控制下,可以对 FESS 进行有效的功率分配和控制。

参考文献:

[1] POURIA G K, MAHMOOD J, SEYED G S. Smart grid realization with introducing unified power quality conditioner integrated with DC microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 151:68-85.

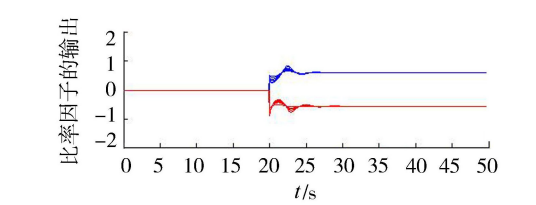


图 2 充电、放电模式下 FESS 比率因子输出曲线
Fig.2 Output curves of ratio factors of FESS in charging and discharging modes

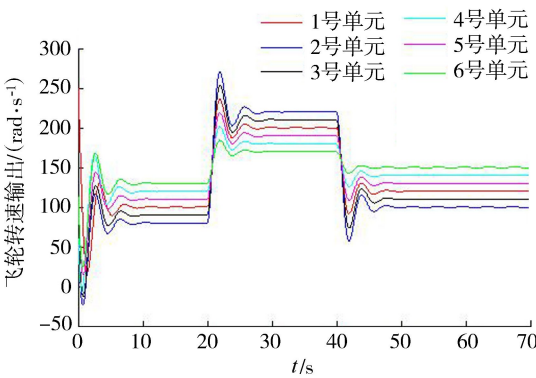


图 3 充电、放电切换模式下 FESS 转速输出曲线
Fig.3 Output curves of rotate speed of FESS during process of switching in charging and discharging modes

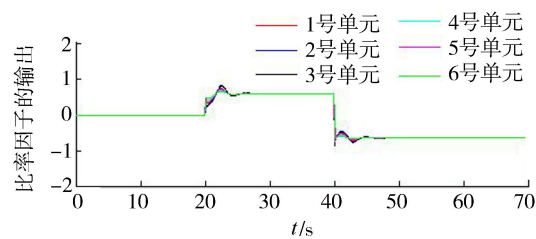


图 4 充电、放电切换模式下 FESS 比率因子输出曲线
Fig.4 Ratio factor curves of FESS during process of switching in charging and discharging modes

- [2] BASSETTI M C, CONSOLI D, MANENTE G, et al. Design and off-design models of a hybrid geothermal-solar power plant enhanced by a thermal storage[J]. *Renewable Energy*, 2018, 128: 460-472.
- [3] STOUGIE L, TSALIDIS G A, KOOI H J V D, et al. Environmental and exergetic sustainability assessment of power generation from biomass[J]. *Renewable Energy*, 2018, 128: 520-528.
- [4] PAVAN K Y V, RAVIKUMAR B. Electrical machines based DC/AC energy conversion schemes for the improvement of power quality and resiliency in renewable energy microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, 90: 10-26.
- [5] FAN Bo, WANG Cheng, YANG Qinmin, et al. Performance guaranteed control of flywheel energy storage system for pulsed power load accommodation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 99: 1-11.
- [6] ZHANG Yi, XU Yujie, GUO Huan, et al. A hybrid energy storage system with optimized operating strategy for mitigating wind power fluctuations[J]. *Renewable Energy*, 2018, 125: 121-132.
- [7] OUYANG Huimin, YU Chunmin, ZHANG Guangming, et al. Vibration suppression for flywheel energy storage system using modal decoupling control[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(3): 168781401876694.
- [8] MENG L, DRAGICEVIC T, GUERRERO J. Adaptive control design for autonomous operation of multiple energy storage systems in power smoothing applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 99: 12-13.
- [9] 王磊, 杜晓强, 宋永瑞. 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 Lei, DU Xiaoqiang, SONG Yongrui. Coordinated control of flywheel energy storage matrix system for wind farm[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3406-3412. (in Chinese))
- [10] 周龙, 齐智平. 解决配电网电压暂降问题的飞轮储能单元建模与仿真[J]. *电网技术*, 2009, 33(19): 152-158. (ZHOU Long, QI Zhiping. Modeling and simulation of flywheel energy storage unit for voltage sag in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(19): 152-158. (in Chinese))
- [11] ITANI K, BERNARDINIS A D, KHATIR Z, et al. Energy management of a battery-flywheel storage system used for regenerative braking recuperation of an electric vehicle[C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. New York: IEEE, 2016: 2034-2039.
- [12] 王冰, 窦玉, 王宏华. 海上风电场双馈风电机群分布式协同控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(19): 5279-5287. (WANG Bing, DOU Yu, WANG Honghua. Distributed cooperative control research of doubly fed wind turbine groups in offshore wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5279-5287. (in Chinese))
- [13] WANG Bing, WU Qiuxuan, TIAN Min, et al. Distributed coordinated control of offshore doubly fed wind turbine groups based on the Hamiltonian energy method[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1448-1460.
- [14] WANG Bing, TIAN Min, LIN Tingjun, et al. Distributed complementary control research of wind turbines in two offshore wind farms[J]. *Sustainability*, 2018, 10(2): 553-564.
- [15] 曹倩, 宋永瑞, 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 Qian, SONG Yongrui, WANG Lei, 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. (in Chinese))
- [16] SINGH T S, JAIN A K. Maximum power per VA control of vector controlled interior permanent magnet motor[J]. *Sādhanā*, 2018, 43(4): 50-59.
- [17] 于海生, 赵克友, 郭雷, 等. 基于端口受控哈密顿方法的PMSM最大转矩/电流控制[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(8): 82-87. (YU Haisheng, ZHAO Keyou, GUO Lei, et al. Maximum torque per ampere control of PMSM based on port-controlled Hamiltonian theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(8): 82-87. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-02-11 编辑: 张志琴)