

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.015

基于改进虚拟惯性控制的直流充电桩控制方法

杨成顺¹, 王鹏¹, 许德智², 黄宵宁¹

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 直流充电桩充电速度快、效率高的优点使得电动汽车负载可以频繁投切,但其作为直流系统具有惯性小、阻尼弱的特点。为降低电动汽车负载投切对直流侧电压扰动的影响,文中提出一种基于改进虚拟惯性(virtual inertia, VI)控制的直流充电桩控制方法。首先,类比虚拟同步机(virtual synchronous machine, VSM)技术推出VI控制,赋予直流系统一定的惯性与阻尼支撑。其次,采用指令滤波反推积分滑模(command filter backstepping integral sliding mode, CFBISM)控制对VI控制进行改进,即采用积分滑模(integral sliding mode, ISM)控制优化VI控制,增强系统的鲁棒性,并采用指令滤波反推控制对其中关键参数进行重构,避免控制器出现计算膨胀现象,同时对电流内环采用改进ISM控制从而进一步提升控制效果。然后,通过Lyapunov稳定性判据证明所提控制方法的稳定性。最后,通过仿真对比验证了文中所提控制方法可将直流侧电压波动限制在2V以内,动态响应速度提高约0.1s,关键参数在稳态时的扰动限制在1V左右,从而验证了其响应速度快、鲁棒性好的特性。

关键词: 虚拟惯性(VI)控制; 直流充电桩; 电动汽车; 反推控制; 指令滤波; 积分滑模(ISM)控制

中图分类号: TM461; U491.8

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0150-10

0 引言

电动汽车近年来已成为兼顾绿色交通与助推经济发展的新兴产业^[1-3]。在电动汽车配套充电设施中,直流充电桩具有充电速度快、实用性高等优点,其建设量连年激增,有望成为未来充电桩的主要发展方向^[4-7]。然而,在实际应用中,充电桩整流器的工作环境并非一成不变,受环境温度和线路老化等不确定因素影响,负载电池的欧姆特性呈非线性,变化范围较大,对于多枪充电桩而言,短时充电将带来负载接入与切出较频繁的问题。因此,使充电桩整流器能快速响应负载侧变化并保证直流侧电压稳定、及时调整有功输出是研究直流充电桩控制性能的主要问题^[8-9]。

目前对于直流充电桩整流器的研究主要集中在基于比例积分(proportion integration, PI)控制的电压电流双闭环控制、下垂控制等,例如文献[10]在传统电压电流双闭环控制的基础上,通过模糊控制改进了电流内环,能在负载侧工况稳定时提供足够的功率,然而对于负载变化较复杂的系统,这类控制方法在参数整定、抗干扰能力等方面有一定不足^[11-12]。

直流充电桩作为典型直流系统,易受到负载侧功率波动、故障扰动等因素影响,其原因在于直流

系统具有小惯性特点^[13-17]。为增强直流系统惯性,通常选择在直流侧并联储能环节或采用特殊控制方法改变变流器两端的交换功率,例如文献[18]通过在直流侧增加储能单元来模拟直流侧电容稳压特点,从而增强直流系统惯性,但该方法对储能环节的控制要求较高且造价成本也较高。

虚拟同步机(virtual synchronous machine, VSM)技术通过模拟传统同步机运行机理,在系统控制中增加定、转子运行方程,可为系统新增惯性与阻尼特征,有效稳定负载侧变化带来的频率与电压波动^[19-20]。针对直流系统小惯性、弱阻尼的不足,文献[21]提出一种模拟同步机定、转子运行机理,为直流充电桩提供惯性的控制方法,但其主要依据交流侧频率波动及其变化率调节直流侧有功输出,对直流系统不具有普遍适用性。文献[22]通过分析交、直流系统中部分关键参数的对应关系,类比VSM技术推理出了一种虚拟惯性(virtual inertia, VI)控制策略,通过模拟电容运行特性,在直流侧并联一个虚拟的电容,增大电容值从而为直流系统新增一定的惯性与阻尼特性,该策略能够很大程度上平抑负载变化对直流电压的扰动影响。在文献[22]的基础上,文献[23-24]通过分析虚拟电容与直流电压的关系,提出了灵活虚拟惯性(flexible virtual inertia, FVI)控制方法,利用自适应控制调整虚拟电容值大小,改善了系统的动态性能。文献[25]综合考虑变流器输出功率和蓄电池荷电状态等影响因素,细化了虚拟电容值的自适应调节策

收稿日期:2024-02-08;修回日期:2024-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62222307, 619731-40)

略,取得了良好的控制效果。然而通过对参数自适应控制以优化直流侧电压动态响应的效果是有限的。此外,上述文献均采用基于PI控制的电流内环,VI控制的动态性能仍具有改善的空间。

针对上述问题,文中采用指令滤波反推积分滑模(command filter backstepping integral sliding mode, CFBISM)控制方法对VI控制进行改进。首先,在VI控制的基础上,利用积分滑模(integral sliding mode, ISM)控制对其进行改进,采用Sigmoid函数取代原符号函数,削弱滑模控制的抖振影响,增强负载突变时的系统鲁棒性。随后,为防止ISM模块出现输入饱和或计算膨胀的问题,采用指令滤波反推控制对其中关键参数进行重构。最后,利用ISM控制对基于PI控制的电流内环进行改进,将上述改进的控制方法整合得到CFBISM-ISM控制方法,进一步改善系统动态性能。

1 电动汽车直流充电站结构

电动汽车直流充电站结构如图1所示,当直流充电站运行于并网模式时,直流充电桩连接公共直流母线并采用直流侧恒压控制,用于平衡电动汽车负载变动时直流系统的电压波动和功率盈缺,通过后级Buck-Boost电路为电动汽车提供充电服务。可再生资源系统与储能系统连接公共直流母线电压,可在系统正常运行时起辅助稳压与存储多余电能的作用,并能在直流充电桩退出系统时短时运行,保障充电过程的安全稳定^[26]。

