

DOI: 10.7667/PSPC180524

电网调频型飞轮储能系统自适应鲁棒充电控制方法研究

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: 飞轮储能系统对电网频率调节控制的效果优异, 能够有效地提高电网频率稳定性, 保证电网运行的可靠性和安全性。为了提高电网波动下的系统充电过程中系统性能和转速跟踪精度, 并减小系统的振动和冲击, 针对采用永磁同步电机的此类系统, 基于矢量控制策略提出了转子转速自适应鲁棒控制(ARC)方法和连续参考转速曲线。通过建立的仿真模型, 对推导的方法进行了验证。接着应用转速 PID 控制方法和等加速度参考转速曲线。仿真结果表明: 基于转速 ARC 控制方法和连续参考转速曲线, 系统的转速稳态误差为 0.03%, 角加速度稳态误差为 0.7%, 电网波动下的转速最大误差为 0.8%; 基于转速 PID 控制方法和等加速度参考转速曲线时, 系统的转速稳态误差为 0.08%, 角加速度稳态误差为 1.6%, 电网波动下的转速最大误差为 6.0%。因此, 采用转速 ARC 控制方法和连续参考转速曲线的系统性能和转速跟踪误差明显优于采用转速 PID 控制方法和等加速度参考转速曲线。

关键词: 调频型飞轮储能系统; 充电控制; 连续参考转速曲线; 自适应鲁棒控制方法

Study on adaptive robust charge control of flywheel energy storage system for grid frequency adjustment

WU Xin, TENG Wei, LIU Yibing

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

Abstract: The performance of the Flywheel Energy Storage System (FESS) is excellent when it is applied on the adjustment of the grid frequency. FESS can improve the stability of the grid frequency and guarantee the reliability and stability of the grid. In order to enhance the system performance and rotation speed accuracy during the charge process of FESS with Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) under grid vibration, this paper proposes the Adaptive Robust Control (ARC) method and the continuous reference curve of the rotor rotation speed to reduce the system vibration and impact based on the vector control strategy. The developed methods are verified through the built simulation model. Then it applies the PID control method and the uniform acceleration reference curve of the rotation speed on the FESS. The simulation results show that the steady state speed error is 0.03% and the steady state error of the angular acceleration is 0.7% for the system with ARC method and the continuous reference curve, while the maximum speed error is 0.8% under the grid vibration. For the system with PID method and the uniform acceleration reference curve, the steady state speed error is 0.08% and the steady state error of the angular acceleration is 1.6%, while the maximum speed error is 6.0% under the grid vibration. Therefore, the FESS with ARC method and continuous reference curve owns much better performance and rotation speed tracking accuracy than the system with PID method and the uniform acceleration reference curve during the charge process.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0805905), National Natural Science Foundation of China (No. 51775186) and Fundamental Research Funds for the Central Universities in China (No. 2017MS074).

Key words: flywheel energy storage system for power grid adjustment; charge control; continuous reference curve of rotation speed; adaptive robust control method

0 引言

随着风力、光伏等新能源发电大规模接入我国

电网, 其间歇性、不确定性及波动性的特点, 对电网频率稳定产生不容忽视的影响^[1-3]。为了保证电网可靠、稳定运行, 需要调节控制电网频率, 即电网调频^[4]。现阶段国内的调频机组主要为火电机组, 但由于其响应速度慢、爬坡速率低的缺点, 调频质量与灵活性难以满足要求。

一个典型的飞轮储能系统(FESS)主要由飞轮转

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFC0805905); 国家自然科学基金项目资助(51775186); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2017MS074)

子、轴承支撑系统、双向能量变换器、飞轮电机和真空室组成^[5-7]。飞轮储能系统的调频效果远优于火电机组,能够有效提高电网频率稳定性,从而保证电网运行的可靠性和安全性^[4]。然而电网调频是以秒级计算调整时间^[4],同时飞轮储能系统具有大惯性、时变、非线性等特点,系统稳定性易受扰动(如电网波动)和系统参数变化的影响^[5-6]。因此,亟需提高上述条件下 FESS 系统充电过程的系统性能和转速跟踪精度,并减小飞轮转子的振动和冲击。

