

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.6.260

中图分类号: TM910.6

文献标志码: A

基于浸入与不变理论的电动汽车快充站 飞轮储能系统非线性控制策略

韩 磊(中国电源学会会员), 王育飞, 薛 花
(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为更好地补偿快充站直流侧母线电压跌落并限制电网功率爬坡率, 提出1种基于浸入与不变理论的直流快充站飞轮储能系统非线性控制策略。首先, 考虑快充站供电系统功率平衡关系, 分析飞轮储能传统控制策略下充电负荷接入瞬间引发的冲击特性, 确立直流母线电压稳定为优化目标; 然后, 考虑快充站母线电压控制效果和储能出力电流控制精度, 建立飞轮储能的仿射非线性模型, 利用浸入与不变理论构建流形面及控制律以提供快速响应充电负荷电流突变和飞轮转速变化的能力, 并设计储能系统充放电控制策略; 最后, 搭建仿真模型对单/多台电动汽车接入下不同控制策略进行对比分析。结果表明, 所提控制策略可有效抑制电动汽车接入及飞轮转速变化对母线电压的影响, 缓解对配电网的冲击。

关键词: 飞轮储能系统; 电动汽车快速充电站; 直流母线电压; 控制策略

Nonlinear Control Strategy of Flywheel Energy Storage System for Electric Vehicle Fast Charging Station Based on Immersion and Invariance Theory

HAN Lei, *Member, CPSS*, WANG Yufei, XUE Hua

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

Abstract: To better compensate for the voltage drop of DC-side bus in an electric vehicle (EV) fast charging station and limit the power ramp rate of power grid, a nonlinear control strategy of flywheel energy storage system for the DC fast charging station is proposed based on the immersion and invariance theory. First, considering the power balance relationship of the power supply system in the fast charging station, the impact characteristics caused by the charging load instantaneous access under the traditional control strategy of flywheel energy storage system are analyzed, and the voltage stability of DC-side bus is determined as the optimization objective. Then, the effect of bus voltage control and the control accuracy of energy storage output current are considered, an affine nonlinear model of flywheel energy storage is established, the manifold surface and control law are constructed using the immersion and invariance method to provide the capability to quickly respond to the charging load current mutation and flywheel speed change, and a charging and discharging control strategy for the energy storage system is designed. Finally, a simulation model is built to compare and analyze different control strategies under single- and multi-EV access, and results show that the proposed control strategy can effectively suppress the influence of electric vehicle access and flywheel speed change on the bus voltage, thereby alleviating the impact on the distribution network.

Keywords: Flywheel energy storage system; electric vehicle fast charging station; DC-side bus voltage; control strategy

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2022-01-11; 录用日期:

2022-03-04; 网络首发日期: 2022-07-22

基金项目: 上海市科技创新行动计划资助项目(20DZ2205500)

This work is supported by Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan under the grant 20DZ2205500

电动汽车 EV(electric vehicle)的迅速发展与普及有效推动了低碳化社会建设进程, 但传统慢充模式难以满足大量车主的短时快速充电需求。随着快速充电技术的不断成熟, 电动汽车快速充电站 FCS

(fast charging station)逐渐在城市核心区域投入建设与运营。然而,高功率、大电流的快充设备接入对电力系统造成了强烈的功率冲击,给区域电网的安全稳定运行带来巨大挑战^[1-2]。为解决冲击性负荷接入造成的电网功率爬坡率骤升问题及充电启动阶段母线电压的大幅度跌落问题^[3-4],在直流快速充电站配置储能装置以提供高功率充放电服务,可有效抑制负荷冲击带来的不良影响。

用于抑制快速充电初期出现瞬态功率冲击的各种储能设备,飞轮储能系统 FESS(flywheel energy storage system)凭借可提供秒级、分钟级的充放电服务,并具备功率密度高、响应速度快、寿命周期长等特点^[5-6],已得到国内外学者的广泛关注^[7-9]。相较于感应电机式 FESS 存在效率低且功率因数滞后等缺点,直流 FCS 多使用永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous motor)式 FESS,并采用母线电压比例积分反馈控制方法^[10]。文献[11]在飞轮侧变流器传统双闭环控制基础上提出负载电流补偿与转速反馈的控制策略,改善了飞轮储能状态切换时母线电压波动;文献[12]在传统母线电压 PI 控制基础上结合网侧变流器虚拟同步机控制对飞轮侧变流器进行小信号建模,分析相关参量对电力系统惯性的影响;文献[13]提出以飞轮和蓄电池混合储能实现光储充电站母线电压平滑稳定。储能侧变流器采用传统控制策略时通常应用小信号分析建立控制模型,局限于电力系统仅发生小扰动且稳态工作点变化不大的场合,考虑到 FCS 中冲击性负荷投切造成的大扰动问题,现有控制方法若未能恰当处理,会引发系统动态性能失衡,甚至波及 FCS 中其他负荷。