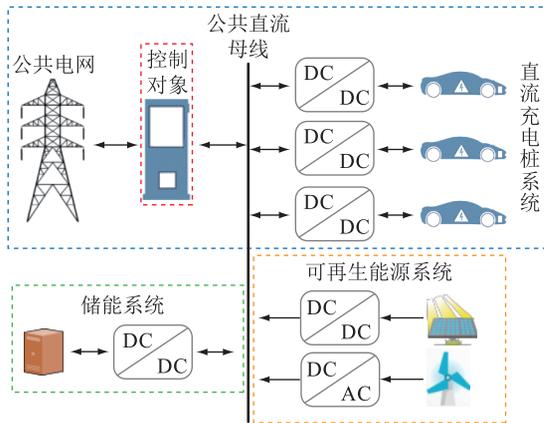


图1 电动汽车直流充电站结构

Fig.1 Electric vehicle DC charging station structure

文中将着重分析直流充电桩并网模式下CFBISM-ISM控制方法的控制效果。因此,为直观地观测控制策略的有效性,文中不再考虑储能系统与可再生能源系统的辅助调压作用,将直流侧Buck-Boost电路与电动汽车统一看作电动汽车负载,并将其等效为电阻。

2 CFBISM 改进的 VI 控制器设计

2.1 VI 控制策略

交流系统中VSM技术通过模拟传统同步机转动惯性和阻尼特征,引入虚拟惯量 J 为系统提供虚拟惯性,当系统电网侧频率突变或负载侧出现扰动时,虚拟惯性能够快速调节有功输出,平抑频率与电压波动,其转子运动方程可表示为:

$$T_m - T_e - D(\omega - \omega_n) = J \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} \quad (1)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为VSM模拟机械转矩与电磁转矩; D 为虚拟阻尼,能够反映系统阻尼程度; J 为表示系统惯性程度的虚拟惯量; ω 、 ω_n 分别为VSM角频率与额定频率; t 为时间。

交流系统的惯性体现为维持系统频率稳定的能力,传统同步机通过转子储存能量,当频率失稳时通过调整有功出力保障交流侧频率稳定。对于直流系统而言,其惯性体现为系统平抑电压波动的能力,当电压波动时,直流侧并联电容中储存的能量可为系统提供有功支撑,维持电压稳定。

因此,直流系统可模拟电容器充放电过程,增加虚拟电容 C_v 从而为系统提供惯性,同时类比VSM增加虚拟阻尼从而为系统提供阻尼特性。虚拟电容充放电过程可表示为:

$$I_{set} - I - D(u^* - u) = C_v \frac{du^*}{dt} \quad (2)$$

式中: I_{set} 为虚拟电容输出的额定电流; I 为直流侧电流; u 为直流侧电压; u^* 为VI控制输出电压。

在上述方法下直流系统已新增了一定的惯性与阻尼特性,将式(2)中 $I_{set} - I$ 改为电压-电流下垂控制,可通过调整下垂系数使系统更快到达平衡,进一步得到VI控制策略为:

$$k(u_{set} - u) - I - D(u^* - u) = C_v \frac{d(u^* - u)}{dt} \quad (3)$$

式中: k 为下垂系数; u_{set} 为直流侧额定电压。

由式(3)可知,当直流侧电压偏离额定电压时,虚拟电容 C_v 通过充放电过程可有效抑制电压波动,为直流系统提供一定的惯性。虚拟阻尼 D 将赋予直流系统阻尼特性,抑制系统电压振荡。下垂系数 k 的存在将调节输出电流,帮助系统更快地恢复稳定。

2.2 CFBISM 控制器设计

目前对于提升VI控制的研究,大多都是通过分

析虚拟电容和虚拟阻尼 2 个参数大小对系统电压动态响应的影响,从而得到在电压波动的不同阶段对虚拟参数进行自适应控制的 FVI 控制。然而,对虚拟参数进行自适应控制以优化直流侧电压动态响应的效果是有限的,因此需要引入高级控制策略对 VI 控制进行改进,以进一步优化控制效果。滑模控制可在动态过程中根据系统当前状态有目的地不断变化,使控制策略具有快速响应和强鲁棒性等优点,因此考虑采用滑模控制对 VI 控制策略进行改进^[27-29]。

首先,考虑到虚拟控制电压外环向电流内环输入的信号为 VI 控制输出电压与直流侧电压之差 $u^* - u$,因此定义变量 $x_1 = u$ 、 $x_2 = u^* - u$,式(3)可改写为:

$$\dot{x}_1 = \dot{u}^* - \frac{1}{C_v} [k(u_{set} - x_1) - I - Dx_2] \quad (4)$$

定义系统扰动时电压波动误差为:

$$z_1 = x_1 - u_{set} \quad (5)$$

为增强 VI 控制效果,设计电压外环积分滑模面为:

$$S_1 = z_1 + \mu_1 \int_0^t z_1 dt \quad (6)$$

式中: μ_1 为正的电压外环积分滑模面参数。

电压外环积分滑模趋近率为:

$$\dot{S}_1 = -k_1 S_1 - k_2 \text{sig}(S_1) \quad (7)$$

式中: k_1 、 k_2 为 CFBISM 控制器参数,其值为正; $\text{sig}(\cdot)$ 为 Sigmoid 函数。

文中采用 Sigmoid 函数作为切换函数,以代替传统符号函数。当滑模面接近 0 时,采用 Sigmoid 函数可以避免由于控制信号过大导致滑模面到 0 后又快速偏离的问题,从而起到削弱滑模抖振的作用^[30-31]。

Sigmoid 函数可表示为:

$$\text{sig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-\sigma x}} - 1 \quad (8)$$

式中: σ 为正常数,可通过调整其大小来调整 Sigmoid 函数收敛速度。

基于式(4)、式(5),对式(6)求导可得:

$$\dot{S}_1 = \dot{z}_1 + \mu_1 z_1 = \dot{u}^* - \frac{1}{C_v} (-kz_1 - I - Dx_2) + \mu_1 z_1 \quad (9)$$

为保障系统稳定性,设计滑模控制器,定义 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} S_1^2 \quad (10)$$

结合式(7)、式(9),对式(10)求导可得:

$$\dot{V}_1 = S_1 \dot{S}_1 = -k_1 S_1^2 - k_2 S_1 \text{sig}(S_1) + S_1 \left[\dot{u}^* - \frac{1}{C_v} (-kz_1 - I - Dx_2) + \mu_1 z_1 + k_1 S_1^2 + k_2 S_1 \text{sig}(S_1) \right] \quad (11)$$

根据式(11)与 Lyapunov 稳定性定理,设计滑模控制器,如式(12)所示,控制框图见图 2。

$$x_2 = -\frac{C_v}{D} (\dot{u}^* + \mu_1 z_1 + k_1 S_1^2 + k_2 S_1 \text{sig}(S_1)) - \frac{1}{D} (kz_1 + I) \quad (12)$$