对于飞轮储能系统的充电控制,即转子转速控制,现有的控制方法主要有:文献[5]提出了基于滑模变结构的制策略;文献[6]提出了基于改进型滑模观测器的飞轮储能系统充电控制方法;文献[7]采用基于恒转矩和恒功率方式的改进复合控制策略;文献[8]采用转速外环滑模控制,电流环 PI 控制;文献[9]中飞轮充电模式控制策略为直流电压—转矩双闭环控制;文献[10]使用恒转矩控制策略;文献[11]采用广义动量补偿控制方法;文献[12]应用了低速恒转矩、高速恒功率的混合控制方法;文献[13]采用基于 PI 控制的速度外环、电流内环的控制方式。

综上所述,现有研究并未针对电网波动下的飞轮储能系统的充电控制方法开展研究。本文针对使用永磁同步电机(PMSM)的调频型飞轮储能系统,在系统充电过程中基于矢量控制策略,应用自适应鲁棒控制(ARC)方法和连续参考转速曲线,进行转速控制,从而提高电网波动下的系统性能和转速跟踪精度,并减小转子的振动和冲击,然后建立仿真模型开展验证。

1 飞轮储能系统自适应鲁棒充电控制方法

自适应鲁棒控制(ARC)^[14-16]能够在被控对象具有参数不确定和未知非线性因素时,确保系统跟踪性能达到预期指标。在飞轮储能系统充电过程中,PMSM 驱动转子转动^[13]。本文基于矢量控制策略,应用转速—电流双闭环控制^[5,12]。外环为转速环,采用 ARC 控制方法。电流环作为内环,应用 PI 控制方法。控制框图如图 1 所示。

为减小 FESS 系统在充电过程中飞轮转子的振动和冲击,设定此过程中转子转速、角加速度、角加加速度均连续,起始和结束的角加速度与角加加速度均为 0,进而获得连续参考转速曲线公式为

$$\omega(t) = \omega_0 + (\omega_f - \omega_0) \cdot \left[6 \cdot (t/T_d)^5 - 15 \cdot (t/T_d)^4 + 10 \cdot (t/T_d)^3 \right] \quad (1)$$

式中: T_d 为时间周期; ω_0 为转子初始转速; ω_f 为

转子最终转速; $t \in [0, T_d]$ 。

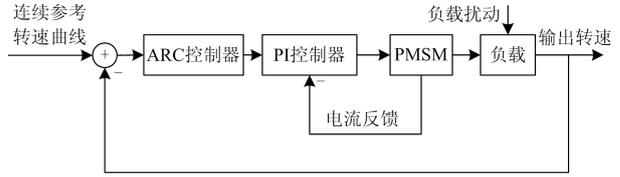


图 1 飞轮储能系统充电过程控制框图

Fig. 1 Flow chart for charge process control of FESS

1.1 永磁同步电机的动力学模型

在同步旋转坐标 $d-q$ 轴下,设定 d 轴的等效电流为零,永磁同步电机的动力学模型可描述为^[16]

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m, \quad T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_{qs} \quad (2)$$

式中: J 为电机和负载折算的转动惯量; B 为电机的黏性摩擦系数; ω_m 代表电机角速度; T_e 代表电机转矩; T_L 为负载转矩或扰动集合; p 代表电机的极对数; ψ_f 为电机的磁通; i_{qs} 为 q 轴等效电流。

式(2)可改写为

$$k_t i_{qs} = J \dot{\omega}_m + B\omega_m + T_L - d, \quad k_t = \frac{3}{2} p \psi_f, \quad T_e = k_t i_{qs} \quad (3)$$