综上所述,本文在综合考虑缓解 EV 快速充电启动阶段直流母线电压大幅跌落及电网功率爬坡率骤升的基础上,兼顾储能侧传统策略的局限性和母线电压控制的稳定性,建立配置 FESS 的直流快速充电站控制系统,提出 1 种基于浸入与不变理论的 FCS-FESS 充放电控制策略,并在 MATLAB/Simulink 仿真环境下对所提策略面对单台 EV 快速充电与多台 EV 短时间内连续快速充

电的可行性和有效性进行验证。

1 直流快充站飞轮储能系统传统控制策略分析

本文设计的直流一体化快速充电站主要由三相交流电源、FESS 及多台电动汽车快速充电桩构成,结构如图 1 所示。FCS 通过直流母线实现电网、FESS 及充电负荷之间的能量供需平衡,其中电网侧变流器采用传统电压电流双闭环控制方式的 PWM 整流电路^[14-15]。目前 EV 车载动力电池快速充电遵循“恒流-恒压”充电模式,考虑快充站负荷冲击集中在充电电流爬坡骤升阶段,因此可采用恒值电阻等效代替快充桩与 EV 负荷,模拟快速充电暂态功率冲击特性^[16]。

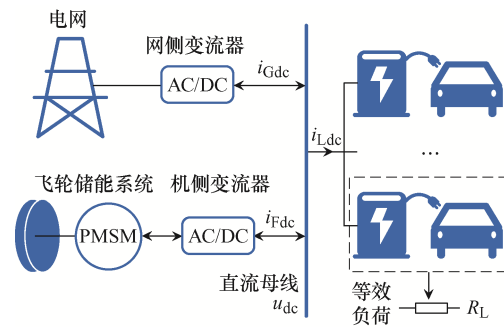


图 1 含飞轮储能系统的直流快速充电站结构

Fig. 1 Structure of DC fast charging station with FESS

FCS 直流侧母线功率平衡方程^[9]为

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = u_{dc} i_{Fdc} - u_{dc} i_{Ldc} + u_{dc} i_{Gdc} \quad (1)$$

式中: C 为直流侧母线电容; u_{dc} 为直流母线电压; i_{Fdc} 为飞轮储能系统侧变流器的直流电流; i_{Ldc} 为 EV 直流快充桩充电电流; i_{Gdc} 为网侧变流器提供的直流电流。

FESS 结构如图 2 所示,包括飞轮、永磁同步电动/发电一体机、三相全桥电压源型变流器、直流母线侧电容 C 。其中, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为永磁同步电机的三相输入电流。

FESS 在转子磁场定向的同步旋转坐标系中的数学模型^[17]为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_m n_p L_q i_{sq} \\ u_q = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_m n_p L_q i_{sq} + \omega_m n_p \Psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} n_p [\Psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 d 、 q 轴电流; R_s 和 L_d 、 L_q 分别为定子的绕组电阻和 d 、 q 轴的电感; T_e 、 ω_m 、 n_p 、 Ψ_f 分别为 PMSM 的电磁转矩、转子的电角速度、极对数、永磁体的磁链。

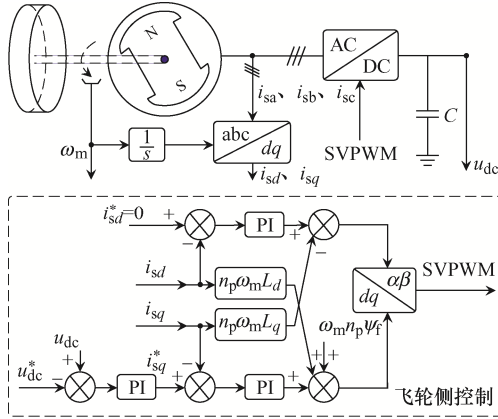


图 2 飞轮储能系统结构

Fig. 2 Structure of FESS

传统双闭环控制策略采用基于 PI 算法的电压外环和电流内环的级联方式^[17], 其数学模型为

$$\begin{cases} -i_{sq}^* = \left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) \\ u_d^* = \left(k_{ip} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{sd}^* - i_{sd}) - \omega_m n_p L_q i_{sq} \\ u_q^* = \left(k_{ip} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{sq}^* - i_{sq}) + \omega_m n_p L_d i_{sd} + \omega_m n_p \Psi_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{dc}^* 、 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 、 u_d^* 、 u_q^* 分别为直流母线电压、 d 、 q 轴电流和电压给定值; k_{up} 、 k_{ui} 、 K_{ip} 、 K_{ii} 分别为飞轮电压外环控制器和电流内环控制器的比例、积分项系数。