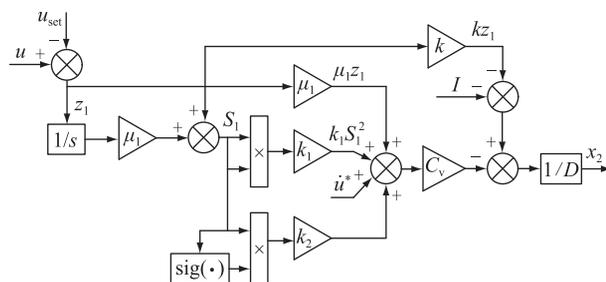


图 2 虚拟惯性积分滑模控制框图

Fig.2 Virtual inertial integral sliding mode control block diagram

式(3)中, u^* 为 VI 控制计算出的虚拟值,用于辅助平抑电压波动,稳态时 u^* 会在 u 值附近频繁波动,负载侧变化时 u^* 的计算经历了积分环节并且需要加上变化的 u 。而式(12)中, \dot{u}^* 为 u^* 的导数值,若直接对由 VI 控制求出的 u^* 进行求导,则计算的数量级较为庞大,可能会导致滑模模块的计算膨胀问题,因此文中采用指令滤波反推控制对滑模中的 \dot{u}^* 进行计算,并考虑滤波误差设计补偿误差信号^[32]。

定义 $x_3 = \dot{u}^*$,由式(4)、式(5)可得:

$$\dot{x}_1 = x_3 + \frac{k}{C_v} z_1 + \frac{1}{C_v} I + \frac{D}{C_v} x_2 \quad (13)$$

选择 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (14)$$

对式(14)求导并代入误差 z_1 的导数得:

$$\dot{V}_2 = z_1 \dot{z}_1 = -k_3 z_1 + z_1 \left[x_3 + \left(\frac{k}{C_v} + k_3 \right) z_1 + \frac{1}{C_v} I + \frac{D}{C_v} x_2 \right] \quad (15)$$

式中: k_3 为大于 0 的常数。根据 Lyapunov 渐进稳定性原理, x_3 应被设计为:

$$x_3^d = - \left[\left(\frac{k}{C_v} + k_3 \right) z_1 + \frac{1}{C_v} I + \frac{D}{C_v} x_2 \right] \quad (16)$$

式中: x_3^d 为反推模块输出 x_3 的信号。

指令滤波器的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^c \\ \ddot{x}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_d^2 & -2\zeta\omega_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^c \\ \dot{x}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_d^2 \end{bmatrix} x^d \quad (17)$$

式中: x^c 、 x^d 分别为经过指令滤波器的输出与输入信号; \dot{x}^c 、 \ddot{x}^c 分别为输出信号的导数与二阶导数; ω_d 、 ζ 分别为指令滤波器的带宽与阻尼。指令滤波器的结构如图 3 所示。

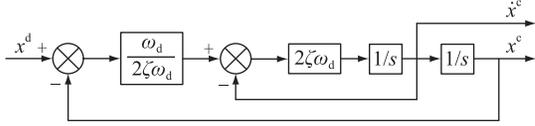


图 3 指令滤波器结构

Fig.3 Command filtering structure

由于输出信号 x^c 经指令滤波器后与输入信号 x^d 之间存在滤波误差,因此设计滤波误差 ε 为:

$$\dot{\varepsilon} = -k_3\varepsilon + x_3^c - x_3^d \quad (18)$$

式中: x_3^c 为指令滤波模块输出 x_3 的信号。

重新定义电压追踪误差为:

$$\bar{z}_1 = z_1 - \varepsilon \quad (19)$$

考虑滤波误差后,采用误差 \bar{z}_1 代替式(16)中的 z_1 ,根据式(13)、式(18)可得误差 \bar{z}_1 的导数方程如式(20)所示,虚拟惯性指令滤波反推控制框图如图 4 所示。

$$\begin{aligned} \dot{\bar{z}}_1 &= \dot{z}_1 - \dot{\varepsilon} = x_3 + \frac{k}{C_v}z_1 + \frac{1}{C_v}I + \frac{D}{C_v}x_2 + \\ &k_3\varepsilon - x_3^c + x_3^d = -k_3\bar{z}_1 + x_3 - x_3^c \end{aligned} \quad (20)$$

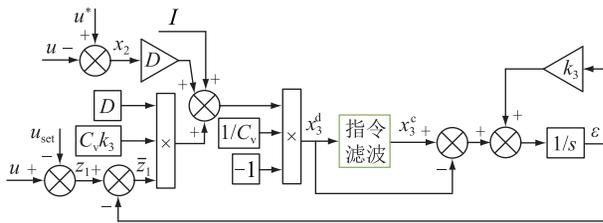


图 4 虚拟惯性指令滤波反推控制框图

Fig.4 Virtual inertial instruction command filter backstepping control block diagram

2.3 ISM 电流环控制器设计

目前,VI 控制大多使用以 PI 控制为基础的电流内环,然而,直流充电桩系统的负载投切相对频繁,电流内环 PI 控制器虽然有一定的电流跟随性,能够保障系统在静态下平稳运行,但其抗扰动的能力较弱,平抑电压暂态波动的效果较差。因此,为进一步提升 VI 控制的控制效果并增强直流系统的鲁棒性,文中设计了一种基于滑模控制的 ISM 电流环控制器。

直流充电桩整流器模块的电流内环在 dq 坐标系下的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}e_d - \frac{1}{L}uS_d + \omega i_q - \frac{R}{L}i_d \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}e_q - \frac{1}{L}uS_q - \omega i_d - \frac{R}{L}i_q \end{cases} \quad (21)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为交流侧电流的 d 、 q 轴分量; L 、 R 分别为交流侧变压器至整流器的滤波电感与线路电阻; e_d 、 e_q 分别为交流侧电压的 d 、 q 轴分量; S_d 、 S_q 分别为 d 、 q 轴的开关信号。

为实现 dq 坐标系下电流跟踪,定义电流追踪误差 z_2 、 z_3 为:

$$\begin{cases} z_2 = i_d - i_d^* \\ z_3 = i_q - i_q^* \end{cases} \quad (22)$$

式中: i_d^* 为 CFBISM 模块输出 u^* 与 u 之差经 PI 控制环节得到的内环参考电流; i_q^* 为 q 轴电流参考值,通常数值为 0。

为提升电流环控制模块鲁棒性,设计电流内环积分滑模面为:

$$\begin{cases} S_2 = z_2 + \mu_2 \int_0^t z_2 dt \\ S_3 = z_3 + \mu_3 \int_0^t z_3 dt \end{cases} \quad (23)$$