式中: k_t 为力矩系数; d 为有界的非线性不确定项。

式(3)改写为状态方程形式。

$$\theta_1 \dot{x}_1 = u - \theta_2 x_1 - \theta_3 + d \quad (4)$$

式中: $x_1 = \omega_m$; $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T = [J \quad B \quad T_L]^T$ 。

设定电动机的理想转速为 $x_{1d}(t)$ 。本文的控制目标为通过设计控制输入 u , 使得输出 $y = x_1$, 尽可能地跟踪理想转速。

1.2 飞轮储能系统的自适应鲁棒充电控制方法

假设未知参数和非线性不确定项的范围满足如下条件^[14-16]:

$$\theta \in \Omega_\theta = \{ \theta : \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \} \quad (5)$$

$$d \in \Omega_d = \{ d : |d| \leq \delta_d \}$$

式(5)中: δ_d , $\theta_{\max} = [\theta_{1\max} \quad \theta_{2\max} \quad \theta_{3\max}]^T$, $\theta_{\min} = [\theta_{1\min} \quad \theta_{2\min} \quad \theta_{3\min}]^T$ 皆已知。

分别定义向量 θ 的估算值和估算误差为 $\hat{\theta}$ 和 $\tilde{\theta}$ ($\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$)。向量 θ 可通过如下参数投影自适应算法估算。

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma \tau) \quad (6)$$

式(6)中: τ 为自适应函数; Γ 为反映参数辨识速率的正定对角矩阵。

式(6)中的投影定位为

$$\text{Proj}(\hat{\theta}_i) = \begin{cases} 0 & \hat{\theta}_i = \theta_{i\max}, \hat{\theta}_i > 0 \\ 0 & \hat{\theta}_i = \theta_{i\min}, \hat{\theta}_i < 0 \\ \hat{\theta}_i & \text{其他} \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

式(7)中的投影定位满足下述条件:

$$\begin{aligned} \text{(P1)} \quad & \hat{\theta} \in \bar{\Omega}_\theta = \{\hat{\theta} : \theta_{\min} \leq \hat{\theta} \leq \theta_{\max}\} \\ \text{(P2)} \quad & \tilde{\theta}^T [\Gamma^{-1} \text{Proj}_\theta(\Gamma\tau) - \tau] \leq 0 \quad \forall \tau \end{aligned} \quad (8)$$

设定 x_1 为系统输入, 设计如下控制律 u 来实现最小输出误差。

$$u = u_a + u_s \quad (9)$$

式中: u_a 为模型补偿控制量; u_s 为鲁棒控制量。

设定

$$\begin{cases} u_a = \hat{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + \hat{\theta}_2 x_1 + \hat{\theta}_3 = -\varphi^T \hat{\theta} \\ u_s = u_{s1} + u_{s2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\varphi = [-\dot{x}_{1d} \quad -x_1 \quad -1]^T$ 。

定义比例反馈控制函数 u_{s1} 及鲁棒控制函数 u_{s2} 见式(11)。

$$\begin{cases} u_{s1} = -k_1 z_1 \\ u_{s2} = -\frac{h^2}{4\varepsilon} z_1 \end{cases} \quad \text{其中} \quad \begin{cases} z_1 u_{s2} \leq 0 \\ z_1 [u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta} + d] \leq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中: $z_1 = x_1 - x_{1d}$; k_1 为正增益; h 为平滑函数并满足 $h \geq \|\theta_M\| \|\varphi\| + \delta_d$, $\theta_M = \theta_{\max} - \theta_{\min}$; ε 为正参数。

1.3 飞轮储能系统充电过程稳定性分析

基于上述设计的控制量, z_1 的导数如下:

$$Jz_1 = J(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1d}) = -k_1 z_1 + u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta} + d \quad (12)$$