将式(3)分别代入式(2)和式(1), 在忽略电机损耗时化简可得

$$\left(k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) = \frac{C s u_{dc}^2}{3 \omega_m n_p \Psi_f} + \frac{2 u_{dc} (i_{Ldc} - i_{Gdc})}{3 \omega_m n_p \Psi_f} \quad (4)$$

式(4)表明, 在 FCS-FESS 工作过程中, 大功率

快速充电负荷瞬时接入产生的阶跃变化功率及飞轮转速的突然变化, 基于传统 PI 算法的 FESS 进行快速功率补偿时无法满足高性能动态响应需求, 而这些瞬态事件的发生会引起直流母线电压的跌落, 影响直流母线的电压稳定性。由于直流母线电压是衡量直流电网功率平衡及电能质量的主要指标^[18-19], 会对充电负荷的供电可靠性产生影响, 需要设计合理的 FESS 控制策略以减小冲击性负荷带来的负面影响。

2 直流快充站飞轮储能系统控制策略设计

2.1 快充站配置飞轮储能的非线性模型

根据有功功率平衡原则, 忽略电机及变流器损耗, FESS 采用 $i_d=0$ 的矢量控制^[20], 即

$$u_{dc} i_{Fdc} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = -\frac{3}{2} u_q i_{sq} \quad (5)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为储能侧变流器对应的相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为储能侧变流器对应的相电流。其中, 规定 i_{sq} 为正, 表示 FESS 充电; i_{sq} 为负, 表示 FESS 放电; i_{sq} 为 0, 表示 FESS 处于恒速待机状态。

由于电流 d 轴分量为 0, 忽略定子绕组 L_d 与微分项乘积对 FESS 的影响, 由式(1)、式(2)和式(5)可得, FCS-FESS 直流侧母线电压非线性方程为

$$(u_{dc}^2 - u_{dc}^{*2})' = \frac{-3 \omega_m n_p \Psi_f}{C} i_{sq} - \frac{3 R_s i_{sq}^2}{C} - 2 u_{dc} (i_{Ldc} - i_{Gdc}) \quad (6)$$

为方便被控系统设计并提高直流母线电压控制效果, 系统动态方程引入储能系统电流内环方程并采用解耦策略提高控制精度, 最大程度地减小外部状态变化时电流的瞬态跟踪误差。由式(2)可推导出 FESS 电机侧 q 轴电流环结构, 如图 3 所示。

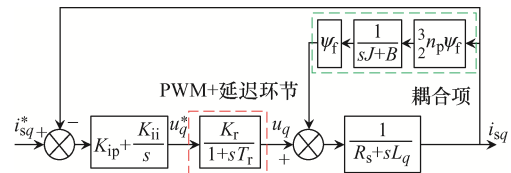


图 3 电机侧 q 轴电流环结构

Fig. 3 Structure of motor-side current loop in q -axis

根据图3, 电流环闭环传递函数为

$$\frac{i_{sq}(s)}{i_{sq}^*(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (7)$$

式中,

$$\begin{cases} N(s) = (K_r/R_s)(1+sJ/B)(sK_{ip} + K_{ii}) \\ D(s) = (1+sL_q/R_s)(1+sJ/B)(1+sT_r)s + \\ \quad K_{ii}K_r/R_s(1+sJ/B) + K_{ip}K_r(1+ \\ \quad sJ/B)s/R_s + (3n_p\psi_f^2s)(1+sT_r)/(2R_sB) \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_r 为 PWM 等效增益; J 为电机侧飞轮转子的转动惯量; B 为 q 轴的电感与定子的绕组电阻比值; T_r 为电流环电流采样周期。

在带宽频率处, 有 $(1+sT_r) \approx 1$; $(1+sT_m) \approx sT_m$, $T_m=J/B$; $(1+sT_a)(1+sT_r) \approx 1+s(T_a+T_r)$, $T_a=L_q/R_s$ 等近似条件成立。

根据上述近似条件进行拉氏反变换 (inverse Laplace transform), 式(7)可化简为

$$i_{sq}' = ai_{sq}^* - bi_{sq} \quad (9)$$

式中, a 、 b 为简化公式的系数, 一般情况下其数值为电流环带宽值。

联立式(6)和式(9)可得 FCS-FESS 仿射非线性系统动态方程为

$$\text{sys} \begin{cases} \dot{x}_1 = mx_2 - nx_2^2 - p \\ \dot{x}_2 = au - bx_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x=(x_1, x_2)$ 为系统状态变量, 其中 $x_1 = u_{dc}^* - u_{dc}^{*2}$, $x_2 = i_{sq}$; u 为系统的控制量, $u = i_{sq}^*$; $p = 2u_{dc} \cdot (i_{Ldc} - i_{Gdc})$; $m = -3\omega_m\psi_f/C$; $n = 3R_s/C$ 。