式中: μ_2 、 μ_3 为正的电流内环积分滑模面参数。

电流内环积分滑模趋近率设计为:

$$\begin{cases} \dot{S}_2 = -k_4S_2 - k_5\text{sig}(S_2) \\ \dot{S}_3 = -k_6S_3 - k_7\text{sig}(S_3) \end{cases} \quad (24)$$

式中: k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 为 ISM 电流环控制器参数,其值均为正。

为稳定电流环,建立 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = \frac{1}{2}S_2^2 + \frac{1}{2}S_3^2 \quad (25)$$

结合式(21)、式(23)和式(24),对式(25)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= S_2\dot{S}_2 + S_3\dot{S}_3 = S_2(\dot{z}_2 + \mu_2z_2) + S_3(\dot{z}_3 + \mu_3z_3) = \\ &-k_4S_2^2 - k_5S_2\text{sig}(S_2) - k_6S_3^2 - k_7S_3\text{sig}(S_3) + \\ &S_2[k_4S_2 + k_5S_2\text{sig}(S_2) + (e_d - uS_d - Ri_d)/L + \\ &\omega i_q - i_d^* + \mu_2z_2] + S_3[k_6S_3 + k_7S_3\text{sig}(S_3) + \\ &(e_q - uS_q - Ri_q)/L - \omega i_d + \mu_3z_3] \end{aligned} \quad (26)$$

根据式(26)和 Lyapunov 渐进稳定性定理,设计滑模电流环的 d 、 q 轴控制器,分别如式(27)、式(28)所示,ISM 电流内环控制框图如图 5 所示。

$$\begin{aligned} S_d &= [L(k_4S_2 + k_5S_2\text{sig}(S_2)) + \omega i_q - \\ &i_d^* + \mu_2z_2] + e_d - i_dR / u \end{aligned} \quad (27)$$

$$S_q = [L(k_6 S_3 + k_7 S_3 \text{sig}(S_3) - \omega i_d + \mu_3 z_3) + e_q - i_q R] / u \quad (28)$$

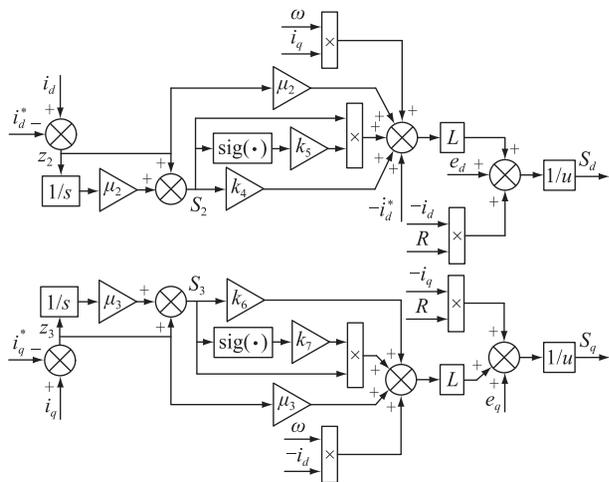


图5 ISM 电流内环控制框图

Fig.5 ISM current inner loop control block diagram

利用上述所求开关信号 S_d 、 S_q 构造滑模电流环控制器, 取代原本基于 PI 控制的电流环, 能够进一步提升系统鲁棒性与控制效果。以 CFBISM 改进的 VI 控制为电压外环, 以 ISM 电流环为电流内环的 CFBISM-ISM 控制框图如图 6 所示, 通过脉宽调制 (pulse-width modulation, PWM) 信号对交流/直流 (AC/DC) 模块进行控制, 将交流三相端电压 e_a 、 e_b 、 e_c 整流后通过直流/直流 (DC/DC) 变换器实现汽车侧电压稳定。图 6 中, C 为直流侧并联电容; C_0 为交流侧滤波电容; I_c 为整流后的输入电流。

3 稳定性分析与证明

基于 Lyapunov 渐进稳定性定理对整体系统的

稳定性进行分析, 其中包括指令滤波反推控制模块、虚拟惯性积分滑模控制模块以及滑模电流环模块。首先建立 Lyapunov 函数为:

$$V_4 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} S_1^2 + \frac{1}{2} S_2^2 + \frac{1}{2} S_3^2 \quad (29)$$

根据式 (9)、式 (20)、式 (23) 和式 (24), 对式 (29) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & \bar{z}_1 \dot{z}_1 + S_1 \dot{S}_1 + S_2 \dot{S}_2 + S_3 \dot{S}_3 = \\ & -k_3 \bar{z}_1^2 + \bar{z}_1 (x_3 - x_3^c) - k_1 S_1^2 - k_2 S_1 \text{sig}(S_1) - \\ & k_4 S_2^2 - k_5 S_2 \text{sig}(S_2) - k_6 S_3^2 - k_7 S_3 \text{sig}(S_3) \end{aligned} \quad (30)$$

定义误差 $z_4 = x_3 - x_3^c$, $0 < \gamma < 1$, 则存在如下不等式关系:

$$\begin{aligned} -k_3 \bar{z}_1^2 + \bar{z}_1 (x_3 - x_3^c) &= -k_3 \bar{z}_1^2 + \bar{z}_1 z_4 \leq \\ & -k_3 (1 - \gamma) \bar{z}_1^2 - k_3 \gamma |\bar{z}_1|^2 + |\bar{z}_1| |z_4| \end{aligned} \quad (31)$$

若令 $-k_3 \gamma |\bar{z}_1|^2 + |\bar{z}_1| |z_4| \leq 0$, 即 $|\bar{z}_1| \geq |z_4| / (k_3 \gamma)$, 则可以得到:

$$-k_3 \bar{z}_1^2 + \bar{z}_1 (x_3 - x_3^c) \leq -k_3 (1 - \gamma) \bar{z}_1^2 \quad (32)$$

此外, 由 Sigmoid 函数定义可知, $S_1 \text{sig}(S_1) \geq 0$ 、 $S_2 \text{sig}(S_2) \geq 0$ 、 $S_3 \text{sig}(S_3) \geq 0$ 。综合上述结论, 式 (30) 中 \dot{V}_4 存在如下不等式关系:

$$\dot{V}_4 \leq -k_3 (1 - \gamma) \bar{z}_1^2 - k_1 S_1^2 - k_4 S_2^2 - k_6 S_3^2 \leq 0 \quad (33)$$