选取李亚普诺夫函数 V_1 :

$$V_1 = \frac{Jz_1^2}{2} \quad (13)$$

设定 $\lambda = \min\{2k_1 / \theta_{1\min}, 2k_1 / \theta_{1\max}\}$, $\tau = \varphi z_1$ 。基于式(11)和式(12), 对 V_1 求导:

$$\dot{V}_1 = Jz_1 \dot{z}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 [u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta} + d] \leq -\lambda V_1 + \varepsilon \quad (14)$$

根据式(13), 可得

$$V_1(t) \leq \exp(-\lambda t) V_1(0) + \frac{\varepsilon}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)] \quad \forall t > 0 \quad (15)$$

因此, 李亚普诺夫函数 V_1 按指数衰减。

如果只存在参数和负载转矩的不确定性, 不存在其他不确定项, 即 $d=0$, 式(14)可改写为

$$\dot{V}_1 = Jz_1 \dot{z}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 [u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta}] \leq -\lambda V_1 + \varepsilon \quad (16)$$

则由系统(3)、参数投影自适应估算方法(6)和控制律(9)组成的自适应鲁棒闭环系统渐近稳定^[14]。

2 仿真实验验证

基于文献[13]中的飞轮储能系统相关参数, 建

立了 FESS 充电过程的仿真模型。转速外环采取 ARC 控制方法, 电流内环选用 PI 控制方法。同步发电机引入的电气扰动包括各种短路故障、甩负荷、重合闸、非同期并网等。上述扰动都将带来电网的冲击^[17], 可用来模拟电网波动对飞轮储能系统(FESS)的冲击。基于机组最严重的 180° 合闸角下的非同期并网条件, 采用文献[18]中建立的电磁转矩模型, 模拟 FESS 在电网波动下承受的扰动^[19-22]。应用此模型, 模拟持续时间为 1 s 的电网波动下, FESS 充电过程中承受的电磁转矩, 如图 2 所示。

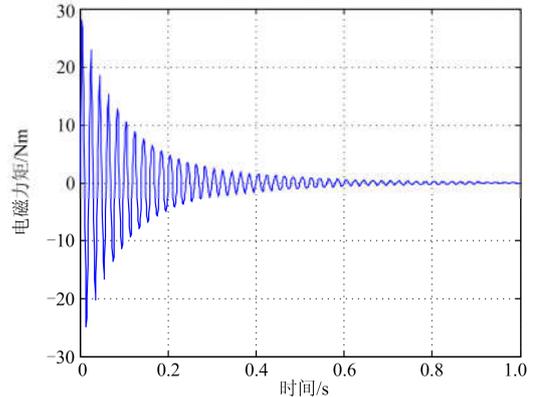


图 2 电网波动下的 FESS 承受的电磁转矩

Fig. 2 Electromagnetic torque on the FESS under grid vibration

在 FESS 充电过程中, 将获得的电磁转矩, 在第 31 s 施加至仿真模块中。采用 ARC 转速控制方法和连续参考转速曲线的仿真结果如图 3、图 4 所示。其中参考转速从 0 加速至 5 000 rpm, 系统的转速稳态误差为 0.03%, 角加速度稳态误差为 0.7%, 电网波动下的转速最大误差为 0.8%。

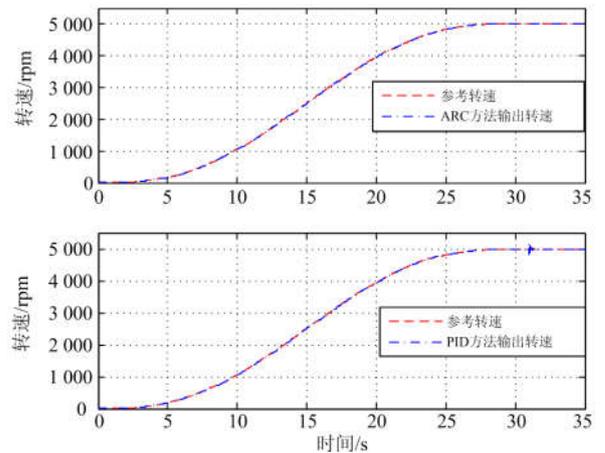


图 3 连续参考转速曲线下 ARC 和 PID 方法的转子转速

Fig. 3 Rotor rotation speed with ARC and PID method under continuous reference speed curve