2.2 基于浸入与不变理论的优化控制策略设计

考虑非线性系统

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (11)$$

结合实际 FCS-FESS 对象模型, 有 $x = [x_1 \ x_2]^T$,

$$g(x) = [0 \ a]^T, \quad f(x) = \begin{bmatrix} 0 & m \\ 0 & -b \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 0 & n \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x^2 - \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}。$$

构建映射关系设计控制策略^[21] $\{\alpha: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^p, \Pi: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n, \varphi: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^{n-p}, \nu: \mathbb{R}^{n \times (n-p)} \rightarrow \mathbb{R}^m, c: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^m\}$, 通过寻找控制律 $u=\nu(x)$, 使系统可渐进稳定地收敛

到平衡点 x_1^* 。

基于浸入与不变理论设计方法选择一阶目标系统理想动态特性为

$$\dot{\zeta} = -\lambda_1\zeta \quad (12)$$

其中, 为保证系统全局渐进稳定, 当选取 λ_1 为正值时, 该系统具有渐进稳定的平衡点 $\zeta^*=0$ 。

考虑控制目标 x_1 和目标系统动态特性指定映射 $\Pi(\zeta)$ 选择为 $x_1=\zeta$ 。

考虑浸入与不变理论, 流形面 M 的隐式描述为

$$M = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \varphi(x) = 0\} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x = \pi(\zeta), \zeta \in \mathbb{R}^n\} \quad (13)$$

结合上述所选映射关系, 隐流形可表示为

$$\varphi(x) = mx_2 - nx_2^2 - p + \lambda_1x_1 \quad (14)$$

为保证流形吸引和轨迹有界, 根据浸入与不变理论设计要求, 需保证隐流形渐进收敛至平衡点, 即满足 $\varphi(x)=0$, 系统会渐进收敛至 $\dot{x}_1=-\lambda_1x_1$, 母线电压收敛到稳态值 u_{dc}^* 。此时为保证条件满足, 选择隐流形的动态行为满足 $\varphi'(x) = -\lambda_2\varphi(x)$ 。

那么对 $\varphi(x)$ 求导, 有

$$\dot{\varphi}(x) = (m - 2nx_2)(-bx_2 + au) + \lambda_1(mx_2 - nx_2^2 - p) \quad (15)$$

结合式(14)和式(15), FCS-FESS 的母线电压稳定控制律可设计为

$$u = \nu(x) = \frac{b}{a}x_2 - \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)\varphi(x) - \lambda_1^2x_1}{a(m - 2nx_2)} \quad (16)$$

可使 $\varphi'(x) = -\lambda_2\varphi(x)$, 其中 $\lambda_2 > 0$, $\varphi^* = 0$ 为全局稳定平衡点。

控制律 $\nu(x)$ 的选取应一方面建立起输出控制量 i_{sq}^* 与被控量母线电压的联系, 减少传统控制策略需设计的参数, 优化环路设计; 另一方面可使飞轮出力电流 i_{sq}^* 快速响应负荷侧变化。

对于 $\varphi(x)$ 函数, 非线性控制模型中包含充电负荷电流 i_{Ldc} 与 i_{Gdc} 及转速 ω_m , 从而使直流母线电压应对电流与转速变化具备快速响应能力。在实现大功率快充负荷接入和飞轮机械转速变化的情况下,

FESS 能快速响应外界因素变化, 快速稳定直流母线电压。

由状态变量 (φ, x_1, x_2) 及控制律 $v(x)$ 构成的闭环系统 $\dot{x}=f(x)+g(x)v(x)$ 可使母线电压误差在飞轮转速变化及负荷侧阶跃功率变化下快速平稳收敛到 0。

传统 PMSM 式 FESS 并网通过开关控制环节切换, 实现充放电运行模式转换^[22]。为增强传统并网结构源侧出力响应速度, 将储能转速变化信息引入网侧变流器控制, 从而实时调整源侧出力以有效消除传统运行模式切换造成的二次功率冲击, 因此电网侧 d 轴部分在 $d-q$ 坐标系下可得

$$i_{Gd}^* = \left(k_{pG} + \frac{k_{iG}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) + \left(k_{op} + \frac{k_{oi}}{s} \right) (\omega_{ref} - \omega) \quad (17)$$

式中: k_{pG} 、 k_{iG} 为网侧电压控制器比例、积分系数; k_{op} 、 k_{oi} 为转速信号比例、积分系数; ω 、 ω_{ref} 分别为飞轮储能转速的实际值与初始设定值。

3 系统建模和仿真验证

为验证所提控制策略用于 FCS-FESS 的有效性, 在 MATLAB/Simulink 软件环境下搭建如图 4 所示配置的基于浸入与不变理论 FCS-FESS 仿真控制模型, FCS-FESS 的仿真参数设置如表 1 所示。所提控制策略的参数为 $\lambda_1=100\pi$, $\lambda_2=200\pi$, $a=b=100\pi$, $k_{pG}=0.5$, $k_{iG}=5$, $k_{op}=0.06$, $k_{oi}=0.02$ 。