综上所述, 整体系统是渐进稳定的。

4 仿真结果与分析

为验证所提控制方法的有效性, 以包含 1 台充

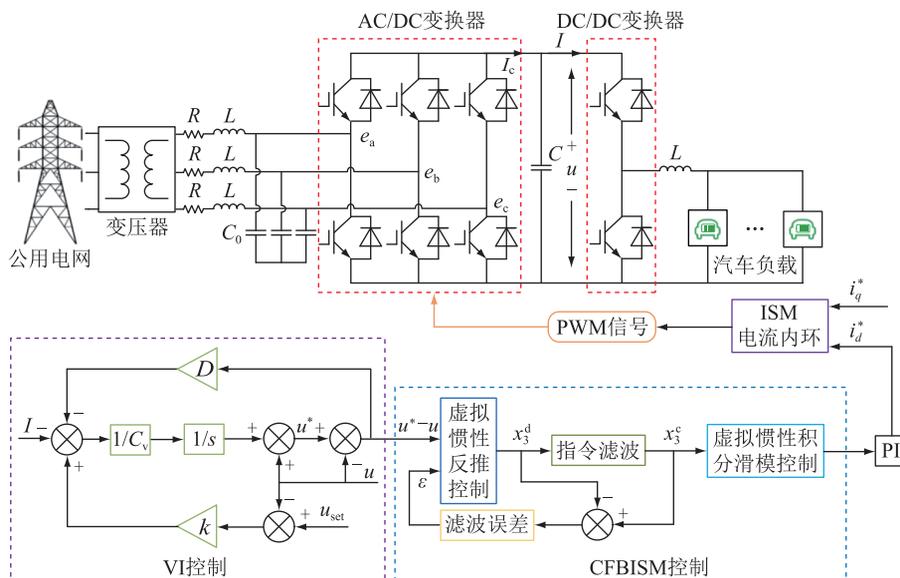


图6 CFBISM-ISM 控制器结构

Fig.6 CFBISM-ISM controller architecture

电桩和5只充电枪的直流充电桩系统为研究对象,采用图6所示的控制方法,利用MATLAB/Simulink对文中所提控制方法进行仿真分析。直流侧的额定电压设置为750V,将后续DC/DC电路与电动汽车负载统一看作电动汽车负载。文中首先考虑1台充电桩与2台电动汽车负载,通过与传统控制方法比较,验证所提控制的优越性。随后考虑1台充电桩与5台电动汽车负载的负载投切情况。在直流充电桩系统运行过程中,仿真分析多种电动汽车负载可发生的投切情形,并根据负载变化引起的充电桩直流侧电压和输出功率变化来验证文中所提控制方法的有效性。系统部分仿真参数如表1所示。

表1 直流充电桩系统仿真参数
Table 1 Simulation parameters for DC charging pile systems

仿真参数	数值
滤波电感 L/mH	1
滤波电阻 R/Ω	0.01
虚拟电容 $C_v/\mu\text{F}$	2 000
直流侧并联电容 $C/\mu\text{F}$	1 000
虚拟阻尼 D	200
下垂系数 k	1 000
外环控制器参数 k_1, k_2, k_3, μ_1	100, 50, 1 000, 0.1
ISM 电流环控制器参数 $k_4, k_5, k_6, k_7, \mu_2, \mu_3$	80, 1 000, 80, 2 000, 1 000, 50
每辆汽车负载所需功率/kW	187
电网电压/kV	35
交流侧变压器变比	35 kV/5 kV

4.1 汽车负载投切时不同控制方法性能比较

为验证文中所提CFBISM-ISM控制方法的优越性,研究电动汽车负载投切时,采用CFBISM、FVI及VI控制的系统直流侧电压变化,在此基础上分别加入ISM电流环,并与原控制方法进行对比。仿真结果如图7所示。

由图7(a)可知,在 $t=3\text{ s}$ 和 $t=4\text{ s}$ 时系统分别接入与切出1台电动汽车负载,在采用基于PI控制的电流环的前提下,采用VI控制与FVI控制的系统直流侧电压变化幅度均约为10V,且能在0.3s内恢复稳定,其中利用参数自适应调节的FVI控制系统超调量更小;而采用CFBISM控制的系统电压波动可被限制在3V以内,且系统动态响应的速度更快,具有较好的鲁棒性。此外,当系统采用滑模控制改进的ISM电流环时,3种控制方法下的直流侧电压超调量都可再度降低。其中,CFBISM-ISM控制方法下的直流侧电压波动可被抑制在1.5V以内。由图7(b)可知,不同控制方法下直流

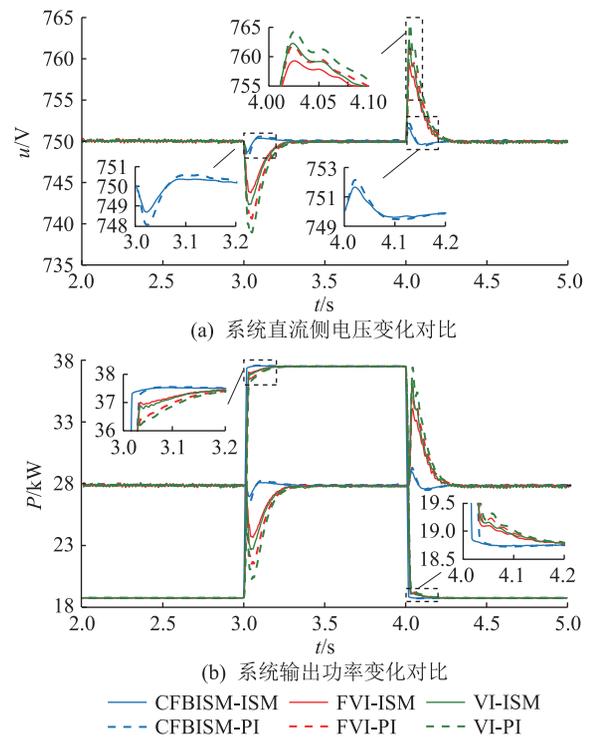


图7 不同控制方法下的控制效果对比

Fig.7 Comparison of control effects under different control methods

侧有功出力变化也不相同,其中采用所提CFBISM-ISM控制方法的系统输出有功变化更加灵敏,能在新接入电动汽车负载时及时提供足够的有功支撑,并能在切出负载时快速调整多余输出有功,保障投切过程的高效性与安全性,从而验证了所提控制方法的性能优越性。