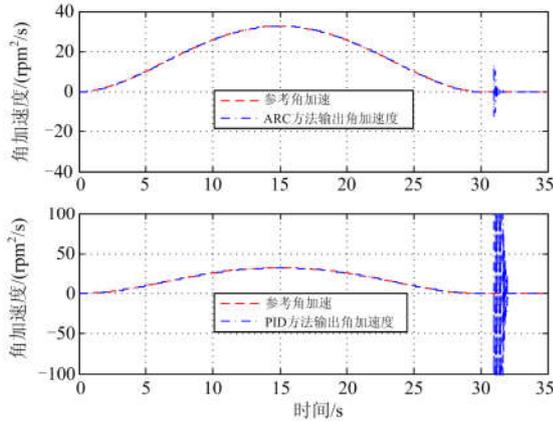


图4 连续参考转速曲线下ARC和PID方法的转子角加速度
Fig. 4 Rotor angular acceleration with ARC and PID method under continuous reference speed curve

接着, 基于根轨迹法设计的PID转速控制器和连续参考转速曲线, 仿真结果如图3、图4所示。系统的转速稳态误差为0.05%, 角加速度稳态误差为1.3%, 电网波动下的转速最大误差为5.5%。因此, 在电网波动下, 采用转速ARC控制方法和连续参考转速曲线的系统性能和跟踪误差明显优于采用转速PID控制方法和连续参考转速曲线。

采用ARC转速控制方法和等加速度参考转速曲线的仿真结果如图5、图6所示。系统的转速稳态误差为0.03%, 角加速度稳态误差为0.8%, 电网波动下的转速最大误差为0.9%。

采用PID转速控制器和等加速度参考转速曲线, 仿真结果如图5、图6所示。系统的转速稳态误差为0.08%, 角加速度稳态误差为1.6%, 电网波动下的转速最大误差为6.0%。

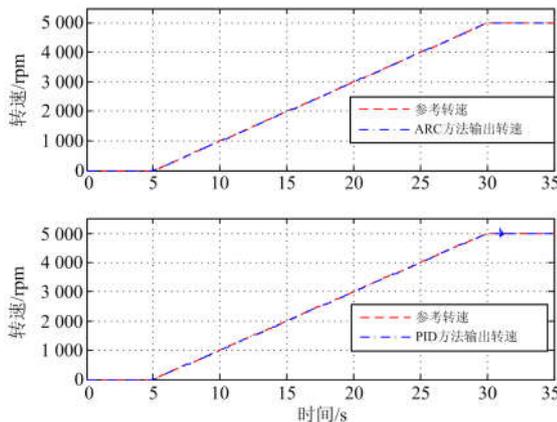


图5 等加速度参考转速曲线下PID方法的转子转速
Fig. 5 Rotor rotation speed with PID method under uniform acceleration reference curve

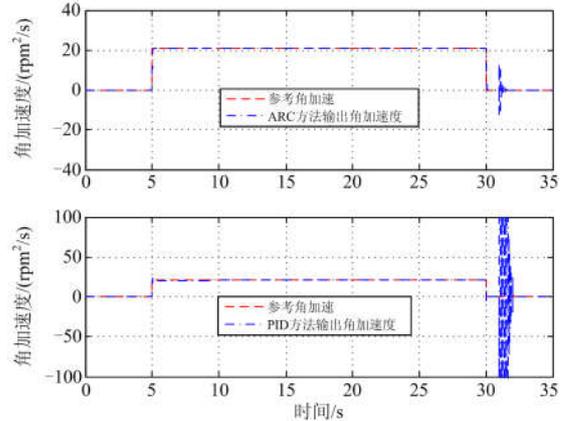


图6 等加速度参考转速曲线下PID方法的转子角加速度
Fig. 6 Rotor angular acceleration with PID method under uniform acceleration reference curve

