

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415898

基于超级电容的双向 DC/DC 变换器建模与控制*

刘维莎 石荣亮 周其锋 钟志贤 陶敏

(广西高校先进制造与自动化技术重点实验室(桂林理工大学) 桂林 541006)

摘要: 为了有效利用电梯回馈的再生电能,降低系统能量损耗,本文围绕超级电容的能量存储特性,首先介绍基于超级电容的电梯能量存储系统结构及原理;其次建立双向 DC/DC 变换器的小信号模型,论述了基于传统 PI 控制器的双向 DC/DC 变换器双闭环控制结构及其参数设计过程;然后在分析蚁狮优化算法原理的基础上,提出基于 ALO 算法的 PI 参数设计方法;最后利用 MATLAB 仿真软件建立基于超级电容的电梯能量存储系统仿真模型,仿真结果表明在电梯运行状态下,超级电容能及时准确回收制动能量并将回收的能量回馈至直流母线,保证了直流母线电压稳定,降低了系统能耗,这充分验证了所述方法的有效性和优越性。

关键词: 超级电容;双向 DC-DC 变换器;小信号模型;直流母线电压;参数设计;蚁狮优化算法

中图分类号: TN830 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research on modeling and control of bidirectional DC/DC converter based on supercapacitor

Liu Weisha Shi Rongliang Zhou Qifeng Zhong Zhixian Tao Min

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology (Guilin University of Technology),
Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541006, China)

Abstract: In order to effectively utilize the regenerative energy returned by the elevator and reduce the energy loss of the system, this paper focuses on the energy storage characteristics of the ultracapacitor. Firstly, the structure and principle of elevator energy storage system based on supercapacitor are introduced; secondly, the small signal model of bidirectional DC/DC converter is established, and the double closed-loop control structure and parameter design process of bidirectional DC/DC converter based on traditional PI controller are discussed; then, on the basis of analyzing the principle of ant-lion optimization algorithm, a PI parameter design method based on ALO algorithm is proposed. Finally, the simulation model of elevator energy storage system based on ULtracapacitor is established by using MATLAB simulation software. The simulation results show that the ultracapacitor can timely and accurately recover the braking energy and return the recovered energy to the DC bus, ensuring the voltage stability of the DC bus and reducing the energy consumption of the system, which fully verifies the effectiveness and superiority of the method.

Keywords: supercapacitor; bidirectional DC-DC converter; small signal model; DC bus voltage; parameter design; ant-lion optimization algorithm

0 引言

在我国“双碳”目标的战略背景下,科学合理推进能源电力系统转型升级,提倡节能减排和绿色环保的发展理念,已经渗透至电能的生产、传输、储存和利用等环节^[1]。近年来,高层建筑不断增加,电梯广泛应用于人们的生活中,而电梯驱动又在电梯应用中占主导地位^[2]。目前,电梯驱动系统的整流环节一般采用不控整流的方式来获取直流母线

电压,但该方式存在直流母线电压波动大、能量无法回馈等缺点,与国家“双碳”战略目标相悖。

电压源型整流器(voltage source rectifier, VSR)与电压源型逆变器(voltage source inverter, VSI)整合而成的 VSR-VSI 双 PWM 变换器系统是研究电梯驱动领域的一种思路^[3]。VSR-VSI 双 PWM 变换器系统可以将电梯永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)制动产生的电能回馈至电网^[4]。文献[5]在建立基

收稿日期:2024-04-22

* 基金项目:广西自然科学基金(2021GXNSFAA220038)、广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(YCSW2024372)资助

于VSR-VSI双PWM变换器系统模型的基础上,将二自由度PID控制方法应用到前端VSR控制回路中,提升了VSR-VSI系统直流母线电压的跟踪性能与抗负载扰动性能。文献[6]以PMSM为控制对象,提出一种基于功率前馈补偿的双PWM变换器预测控制策略,提高了控制系统稳定性和直流侧电压精度。文献[7]在双PWM变换器的VSI子系统中引入滑模控制方法,与传统矢量控制方法相比改善了系统的动静态性能和鲁棒性。虽然上述文献在减小直流母线电压波动、优化系统性能等方面作了有效研究,但并网电能质量要求高,质量较差的制动能量会给电网带来谐波污染。