仿真设置电网系统由三相交流电源构成, 配备的飞轮储能系统采用永磁同步式电机作为飞轮电

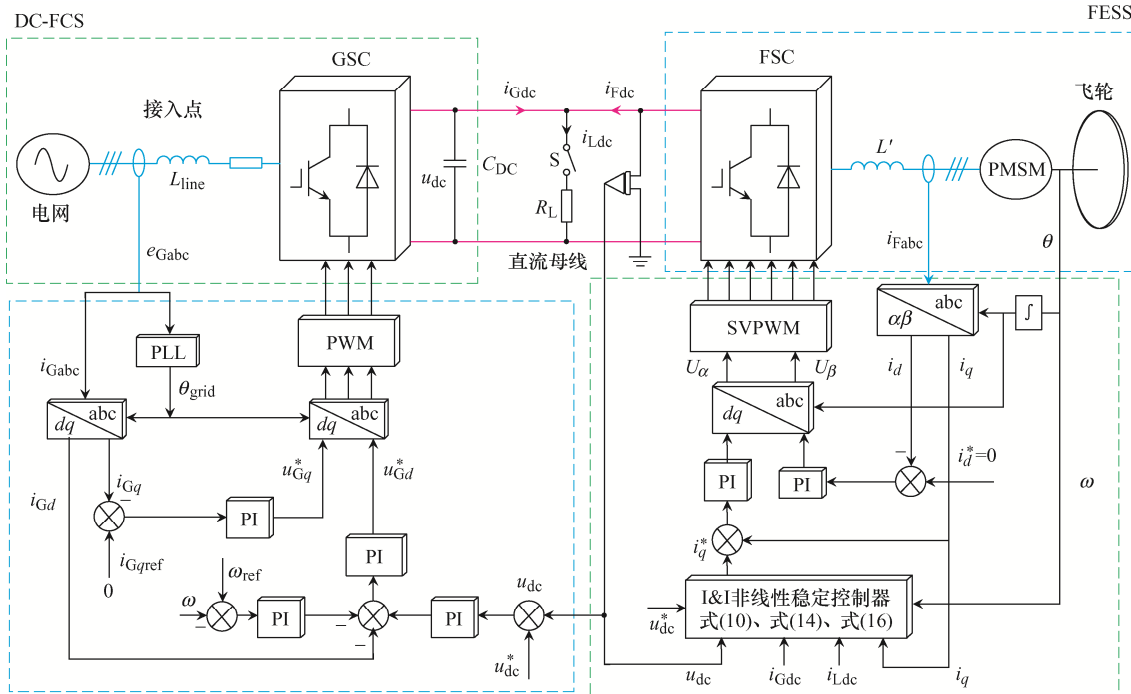


图 4 配置永磁同步式 FESS 的直流快速充电站

Fig. 4 DC fast charging station with PMSM-FESS

机来模拟相关特性。为了较好地模拟负荷侧冲击, 仿真中直流充电桩和电动汽车负荷采用恒值电阻 R_L 等效代替, 对应单台额定充电负荷功率和充电负荷的电流分别为 49 kW 与 70 A。

针对充电负荷接入瞬态进行仿真分析, 为验证所提控制策略的优越性和有效性, 设置 2 组仿真实验。

第 1 组仿真: 分析单台充电负荷接入时不同控制策略下电网输出功率与直流母线电压变化情况, 改进策略下 FCS-FESS 中各部分输出功率与飞轮机机械转速的变化情况; 策略 I 模拟无储能系统的普通 FCS 响应特性, 策略 II 模拟飞轮侧采用如图 2 所示传统 PI 控制的 FCS-FESS, 策略 III 模拟如图 4 所示采用基于浸入与不变理论充放电控制的 FCS-FESS。

表 1 系统仿真模型部分参数

Tab. 1 Part of parameters of system simulation model

参数	数值	参数	数值
电网线电压 e_{Gabc}/V	380	定子 $d-q$ 轴电感 L_{d-q}/mF	0.4
滤波电感 L/mH	2.085	定子相电阻 $R_s/m\Omega$	0.22
母线电压 u_{dc}/V	700	永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.128 6
母线电容 C/mF	4.0	转子转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	2.0
负载等效功率 P_L/kW	49	电机极对数 n_p	4
采样频率 f_s/kHz	10	电机初始转速 $\omega/(r \cdot min^{-1})$	5 000

第 2 组仿真: 分析多台充电负荷接入时不同控制策略下电网输出功率与直流母线电压的变化情况, 改进策略下 FCS-FESS 中各部分输出功率与飞轮机械转速的变化情况; 策略 I、策略 II、策略 III 同上。