此外,为验证文中CFBISM控制中指令滤波器的滤波效果,将指令滤波器输入信号 x_3^d (即反推模块输出的 \dot{u}^* 值)、指令滤波器输出信号 x_3^c 同直接对 u^* 求导得到的 \dot{u}^* 值(即原信号)进行比较,仿真结果如图8所示。

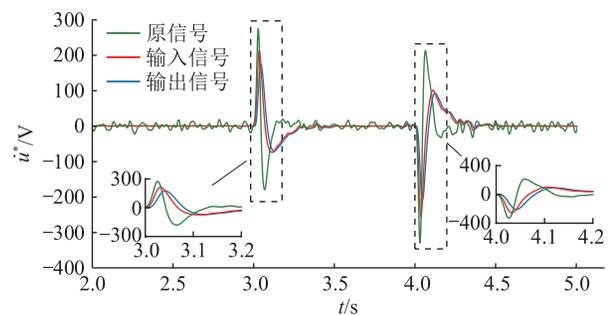


图8 指令滤波器滤波效果曲线

Fig.8 Command filter filtering effect curves

由图8可知,原信号在稳态时依旧会产生幅值约为10V的稳态扰动,在负载投切时变化幅度约为300V且会产生约200V的反向波动。反推模块输

出的 \dot{u}^* 值能够降低稳态情况下 \dot{u}^* 多余的超调量, 负载投切时减少了约 100 V 的波动幅值且很大程度上减缓了变化速率, 而经指令滤波器输出的信号能够进一步降低超调, 并且能在负载投切、 \dot{u}^* 值发生较大波动时有效地追踪输入信号, 以解决 CFBISM 控制器计算膨胀的问题。

4.2 电动汽车复杂投切场景运行测试

为进一步验证文中所提 CFBISM-ISM 控制方法的有效性, 考虑 1 台直流充电桩与 5 台电动汽车负载, 并设计电动汽车负载的复杂投切场景, 通过研究不同负载投切场景下直流侧电压的波动程度与输出功率的变化情况来验证所提控制方法的性能。

电动汽车负载复杂投切场景设置如下: 在 $t = 3$ s 时接入电动汽车负载 1, 在 $t = 4$ s 时同时接入电动汽车负载 2、3, 在 $t = 5$ s 时接入电动汽车负载 4, 之后电压恢复稳定, 在 $t = 5.1$ s 时切出负载 1, 在 $t = 6$ s 时切出负载 2、3, 在 $t = 7$ s 时切出负载 4。仿真结果如图 9 所示。

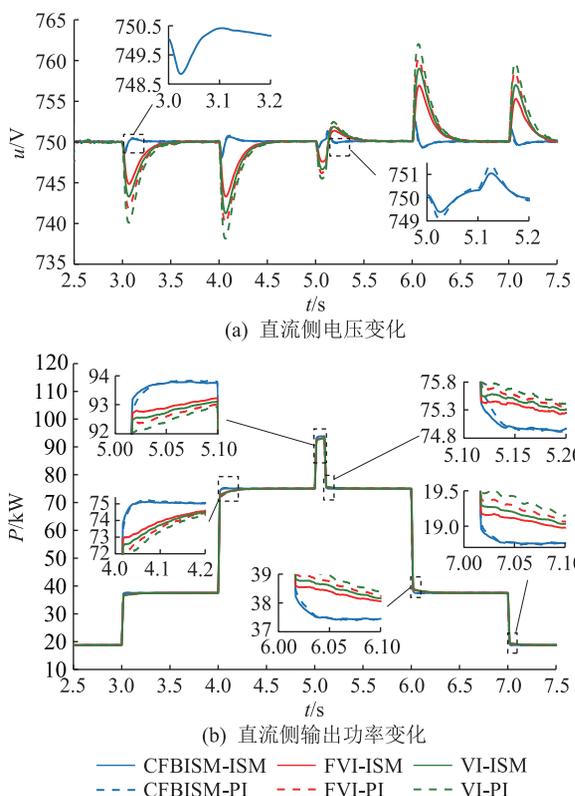


图 9 复杂投切场景下直流侧电压与输出功率变化

Fig.9 DC-side voltage and output power variation in complex cutover scenarios

由图 9(a) 可知, 采用文中所提 CFBISM-ISM 控制方法后, 在 $t = 3$ s 和 $t = 4$ s 时, 充电桩分别接入了 1 台和 2 台电动汽车负载, 此时电压分别下降了约 1 V 和 2 V, 并出现约 0.5 V 的电压回升, 随后恢复稳

定。与之类似, 在 $t = 6$ s 和 $t = 7$ s 时, 充电桩分别切出 1 台和 2 台电动汽车负载, 电压分别上升了约 1 V 和 2 V, 然后出现约 0.5 V 的电压降落, 随后恢复稳定, 变化幅度总体可限制在 2 V 以内。而在 $t = 5$ s 充电桩接入电动汽车负载 4 后, 直流侧电压首先下降约 1 V, 随后在 $t = 5.1$ s 切出负载 1, 电压回升约 0.5 V 时发生突增, 随后恢复稳定。与已有的 FVI、VI 控制相比, CFBISM 控制平抑电压变化的能力更好, 并且文中所提的 ISM 电流内环能在一定程度上提升控制效果, 使系统能更快恢复稳定。同时, 由图 9(b) 可知, 在上述过程中直流充电桩的功率出力可随负载变化而实时改变, 其中采用 CFBISM-ISM 的系统输出有功变化更加灵敏, 能在复杂投切情况下更快地为负载提供足够的有功支撑, 并能更好地避免在切出负载时输出多余有功。

复杂投切场景下指令滤波器滤波效果曲线如图 10 所示。在复杂投切场景中, 在 $t = 4$ s 和 $t = 6$ s 时, 原信号投切较大负载后, 变化幅值约为 500 V 且具有明显的 2 次电压回升现象, 在 5 s—5.2 s 投切时间接近时, \dot{u}^* 将在短时间内产生约 200 V 的幅值变化且短时间内出现多次较大的变化速率改变。经反推模块输出的 \dot{u}^* 值降低了超调量, 避免了 \dot{u}^* 值出现多次反向波动, 在 5 s—5.2 s 过程中能够很好地降低 \dot{u}^* 值的变化速率与变化幅值, 可以有效降低 ISM 控制器在负载变化频繁时的计算复杂程度。