电梯能量存储系统是研究电梯驱动领域的另一种思路。电梯能量存储系统可以将电梯制动产生的电能存储在储能装置中,并在电梯处于电动状态时供电梯使用,相较于VSR-VSI双PWM变换器系统可避免引入并网谐波^[8]。文献[9]以“锂离子电池-超级电容”混合储能系统为研究对象,进行荷电状态与健康状态的联合估计。文献[10]根据电梯运行特征及蓄电池储能特点,引入电容补偿方法实现系统的能量回收,有效降低了能量损耗。文献[11]利用超级电容的储能特性实现电梯系统的电能吸收与回馈,改善了能效。文献[12]利用弃风为风机塔筒中的电梯供电,并辅以储能系统作为辅助供电电源,解决塔筒电梯耗电量高的问题。文献[10-12]虽然实现了电梯能量的回收利用,降低了系统能量损耗和成本,但均较少考虑控制参数设计优化和直流母线电压波动的问题。

鉴于此,本文首先建立了双向DC/DC变换器小信号模型,论述了基于超级电容的电梯能量存储系统双闭环控制结构和参数设计方法。在分析蚁狮优化算法(ant-lion optimization algorithm, ALO)原理的基础上,提出了基于ALO+PI(下文简称ALOPD)的双闭环参数优化方法,结合超级电容的储能特性,既可以减少电网谐波干扰,又可以提高系统的能量利用率,还能稳定直流母线电压。最后通过MATLAB仿真验证所述控制方法的有效性和优越性。

1 基于超级电容的电梯能量存储系统

1.1 基于超级电容的电梯能量存储系统结构及原理

图1给出了基于超级电容的电梯能量存储系统结构原理图。

该系统主要由380V交流电源、变频器、超级电容储能装置能量控制系统以及曳引机、轿厢等构成^[13]。为了更合理地利用电能,本文设计出的电梯能量存储系统可实现以下功能:当电梯处于重载下行、轻载上行等再生发电状态时,通过双向DC/DC变换器将电梯制动回馈的电能储存在超级电容中,使直流母线电压稳定在安全范围内。当电梯处于轻载下行、重载上行等电动耗电状态时,电梯消耗超级电容存储的电能实现电能再利用。

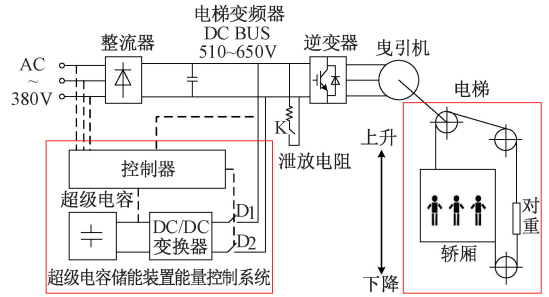


图1 基于超级电容的电梯能量存储系统结构
Fig.1 Structure of elevator energy storage system based on supercapacitors

1.2 双向DC/DC变换器的小信号建模

超级电容通过双向DC/DC变换器并联在直流母线上,因此建立双向DC/DC变换器模型是实现1.1节所述功能的基础。双向DC/DC变换器的等效电路如图2所示。图2中: C_{sc} 为理想电容; R_{ep} 为等效并联电阻; R_{es} 为等效串联电阻。当开关管 VT_2 关断, VT_1 以给定频率周期性导通与关断时,双向DC/DC变换器处于Buck工作模式;当开关管 VT_1 关断, VT_2 以给定频率周期性导通关断时,双向DC/DC变换器处于Boost工作模式^[14]。为了分析DC/DC变换器在稳态工作点附近的频域特性,采用状态空间法进行小信号建模^[15]。