3.1 单台充电负荷接入仿真结果与分析

第 1 组仿真结果如图 5 所示, 快充负荷在 0.5 s 接入充电。由图 5(a)和(c)可以看出: 由于策略 I 未配置 FESS, 导致电网输出功率在充电瞬间骤升, 同时直流母线电压跌落明显, 幅值达 120 V; 策略 II 下配置 FESS, 使得电网功率最大爬坡率降低至 700 kW/s, 直流母线电压跌落幅值降低至 49 V, 但采用传统控制策略的 FESS 不能及时动态响应负荷侧及储能系统转速变化, 在大功率负荷瞬时接入及储能动作时不能及时出力, 导致其优化效果仍存在局限性。

所提策略 III 通过构建转速及负荷侧与直流母线电压线性关系, 使得飞轮储能能够在负荷侧变化时快速出力并抑制自身转速变化带来的非线性影响, 从而使得电网功率爬坡率相比策略 I 和 II 有明显改善, 在充电初始阶段的电网功率最大上升速率降至 16.3 kW/s, 同时直流母线电压跌落值降低到 3.1 V, 调节时间缩短至 10 ms, 因此所提控制策略能够使母线电压在负荷与飞轮转速变化时的变化幅度更小和恢复时间更短; 由图 5(b)系统中各环节提供的能量可以看出, 本文所提策略 III 也能使 FESS 快速满足瞬态充电过程中的功率与能量平衡需求; 图 5(d)中飞轮转速达到 4 000 r/min 后进入充电模式,

以便为后续快充负荷接入提供功率补偿服务。

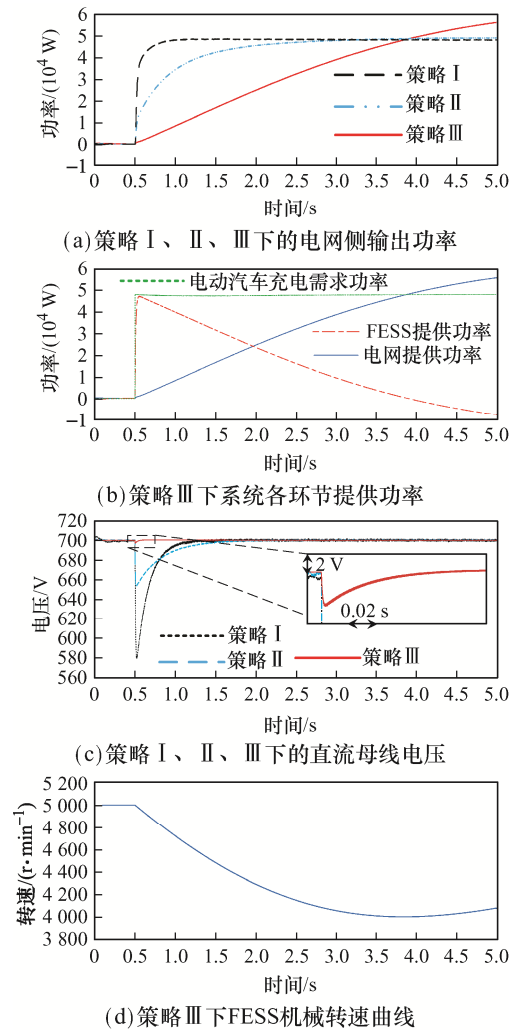


图 5 单台负荷接入时功率、直流母线电压与转速
Fig. 5 Grid power, DC-side bus voltage and speed under single-load access

3.2 多台充电负荷连续接入仿真结果与分析

第 2 组仿真结果如图 6 所示, 3 台充电负荷分别在 0.5、2.5、4.0 s 依次接入 FCS-FESS。由图 6(a)和(c)可以看出: 所提策略 III 可确保大功率负荷连续接入时 FCS-FESS 正常工作, 电网输出功率最大爬坡率和母线电压跌落幅值均显著优于策略 I 和策略 II。由图 6(b)和(d)可以看出, 在面临多台电动汽车接入充电的情况下, 策略 III 依然可使 FESS 系统提供快速功率补偿服务, 并可使 FESS 进入能量恢复状态, 避免了低转速状态 FESS 无法提供高功率输出的问题。由图 6(c)可以看出: 相较于策略 I 和策略 II, 策略 III 在负荷及飞轮转速变化情况

下依然能保持平稳的母线电压波形,提高直流侧母线电压质量;同时针对多台充电负荷连续接入的情况,由于网侧输出功率逐步提高,3种策略下的母线电压跌落均在第2台、第3台电动汽车接入时得到不同程度的缓解,故所提控制策略对多台电动汽车负荷接入的情况具有普适性。