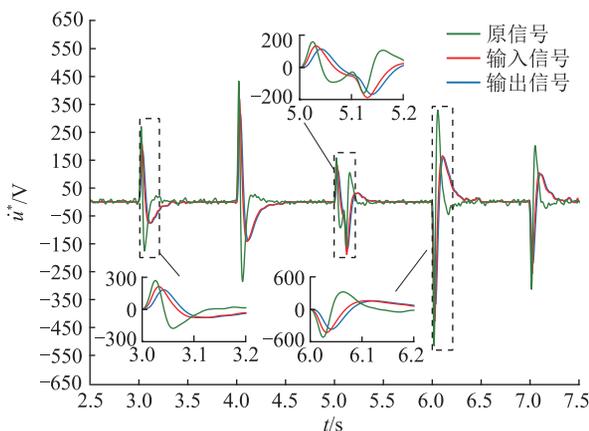


图 10 复杂投切场景下指令滤波器滤波效果曲线

Fig.10 Command filter filtering effect curves in complex cutover scenarios

因此由仿真结果可知, 采用文中 CFBISM-ISM 控制方法的直流充电桩系统在复杂投切场景下, 直流侧电压具有较好的动态响应且功率出力变化响应迅速, \dot{u}^* 值在发生较大波动时不仅可有效地追踪输入信号, 还可降低其在复杂投切场景中的变化速率与幅值, 能够有效避免控制器计算膨胀, 从而

验证了所提控制方法在面对复杂负载投切时的有效性。

5 结语

直流充电桩系统作为直流系统具有惯性低的通病,同时电动汽车直流充电时间较短,电动汽车负载的投切相对频繁。负载投切极易给直流侧电压带来电压波动,影响电压稳定与充电过程的正常进行。

文中类比交流系统 VSM 控制方法,在得到适用于直流系统的 VI 控制的基础上,采用滑模控制改进其控制效果,并利用指令滤波反推控制对其中关键参数进行重构,在提升系统鲁棒性的同时有效避免了控制器的计算膨胀问题,最后对电流内环进行 ISM 改进以进一步提升控制效果。仿真结果表明,文中所提 CFBISM-ISM 控制方法能够很好地稳定直流侧电压,在电动汽车负载投切时,使得系统具有很好的鲁棒性,并且能够快速根据负载变化调整功率出力,为提高直流充电桩在负载侧变化下的控制性能提供了可行方案。

参考文献:

- [1] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):544-557.
LIU Dongqi,ZHONG Qingchang,WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(2):544-557.
- [2] 魏智宇,彭克,李海荣,等. 电动汽车接入直流配电系统的稳定性及虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):50-58.
WEI Zhiyu,PENG Ke,LI Hairong, et al. Stability and virtual inertia control of DC distribution system with integration of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24):50-58.
- [3] 蔡黎,葛棚丹,代妮娜,等. 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力,2022,50(7):96-103.
CAI Li,GE Pengdan,DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles [J]. Smart Power,2022,50(7):96-103.
- [4] 刘其辉,张怡冰,卫婧菲,等. 电动汽车充电区/站两级实时能量管理机制及优化策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):122-129,152.
LIU Qihui,ZHANG Yibing,WEI Jingfei, et al. Two-stage real-time energy management mechanism and optimization strategy for EV charging area/station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(6):122-129,152.
- [5] 肖白,高峰. 含不同容量充电桩的电动汽车充电站选址定容优化方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(10):157-166.
XIAO Bai,GAO Feng. Optimization method of electric vehicle charging stations' site selection and capacity determination considering charging piles with different capacities [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(10):157-166.
- [6] 石立国,李延真,关雪琳,等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. 供用电,2022,39(5):33-40,53.
SHI Liguang,LI Yanzhen,GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations [J]. Distribution & Utilization, 2022,39(5):33-40,53.
- [7] 孙继强,张闯,刘洋,等. 基于直流充电机的能效综合优化研究[J]. 电测与仪表,2023,60(7):176-182.
SUN Jiqiang,ZHANG Chuang,LIU Yang, et al. Research on comprehensive optimization of energy efficiency based on DC charger [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7):176-182.
- [8] 彭曙蓉,黄土峻,李彬,等. 基于深度学习分位数回归模型的充电桩负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2):44-50.
PENG Shurong,HUANG Shijun,LI Bin, et al. Charging pile load prediction based on deep learning quantile regression model [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(2):44-50.
- [9] WANG Y, WANG C, XU L, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(3):3198-3209.
- [10] 李秉宇,常征,武光华,等. 双向功率型直流充电桩互测方法及策略研究[J]. 电气传动,2022,52(3):65-71.
LI Bingyu,CHANG Zheng,WU Guanghua, et al. Research on mutual measurement method and strategy of bi-direction power type DC charging piles [J]. Electric Drive, 2022, 52(3):65-71.
- [11] 兰征,涂春鸣,姜飞. 基于虚拟电机技术的直流微电网与主电网柔性互联策略[J]. 电工技术学报,2019,34(8):1739-1749.
LAN Zheng,TU Chunming,JIANG Fei. The flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC grid based on virtual electric machinery technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(8):1739-1749.
- [12] KOTRA S, MISHRA M K. Design and stability analysis of DC microgrid with hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019,10(3):1603-1612.
- [13] 卢艳杰,刘永慧. 基于固定时间滑模的直流微电网系统电压控制[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(6):159-166,236.
LU Yanjie,LIU Yonghui. Voltage control of direct-current microgrid system based on fixed-time sliding mode [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6):159-166,236.
- [14] 孟飞,曲骅,郭添亨,等. 直流微电网的惯性与阻尼自适应协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):149-157.
MENG Fei,QU Hua,GUO Tianheng, et al. Adaptive coordinated control of inertia and damping for DC microgrid [J]. Power