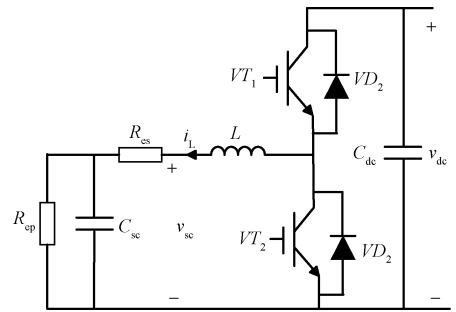


图2 双向DC/DC变换器等效电路

Fig.2 Bidirectional DC/DC converter equivalent circuit

当DC/DC变换器处于Buck工作模式时,根据图2可得一个周期内的电压电流方程:

$$\begin{cases} L \frac{d\bar{i}_L(t)}{dt} + \bar{i}_L(t)R_{es} = d_1(t)\bar{v}_{dc}(t) - \bar{v}_{sc}(t) \\ C \frac{d\bar{v}_{sc}(t)}{dt} = \bar{i}_L(t) - \frac{\bar{v}_{sc}(t)}{R_{ep}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\bar{i}_L(t)$ 、 $\bar{v}_{dc}(t)$ 与 $\bar{v}_{sc}(t)$ 分别为电感电流、直流母线电压与超级电容电压的开关周期平均值。 $d_1(t)$ 为开关管 VT_1 的导通占空比函数,式(1)的矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\bar{i}_L(t)}{dt} \\ \frac{d\bar{v}_{sc}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{es}}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_{sc}} & -\frac{1}{R_{ep}C_{sc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_L(t) \\ \bar{v}_{sc}(t) \end{bmatrix} + d_1(t) \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [\bar{v}_{dc}(t)] \quad (2)$$

设 $\mathbf{x}(t)=[i_L, v_{sc}]^T$, \mathbf{A} 为输入矩阵, \mathbf{B} 为输出矩阵, 则式(2)可简记为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + d_1\mathbf{B}\hat{v}_{dc} \quad (3)$$

假设在稳态工作点附近加入扰动, 则得:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \hat{v}_{dc}(t) = V_{dc} + \hat{v}_{dc}(t) \\ d_1(t) = D_1 + \hat{d}_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$\dot{\mathbf{X}} + \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}[\mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}(t)] + [D_1 + \hat{d}_1(t)]\mathbf{B}[V_{dc} + \hat{v}_{dc}(t)] \quad (5)$$

消去稳态分量并忽略交流分量 $\hat{d}_1(t)\hat{v}_{dc}(t)$, 得到双向 DC/DC 变换器 Buck 模式下小信号模型如式(6)和图 3 所示。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + D_1\mathbf{B}\hat{v}_{dc}(t) + \hat{d}_1(t)\mathbf{B}V_{dc} \quad (6)$$

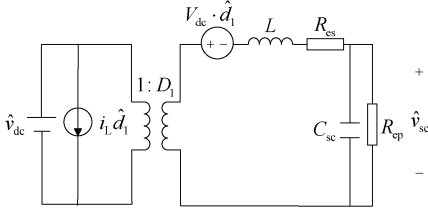


图 3 Buck 模式小信号模型

Fig. 3 Small signal model in Buck mode

最终推导出双向 DC/DC 变换器 Buck 模式下占空比扰动到电感电流扰动的传递函数为:

$$G_{\text{buckid}}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}_1(s)} = \frac{V_{dc}(R_{ep}C_{sc}s + 1)}{R_{ep}LC_{sc}s^2 + (L + R_{es}R_{ep}C_{sc})s + R_{es} + R_{ep}} \quad (7)$$

双向 DC/DC 变换器 Buck 模式下电感电流扰动到超级电容电压扰动的传递函数为:

$$G_{\text{buckvi}}(s) = \frac{\hat{v}_{sc}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{R_{ep}}{R_{ep}C_{sc}s + 1} \quad (8)$$

采用与建立 Buck 模式小信号模型相同的方法, 建立 Boost 模式下的小信号模型如图 4 所示。

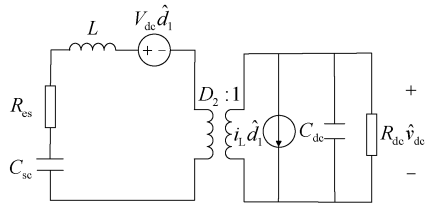


图 4 Boost 模式小信号模型

Fig. 4 Small signal model in Boost mode

双向 DC/DC 变换器 Boost 模式下占空比扰动到电感电流扰动的传递函数为:

$$G_{\text{boostid}}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}_2(s)} = \frac{V_{dc}C_{dc}s + \frac{2V_{dc}}{R_{dc}}}{LC_{dc}s^2 + (\frac{L}{R_{dc}} + R_{es}C_{dc})s + \frac{R_{es}}{R_{dc}} + D_2^2} \quad (9)$$