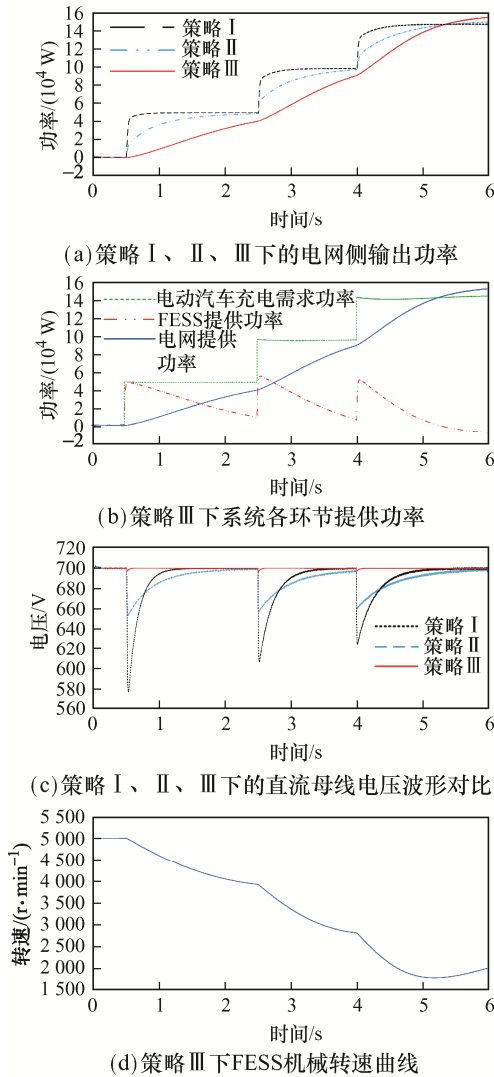


图 6 多台负荷接入时功率、直流母线电压与转速

Fig. 6 Grid power, DC-side bus voltage and speed under multi-load access

4 结论

本文以配置飞轮储能系统的直流快充站为研究对象,分析了系统动态方程的转速、负载电流等因素变化引发的母线电压跌落问题,提出了 1 种基

于浸入与不变理论的 FCS-FESS 充放电控制策略。对控制策略有效性进行单台及多台充电负荷瞬时接入仿真分析,得出如下结论。

(1)与传统控制策略相比,所提改进策略在面临大功率负荷接入充电时,可有效减缓电网输出功率爬坡率骤增并改善快充站直流母线电压大幅跌落问题,且母线电压在负荷与飞轮转速变化时的变化幅度更小和恢复时间更短。

(2)即使面临多台电动汽车充电负荷短时连续接入,FESS 仍可在所提控制策略下有效提供快速功率补偿服务,针对母线电压依然具有明显的补偿效果。本文研究有助于 FESS 在电动汽车快速充电领域的实际应用。

参考文献:

- [1] 王育飞, 蔡传高, 薛花. 基于改进 NSGA-II 的社区电动汽车充电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 109-115.
Wang Yufei, Cai Chuangao, Xue Hua. Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 109-115 (in Chinese).
- [2] 王亮, 汤佩文, 颜伟, 等. 电动汽车充电桩对电能质量和电磁环境的影响[J]. 电源学报, 2017, 15(3): 91-99.
Wang Liang, Tang Peiwen, Yan Wei, et al. Influence on power quality and electromagnetic environment to electric vehicle charging pile [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(3): 91-99 (in Chinese).
- [3] Dragicovic T, Sucic S, Vasquez J C, et al. Flywheel-based distributed bus signalling strategy for the public fast charging station [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2825-2835.
- [4] 王育飞, 王成龙, 薛花, 等. 计及源-储-荷功率特性的飞轮储能系统容量配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 119-124, 132.
Wang Yufei, Wang Chenglong, Xue Hua, et al. Capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 119-124, 132 (in Chinese).