因此, 在电网波动下^[23-26], 采用转速ARC控制方法和等加速度参考转速曲线的系统性能和跟踪误差明显优于采用转速PID控制方法和和等加速度参考转速曲线。根据图3—图6, ARC转速控制方法与连续参考转速曲线相结合的系统性能, 较其与等加速度参考转速曲线相结合时, 亦有一定的提高。

3 结论

为了提高FESS在充电过程中的系统性能和转速跟踪精度, 并减小转子的振动和冲击, 本文针对采用PMSM的FESS, 提出了转速ARC控制方法和连续参考转速曲线。通过建立的仿真模型, 对提出的方法进行了验证。为了进行对比, 对系统应用了转速PID控制方法和等加速度参考转速曲线。

仿真结果表明: 采用ARC转速控制方法和连续参考转速曲线, 系统的转速稳态误差为0.03%, 角加速度稳态误差为0.7%, 电网波动下的转速最大误差为0.8%。采用PID转速控制器和连续参考转速曲线, 系统的转速稳态误差为0.05%, 角加速度稳态误差为1.3%, 电网波动下的转速最大误差为5.5%。采用ARC转速控制方法和等加速度参考转速曲线, 系统的转速稳态误差为0.03%, 角加速度稳态误差为0.8%, 电网波动下的转速最大误差为0.9%。采用PID转速控制器和等加速度参考转速曲线, 系统的转速稳态误差为0.08%, 角加速度稳态误差为1.6%, 电网波动下的转速最大误差为6.0%。

因此, 采用转速ARC控制方法和连续参考转速曲线的系统性能和转速跟踪误差明显优于PID控制方法和和等加速度参考转速曲线。ARC控制方法与连续参考转速曲线相结合的系统性能, 较其与等加

速度参考转速曲线相结合时,亦有一定提高。

参考文献

- [1] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.
- [2] 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.
- [3] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 考虑抗扰性能的风电混合储能系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 164-169.
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Study on coordination control of wind power hybrid energy storage system in consideration of anti-disturbance performance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 164-169.
- [4] 李飞, 肖仕武, 徐歌, 等. 储能系统在区域电网一次调频中的应用研究[J]. 现代电力, 2017, 34(2): 67-73.
LI Fei, XIAO Shiwu, XU Ge, et al. Research on the application of energy storage system to primary frequency regulation for regional power grid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(2): 67-73.
- [5] 孙晓静. 飞轮电池控制策略研究及其应用[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [6] 刘文军, 周龙, 唐西胜, 等. 基于改进型滑模观测器的飞轮储能系统控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 71-78.
LIU Wenjun, ZHOU Long, TANG Xisheng, et al. Research on FESS control based on the improved sliding-mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 71-78.
- [7] 刘学, 姜新建, 张超平, 等. 大容量飞轮储能系统优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 75-82.
LIU Xue, JIANG Xinjian, ZHANG Chaoping, et al. Optimization control strategies of large capacity flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 75-82.
- [8] 赵晗彤, 张建成. 基于滑模控制的飞轮储能稳定光伏微网离网运行母线电压策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 36-42.
ZHAO Hantong, ZHANG Jiancheng. Research on bus voltage control strategy of off-grid PV microgrid with flywheel energy storage system based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 36-42.
- [9] 冯奕, 颜建虎. 基于飞轮储能的风力发电系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 94-98.
FENG Yi, YAN Jianhu. Simulation of wind energy generation system with flywheel storage system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 94-98.
- [10] 谈震, 李永丽. 基于双 DSP 的飞轮储能系统控制平台的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 127-132.
TAN Zhen, LI Yongli. Development of flywheel energy storage system control platform base on dual-DSP[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 127-132.
- [11] 姬联涛, 张建成. 基于飞轮储能技术技术的可再生能源发电系统广义动量补偿控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 101-106.
JI Liantao, ZHANG Jiancheng. Research on generalized momentum compensation method of flywheel energy storage in renewable energy power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 101-106.
- [12] 黄宇淇, 姜新建, 邱阿瑞. 飞轮储能能量回馈控制方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(7): 1085-1088.
HUANG Yuqi, JIANG Xinjian, QIU Arui. Feedback control for flywheel energy storage system[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2008, 48(7): 1085-1088.
- [13] 刘文军, 唐西胜, 周龙, 等. 基于背靠背双 PWM 变频器的飞轮储能系统并网控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 120-128.
LIU Wenjun, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on grid-connected control method for FESS based on back-to-back converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 120-128.
- [14] XU L, YAO B. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments[J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2000, 6(4): 444-452.
- [15] YAO J Y, JIAO Z X, MA D, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties[J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2014, 19(2): 633-641.
- [16] 杜仁慧, 吴益飞, 陈威, 等. 永磁同步电机伺服系统高精度自适应鲁棒控制[J]. 信息与控制, 2013, 42(1): 132-137.