双向 DC/DC 变换器 Boost 模式下电感电流扰动到直流母线电压扰动的传递函数为:

$$G_{\text{boostvi}}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{D_2^2R_{dc} - Ls - R_{es}}{D_2R_{dc}C_{dc}s + 2D_2} \quad (10)$$

2 双向 DC/DC 变换器双闭环参数设计

2.1 传统 PI 控制器参数设计

为了提高双向 DC/DC 变换器的动态特性, 在 Buck 模式下采用超级电容电压外环电感电流内环的双闭环控制策略, 在 Boost 模式下采用直流母线电压外环电感电流内环的双闭环控制策略^[16]。以 Buck 模式为例, 根据式(7)~(8)可得如图 5 所示的 Buck 模式双环控制框图。

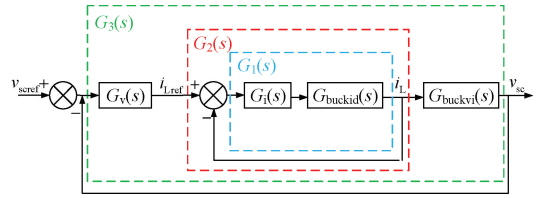


图 5 Buck 模式双环控制框图

Fig. 5 Dual loop control block diagram of Buck mode

图 5 中, $G_v(s)$ 为电压 PI 控制器, 其表达式为 $G_v(s) = K_{vp} + K_{vi}/s$; $G_i(s)$ 为电流 PI 控制器, 其表达式为 $G_i(s) = K_{ip} + K_{ii}/s$ 。双向 DC/DC 变换器的参数为: 直流母线电压 $V_{dc} = 540$ V, 电感 $L = 0.5$ mH, 等效并联电阻 $R_{ep} = 10$ k Ω , 等效串联电阻 $R_{es} = 0.25$ Ω , 超级电容 $C_{sc} = 75$ F, 开关频率 $f = 10$ kHz。电流内环的开环传递函数为:

$$G_1(s) = G_i(s)G_{\text{buckid}}(s) \quad (11)$$

设定电流内环开环的截止频率为 5 kHz, PI 补偿零点 $f_c = 1$ kHz, 同时控制其在补偿零点提供 45° 的相位裕度, 则:

$$\begin{cases} \angle G_1(s) |_{s=j2\pi \times f_c} = \frac{-(180^\circ - 45^\circ)}{(180/\pi)} \\ |G_1(s) |_{s=j2\pi \times f_c} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得电流 PI 控制器参数为 $K_{ip} = 0.038$, $K_{ii} = 27.9$ 。

电流内环的闭环传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)} \quad (13)$$

电压外环的开环传递函数为:

$$G_3(s) = G_v(s)G_2(s)G_{\text{boostvi}}(s) \quad (14)$$

设定电压外环开环的截止频率为 10 Hz, PI 补偿零点 $f_c = 1$ Hz, 同时控制其在补偿零点提供 45° 的相位裕度, 则:

$$\begin{cases} \angle G_3(s) |_{s=j2\pi \times f_c} = \frac{-(180^\circ - 45^\circ)}{(180/\pi)} \\ |G_3(s) |_{s=j2\pi \times f_c} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可得电压 PI 控制器参数为 $K_{vp} = 333.22$, $K_{vi} = 2093.65$ 。

以上即完成了双闭环控制结构中传统 PI 控制器的参数设计, PI 控制器性能的优劣及其参数设计的合理性影响着整个系统的控制性能, 而传统 PI 参数设计方法难以同时保证系统的抗干扰性能和动态性能, 故接下来引入智能算法对 PI 控制器性能进行优化。

2.2 ALOPI 控制器参数设计

蚁狮优化算法是由澳大利亚学者 Mirjalili 于 2015 年提出的一种自然启发式随机搜索算法^[17]。该算法模拟了自然界中蚁狮狩猎蚂蚁的行为: 蚁狮提前挖好陷阱, 一旦有蚂蚁落入陷阱, 蚁狮会迅速捕食并重建陷阱等待下次狩猎^[18]。ALO 算法具有搜索能力强、收敛速度快等优点, 因此本文将 ALO 算法应用于双闭环 PI 控制器的参数设计中以优化控制器性能, ALO 算法的具体步骤如下:

步骤 1) 蚂蚁随机游走

蚂蚁在寻找食物时的随机移动公式为:

$$\mathbf{X}_t = \{0, \text{cumsum}[2r(t_1) - 1], \text{cumsum}[2r(t_2) - 1], \dots, \text{cumsum}[2r(t_T) - 1]\} \quad (16)$$

式中: cumsum 为累加和函数, rand 为 $[0, 1]$ 范围内均匀生成的随机数; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; $r(t)$ 为随机函数, 可表示为:

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{rand} > 0.5 \\ 0, & \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

此外, \mathbf{M}_A 和 \mathbf{M}_L 分别为蚂蚁和蚁狮的位置矩阵, 通常用目标函数来确定每只蚂蚁和蚁狮的适应度, 并将结果存储在 \mathbf{M}_{fA} 和 \mathbf{M}_{fL} 两个矩阵中, 即:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1d} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nd} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{fA} = \begin{bmatrix} fA_1 \\ fA_2 \\ \vdots \\ fA_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1d} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nd} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{fL} = \begin{bmatrix} fL_1 \\ fL_2 \\ \vdots \\ fL_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

为了让蚂蚁只在搜索范围内随机移动, 通过式(20)对其归一化处理。

$$\mathbf{X}_m^t = \frac{(\mathbf{X}_m^t - \mathbf{a}_m)(\mathbf{d}_m^t - \mathbf{c}_m^t)}{(\mathbf{b}_m - \mathbf{a}_m)} + \mathbf{c}_m^t \quad (20)$$

式中: \mathbf{a}_m 、 \mathbf{b}_m 为第 m 只蚂蚁随机移动的最小、最大值, \mathbf{c}_m^t 、 \mathbf{d}_m^t 分别表示第 t 次迭代时第 m 只蚂蚁随机移动的最小、最大值。

步骤 2) 蚁狮筑造陷阱

蚁狮筑造的陷阱会影响蚂蚁的随机移动, 可表示为:

$$\mathbf{c}_m^t = \text{Ant-lion}_n^t + \mathbf{c}^t \quad (21)$$

$$\mathbf{d}_m^t = \text{Ant-lion}_n^t + \mathbf{d}^t \quad (22)$$

式中: Ant-lion_n^t 为第 t 次迭代中第 n 个蚁狮的位置; \mathbf{c}^t 、 \mathbf{d}^t 分别表示第 t 次迭代中蚂蚁随机移动的最小、最大值。

蚂蚁掉入陷阱后, 其随机移动范围会减小, 蚂蚁随机移动范围的最大值和最小值可表示为:

$$\mathbf{c}^t = \frac{\mathbf{c}^t}{10^\omega \frac{t}{T}} \quad (23)$$

$$\mathbf{d}^t = \frac{\mathbf{d}^t}{10^\omega \frac{t}{T}} \quad (24)$$

式中: t 为当前迭代次数, T 为最大迭代次数, ω 为迭代常数, 且 ω 的数学表达式为:

$$\omega = \begin{cases} 2, & t > 0.1T \\ 3, & t > 0.5T \\ 4, & t > 0.75T \\ 5, & t > 0.9T \\ 6, & t > 0.95T \end{cases} \quad (25)$$

步骤 3) 更新蚁狮位置

当蚁狮比蚂蚁的适应度值低时, 蚁狮就会捕获蚂蚁并更新位置, 即当 $f(\text{Ant}_m^t) > f(\text{Ant-lion}_n^t)$ 时, 执行如式(26)的运算。

$$\text{Ant-lion}_n^t = \text{Ant}_m^t \quad (26)$$

式中: Ant-lion_n^t 、 Ant_m^t 分别为第 t 次迭代时蚁狮和蚂蚁的位置。

步骤 4) 更新蚂蚁位置

将适应度最佳的蚁狮作为精英蚁狮, 通过轮盘赌法更新蚂蚁位置, 可表示为:

$$\text{Ant}_m^t = \frac{\mathbf{R}_A^t + \mathbf{R}_E^t}{2} \quad (27)$$

式中: \mathbf{R}_A^t 表示第 t 次迭代蚂蚁围绕轮盘赌蚁狮移动; \mathbf{R}_E^t 表示第 t 次迭代蚂蚁围绕精英蚁狮移动。结合系统的综合性能, 选取直流母线电压与其给定值的误差 t 为性能指标, 适应度函数如下:

$$F = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (28)$$

综上, 利用 ALO 算法优化双闭环 PI 控制器参数的具体流程如图 6 所示。

根据图 6 所给出的参数设计流程, 可得到电流内环 ALOPI 控制器的最优参数为 $K_{ip} = 0.0046$, $K_{ii} = 1.15$; 电压外环 ALOPI 控制器的最优参数为 $K_{vp} = 595.66$, $K_{vi} = 238.26$ 。

3 仿真与分析

3.1 传统 PI 控制器与 ALOPI 控制器对比分析

为了验证 ALOPI 控制器较传统 PI 控制器的优越性,

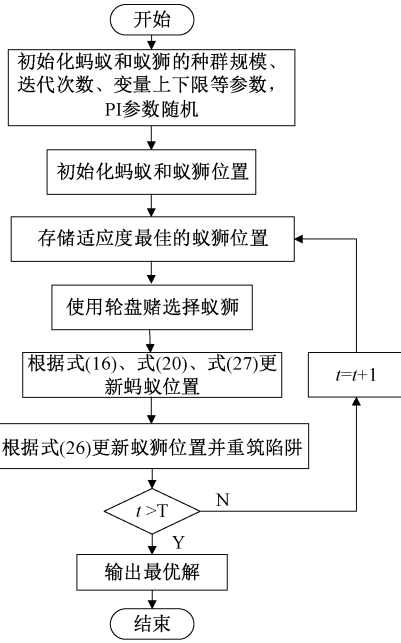


图 6 ALO 算法流程

Fig. 6 Flowchart of ALO algorithm

将 2.1 节的 PI 控制器参数和 2.2 节的 ALOPI 控制器参数分别代入式(11)和(14)后,利用 MATLAB 仿真软件分别绘制出双闭环控制系统 PI 补偿前、采用传统 PI、ALOPI 控制器的电流内环和电压外环伯德图,如图 7、8 所示。由图 7 可知,ALOPI 控制器电流内环的相位裕度为 92.9° ,明显高于传统 PI 控制器的 45.1° ;由图 8 可知,ALOPI 控制器电压外环的相位裕度为 86.9° ,明显高于传统 PI 的 45° 。以上结果表明双闭环控制系统采用 ALOPI 控制器相较于传统 PI 控制器时具有更优良的动力学性能和稳定性。

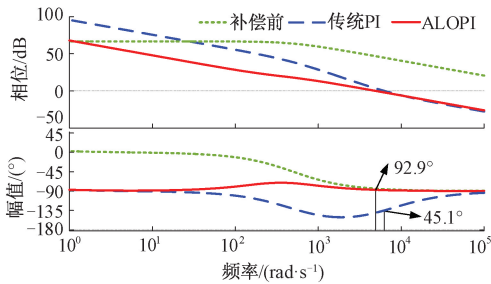


图 7 电流内环伯德图

Fig. 7 Bode diagram of current inner loop

为了进一步验证 ALOPI 控制器的优越性,图 9 给出了采用 ALOPI 控制器和传统 PI 控制器应对负载阶跃与指令值阶跃时的超级电容电压动态响应结果。由图 9 可知,当指令值阶跃和负载阶跃时,采用 ALOPI 控制器的超级电容电压相较于传统 PI 控制器具有更小的超调量与更快的恢复时间。这表明 ALOPI 控制器比传统 PI 控制器在改善超级电容电压的动态响应性能和抗扰动方面更具优越性。