- System Protection and Control, 2022, 50(20):149-157.
- [15] 朱晓荣, 孟凡奇. 含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1):208-218.
ZHU Xiaorong, MENG Fanqi. Stability analysis of DC microgrid with virtual inertia control[J]. Power System Technology, 2020, 44(1):208-218.
- [16] 周蔚, 粟时平, 苏杰, 等. 基于改进自耦比例积分的直流微电网母线电压控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4):44-50.
ZHOU Wei, SU Shiping, SU Jie, et al. DC microgrid bus voltage control based on improved auto-coupling proportional-integral[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4):44-50.
- [17] 付媛, 刘承帅, 王耀铎, 等. 直流微电网的储-荷虚拟直流电机优化控制技术[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4):23-29.
FU Yuan, LIU Chengshuai, WANG Yaoduo, et al. Optimal control technology of storage load virtual DC machine in DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4):23-29.
- [18] 田艳军, 彭飞, 朱晓荣, 等. 直流微网储能单元的灵活类虚拟同步发电机控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(7):2316-2328.
TIAN Yanjun, PENG Fei, ZHU Xiaorong, et al. Flexible analogous virtual synchronous generator control for energy storage units in DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7):2316-2328.
- [19] 杨成顺, 刘国富, 戴宇辰, 等. 基于改进 VSM 的城轨牵引系统自适应协同控制[J]. 电气传动, 2022, 52(17):3-11.
YANG Chengshun, LIU Guofu, DAI Yuchen, et al. Adaptive cooperative control based on improved VSM for traction power supply system of urban rail traffic[J]. Electric Drive, 2022, 52(17):3-11.
- [20] 袁敞, 毕嘉亮, 陈虎, 等. 多虚拟同步机系统的自适应滑模变结构控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8):26-36.
YUAN Chang, BI Jialiang, CHEN Hu, et al. Adaptive sliding mode variable structure control for multi virtual synchronous machine systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8):26-36.
- [21] 王璨, 毛玲, 赵晋斌, 等. 基于直流充电桩的虚拟惯性控制策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(1):16-18.
WANG Can, MAO Ling, ZHAO Jinbin, et al. Virtual inertial control strategy based on DC charging pile[J]. Power Electronics, 2021, 55(1):16-18.
- [22] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):360-372.
WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):360-372.
- [23] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 一种直流微电网的灵活虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(6):56-62.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. A flexible virtual inertia control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6):56-62.
- [24] 李广浩, 彭克, 张新慧, 等. 直流配电系统接口换流器虚拟同步发电机自适应惯性控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9):135-141.
LI Guanghao, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Adaptive inertia control strategy of virtual synchronous generator of DC power distribution system interface converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9):135-141.
- [25] 张赞, 王毅, 孟建辉, 等. 考虑多约束指标的直流微电网虚拟电容控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1):277-287.
ZHANG Yun, WANG Yi, MENG Jianhui, et al. Virtual capacitance control method for DC microgrid considering multiple constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1):277-287.
- [26] ZHU X R, XIE Z Y, JING S Z, et al. Distributed virtual inertia control and stability analysis of dc microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(14):3477-3486.
- [27] 杨成顺, 华涛, 戴宇辰, 等. 电动汽车用永磁同步电机宽速域抗干扰滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12):21-29.
YANG Chengshun, HUA Tao, DAI Yuchen, et al. Wide speed domain anti-interference sliding mode control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12):21-29.
- [28] 黄宵宁, 倪双飞, 杨成顺, 等. 带指令滤波的直驱永磁风机自适应反推积分滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22):142-150.
HUANG Xiaoning, NI Shuangfei, YANG Chengshun, et al. Adaptive backstepping integral sliding mode control of a direct-drive permanent magnet wind generator with a command-filter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22):142-150.
- [29] 刘彦呈, 吕旭, 张勤进, 等. 基于多滑模变结构的双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7):121-130.
LIU Yancheng, LÜ Xu, ZHANG Qinjin, et al. Virtual inertia control strategy of bidirectional grid-connected converter applying multiple sliding mode variable structure control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7):121-130.
- [30] 庞清乐, 郑杨, 马兆兴, 等. 基于 sigmoid 函数的改进功率预测变步长光伏 MPPT 算法[J]. 电源技术, 2023, 47(4):523-527.
PANG Qingle, ZHENG Yang, MA Zhaoxing, et al. Improved power prediction variable step-size photovoltaic MPPT algorithm based on sigmoid function[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(4):523-527.
- [31] 曾小莉, 王维庆, 王海云. 基于新型电压控制律的永磁同步电机滑模补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10):153-162.

ZENG Xiaoli, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Sliding mode compensation control of permanent magnet synchronous motor based on new voltage control law[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10):153-162.

[32] 林祖荣, 杨晓丰, 倪宏宇, 等. 基于自适应指令滤波反推的多电机同步控制[J]. 控制工程, 2021, 28(5):905-910.

LIN Zurong, YANG Xiaofeng, NI Hongyu, et al. Multi-motor synchronous control based on adaptive command filtering backstepping control[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(5):905-910.

作者简介:



杨成顺

杨成顺(1984),男,博士,副教授,研究方向为新能源系统优化运行与先进控制方法(E-mail:yangchengshun@126.com);

王鹏(1999),男,硕士在读,研究方向为电动汽车充电桩协同控制技术;

许德智(1985),男,博士,教授,研究方向为故障诊断和容错控制、电机控制以及智能电网。

DC charging pile control method based on improved virtual inertia control

YANG Chengshun¹, WANG Peng¹, XU Dezhi², HUANG Xiaoning¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The advantages of fast charging speed and high efficiency of DC charging piles make the connection and cutting of electric vehicle (EV) loads relatively frequent. However, as a DC system, DC charging pile has the characteristics of low inertia and weak damping. In order to reduce the impact of EV load connection and cutting on the DC side voltage disturbance, a DC charging pile control method based on improved virtual inertia (VI) control is proposed. This paper firstly introduces VI control by analogy with virtual synchronous machines (VSM) technology. Secondly, the VI control is improved by using command filter backstepping integral sliding mode (CFBISM) control, in which the integral sliding mode (ISM) control is used to optimize the VI control to enhance the robustness of the system, and the command filter backstepping control is used to reconfigure the key parameters to avoid the computational inflation of the controller, while the ISM control is used to improve the current inner loop to further enhance the control effect. The stability of the proposed control strategy is then demonstrated by the Lyapunov stability criterion. Finally, through comparative simulation, it is verified that the DC-side voltage fluctuation can be limited within 2 V, the dynamic response speed is improved by about 0.1 s, and the perturbation of the key parameters in the steady state is limited to about 1 V, thus the superiority of the fast response speed and good robustness of the control proposed in this paper are verified by simulation.

Keywords: virtual inertia (VI) control; DC charging pile; electric vehicle; backstepping control; command filtering; integral sliding mode (ISM) control

(编辑 陆海霞)