- DU Renhui, WU Yifei, CHEN Wei, et al. High accuracy adaptive robust control for permanent magnet synchronous motor systems[J]. *Information and Control*, 2013, 42(1): 132-137.
- [17] 向玲. 电网冲击下汽轮发电机组轴系弯扭振动模拟试验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [18] 何成兵, 顾煜炯, 董玉亮. 非同期并列时汽轮发电机组轴系弯扭耦合振动分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 92-98.
HE Chengbing, GU Yujiong, DONG Yuliang. Coupled flexural and torsional vibrations analysis of turbine generator shaft systems caused by asynchronous juxtaposition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(9): 92-98.
- [19] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 7-14.
- [20] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(22): 90-95.
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(22): 90-95.
- [21] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [22] MAGDY G MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [23] 吴云亮, 肖峥, 闫秉科, 等. 微电网协调频率和电压控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(2): 15-20.
WU Yunliang, XIAO Zheng, YAN Bingke, et al. Coordinated frequency and voltage control strategy for microgrid[J]. *Smart Power*, 2017, 45(2): 15-20.
- [24] 钱则玉, 臧海祥, 成乐祥, 等. 基于 FDM 的混合储能系统容量配置研究[J]. *广东电力*, 2018, 31(6): 46-53.
QIAN Zeyu, ZANG Haixiang, CHENG Lexiang, et al. Reserch on allocation for hybrid energy storage system capacity based on FDM[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(6): 46-53.
- [25] 赵琦, 管霖, 吕耀棠, 等. 储能电站在含光伏电源配电网中的优化配置[J]. *广东电力*, 2018, 31(7): 8-14.
ZHAO Qi, GUAN Lin, LÜ Yaotang, et al. Optimized configuration of energy storage power station in distribution network with photovoltaic power[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(7): 8-14.
- [26] 李想, 张建成, 王宁. 超级电容器-飞轮-蓄电池混合储能系统容量配置方法研究[J]. *中国电力*, 2018, 51(11): 117-124.
LI Xiang, ZHANG Jiancheng, WANG Ning. Capacity configuration strategy for super capacitor-flywheel-battery hybrid energy storage system[J]. *Electric Power*, 2018, 51(11): 117-124.

收稿日期: 2018-05-05; 修回日期: 2018-10-18

作者简介:

武鑫(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为机电系统控制和故障诊断; E-mail: wuxin@ncepu.edu.cn

滕伟(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为机电系统故障诊断和动力学分析; E-mail: tengw@ncepu.edu.cn

柳亦兵(1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向为机电系统动力学分析和故障诊断。E-mail: lyb@ncepu.edu.cn

(编辑 姜新丽)