- [5] 任京攀, 马宏伟, 姚明清. 基于粒子群算法的飞轮阵列协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 381-388.
Ren Jingpan, Ma Hongwei, Yao Mingqing. A coordinated control strategy of flywheel array based on particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 381-388 (in Chinese).
- [6] Mousavi G S M, Faraji F, Majazi A, et al. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 477-490.
- [7] 张丹, 姜建国, 陈鹰, 等. 地铁牵引供电系统中高速飞轮储能系统控制研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 1-8.
Zhang Dan, Jiang Jianguo, Chen Ying, et al. Research on control strategy of high speed flywheel energy storage system in metro traction power supply system [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 1-8 (in Chinese).
- [8] 陈玉龙, 武鑫, 滕伟, 等. 用于风电功率平抑的飞轮储能阵列功率协调控制策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 600-608.
Chen Yulong, Wu Xin, Teng Wei, et al. Power coordinated control strategy of flywheel energy storage array for wind power smoothing [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 600-608 (in Chinese).
- [9] Sun B, Dragičević T, Freijedo F D, et al. A control algorithm for electric vehicle fast charging stations equipped with flywheel energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6674-6685.
- [10] Yeoh S S, Rashed M, Sanders M, et al. Variable-voltage bus concept for aircraft electrical power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5634-5643.
- [11] 王成龙, 王育飞, 薛花. 基于负载电流补偿与转速反馈的飞轮储能系统控制策略[J]. 电力建设, 2019, 40(3): 51-58.
Wang Chenglong, Wang Yufei, Xue Hua. Control strategy of flywheel energy storage system based on load current compensation and speed feedback [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(3): 51-58 (in Chinese).
- [12] 许振宇, 石梦璇, 周建宇, 等. 基于飞轮储能的网/储协调虚拟同步机控制策略的小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6236-6248.
Xu Zhenyu, Shi Mengxuan, Zhou Jianyu, et al. Small signal model analysis of network/storage coordination virtual synchronous generator control based on flywheel energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6236-6248 (in Chinese).
- [13] 程启明, 徐聪, 程尹曼, 等. 基于混合储能技术的光储式充电站直流微网系统协调控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2073-2083.
Cheng Qiming, Xu Cong, Cheng Yinman, et al. Coordination control of PV charging station DC microgrid system based on hybrid energy storage technology [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2073-2083 (in Chinese).
- [14] Blasko V, Kaura V. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 116-123.
- [15] 于佳丽, 梁燕, 万健如. 三相电压型 PWM 整流器解耦控制研究[J]. 电源学报, 2015, 13(4): 15-23.
Yu Jiali, Liang Yan, Wan Jianru. Research on decoupling control of three-phase voltage source PWM rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(4): 15-23 (in Chinese).
- [16] Wang Yufei, Wang Chenglong, Xue Hua. A novel capacity configuration method of flywheel energy storage system in electric vehicles fast charging station [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 195: 107185.
- [17] 陈云龙, 杨家强, 张翔. 一种计及总损耗功率估计与转速前馈补偿的飞轮储能系统放电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2358-2368, 2414.
Chen Yunlong, Yang Jiaqiang, Zhang Xiang. A discharge strategy for flywheel energy storage systems based on feedforward compensation of observed total dissipative power and rotational speed [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2358-2368, 2414 (in Chinese).
- [18] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-98.
Wang Chengshan, Li Wei, Wang Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98 (in Chinese).

- [19] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513, 647.
Tang Yi, Zheng Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513, 647 (in Chinese).
- [20] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [21] Astolfi A, Karagiannis D, Ortega R. Nonlinear and Adaptive Control with Applications [M]. London: Springer London, 2008.
- [22] 宋兆鑫, 张建成, 赵霁晴, 等. 改进型滑模观测器飞轮储能系统控制方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 36-42.
Song Zhaoxin, Zhang Jiancheng, Zhao Jiqing, et al. Flyw-

heel energy storage system control method based on the improved sliding mode observer [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(5): 36-42 (in Chinese).



韩磊

作者简介:

韩磊(1996—), 男, 中国电源学会会员, 通信作者, 硕士研究生。研究方向: 飞轮储能应用技术、电动汽车快速充电。E-mail: 15857177249@163.com。

王育飞(1974—), 男, 博士, 教授。研究方向: 电力储能应用技术、电能质量分析与控制、电动汽车有序充电。E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn。

薛花(1979—), 女, 博士, 副教授。研究方向: 电能质量分析、电机控制。E-mail: xuehua@shiep.edu.cn。

(上接第 259 页)

- 响因素[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(6): 813-816.
Zhang Qingsong, Bai Wei. Factors affecting the safety of lithium manganese batteries in air transport of cold-chain cargo [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(6): 813-816 (in Chinese).
- [18] 陈婕, 孙均利, 赵敏. 锂离子电池火灾实验及残留物热重分析[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(11): 1542-1544.
Chen Jie, Sun Junli, Zhao Min. Fire test of lithium-ion battery and residue TG analysis [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(11): 1542-1544 (in Chinese).
- [19] Dangerous Goods Regulations, (IATA-Resolution 618 Attachment" A"), 58th Edition [S].
- [20] Shin J S, Han C H, Jung U H, et al. Effect of Li_2CO_3 additive on gas generation in lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 47-52.
- [21] Pasquier A D, Disma F, Bowmer T, et al. Differential scanning calorimetry study of the reactivity of carbon

anodes in plastic Li-ion batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1998, 145(2): 472-477.

- [22] Aurbach D, Zaban A, Gofer Y, et al. Recent studies of the lithium-liquid electrolyte interface Electrochemical, morphological and spectral studies of a few important systems [J]. Journal of Power Sources, 1995, 54(1): 76-84.



李明浩

作者简介:

李明浩(1995—), 男, 中国电源学会学生会会员, 硕士研究生。研究方向: 锂离子电池热安全。E-mail: lmh_fly688@163.com。

黎桂树(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 锂离子电池健康状态监测。E-mail: 243875887@qq.com。

谢松(1986—), 男, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 航空电源与安全。E-mail: xiesongam@163.com。