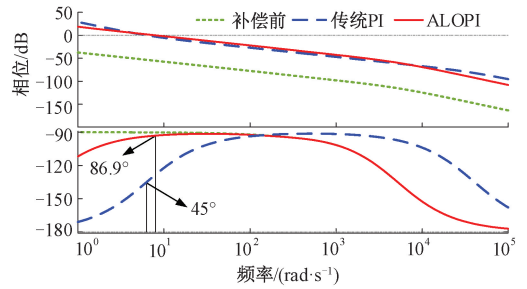


图 8 电压外环伯德图

Fig. 8 Bode diagram of voltage outer loop

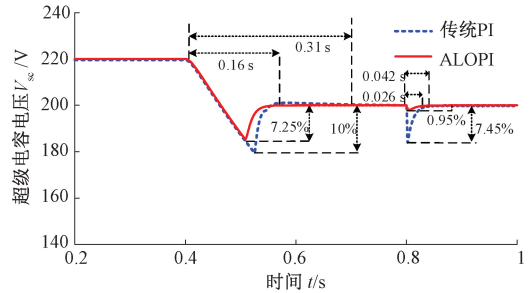


图 9 指令值阶跃和负载阶跃下超级电容电压的动态响应结果

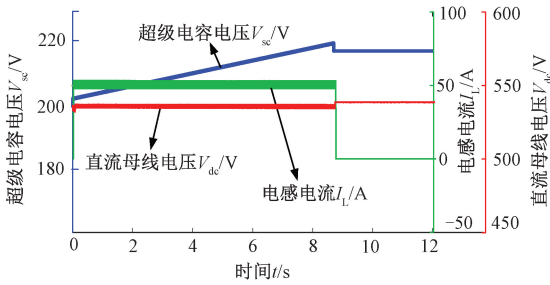
Fig. 9 Dynamic response results of supercapacitor voltage under command value step and load step

3.2 电梯能量存储系统功能验证

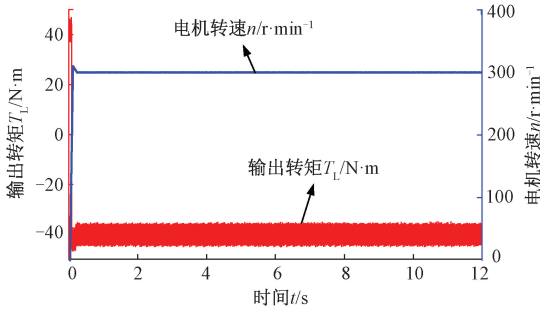
为验证基于超级电容的电梯能量存储系统能否实现在电梯处于重载下行、轻载上行状态时,将电梯制动回馈的电能储存在超级电容中,达到直流母线电压稳定的功能以及在电梯处于轻载下行、重载上行状态时,消耗超级电容存储电能,达到直流母线电压稳定的功能。搭建了 MATLAB 仿真模型。设定超级电容电压上限为 220 V,下限为 180 V,其余仿真参数与 2.1、2.2 节所给参数保持一致。

模拟电梯轻载上行,重载下行工况,此时电梯处于再生发电状态,双向 DC/DC 变换器处于 Buck 模式。设定电梯的负载转矩为 $-40 \text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速为 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,超级电容初始电压为 200 V,得到再生发电状态下的仿真波形如图 10 所示。0~8.8 s 电感电流被限制在 50 A,电梯回馈的电能储存在超级电容中,超级电容电压线性上升,直流母线电压维持在 536 V 左右。8.8 s 后,超级电容电压上升至上限 220 V,此时双向 DC/DC 变换器断开,接入泄放电阻以保证电梯正常运行,母线电压稳定在 538 V 左右。

模拟电梯重载上行,轻载下行工况,此时电梯处于电动机耗电状态,双向 DC/DC 变换器处于 Boost 模式。设定电梯的负载转矩为 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$,电机额定转速为 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,超级电容初始电压为 185 V,得到电动机耗电状态下的仿真波形如图 11 所示。0~7.5 s,电梯消耗储存在超级电容中的电能,超级电容电压下降,直流母线电压维持在设定值 560 V 左右。7.5 s 后,超级电容电压下降到下限 180 V,双向



(a) 超级电容电压、电感电流、直流母线电压波形
(a) The waveform of ultracapacitor voltage, inductor current, DC bus voltage

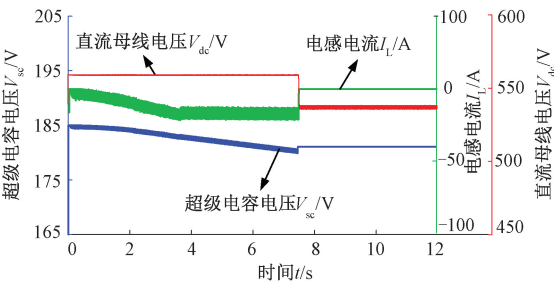


(b) 输出转矩、电机转速波形
(b) The waveform of output torque, motor speed

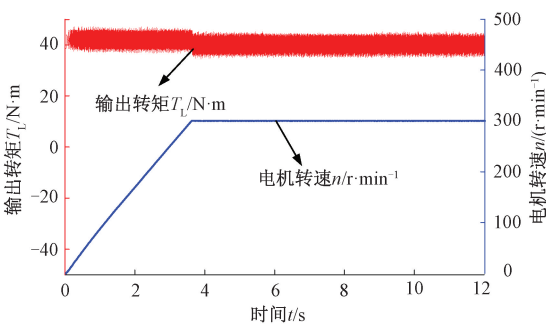
图10 再生发电状态下仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform in regenerative power generation state

DC/DC变换器停止工作,此时电梯由电网供电,直流母线电压稳定在538V左右。



(a) 超级电容电压、电感电流、直流母线电压波形
(a) The waveform of ultracapacitor voltage, inductor current, DC bus voltage



(b) 输出转矩、电机转速波形
(b) The waveform of output torque, motor speed

图11 电动耗电状态下仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform in electric power consumption state

由图10、11可知,基于超级电容的电梯能量存储系统可以实现能量的吸收与利用,且不会引入电网电流谐波。直流母线电压在再生发电和电动耗电状态下均始终稳定在要求范围内,且电梯的转速和转矩也能保持稳定,保证了电梯的平稳运行,验证了上述设计方案的可靠性。

3.3 电梯驱动系统对比分析

为了进一步验证超级电容能量存储系统在稳定直流电压方面的优越性,图12给出了基于不控整流驱动系统、VSR-VSI双PWM变换器驱动系统^[19]、超级电容电梯能量存储驱动系统3种电梯驱动系统的仿真对比结果。

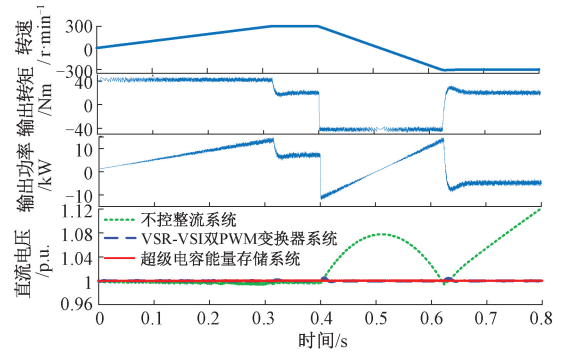


图12 仿真对比结果

Fig. 12 Comparative simulation results

电机转速在 $t=0\text{ s}$ 从0阶跃至 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,而电机转速在 $t=0.4\text{ s}$ 从 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 阶跃至 $-300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。仿真波形从上到下依次为:电机转速波形、输出转矩波形、输出功率波形、直流母线电压对比波形。电机转速、输出转矩、输出功率的仿真波形在3种方案下区别不大,故图12中只给出超级电容电梯能量存储系统所对应的动态响应波形。而通过观察直流母线电压波形可知,VSR-VSI双PWM变换器驱动系统的电压波动范围为0.6%,而超级电容电梯能量存储驱动系统的电压波动范围为0.15%,以上两种系统均能保证直流母线电压在能量回馈过程中稳定在安全范围内,而不控整流驱动系统则不然。这表明,超级电容电梯能量存储驱动系统在直流母线电压的跟随性与抗扰动性能方面均具有更优越的性能。

4 结论

基于超级电容的电梯能量存储系统具有直流母线电压稳定、能量可双向流动、可避免引入并网谐波等优点。本文围绕超级电容的储能特性,在建立双向DC/DC变换器小信号模型的基础上,论述基于传统PI控制器的直流母线电压双闭环控制结构与参数设计方法,提出基于ALO的PI参数优化设计方法。最后,建立基于超级电容的电梯能量存储系统的MATLAB仿真,并利用仿真对比结果验证了所述方法在提升系统直流母线电压的跟随性与抗扰动性能方面的有效性和优越性。值得指出的是,本文只将传统ALO算法应用在PI控制器参数设计中,对于其他改进型

ALO 寻优算法在传统 PI、分数阶 PI 控制器参数设计中的应用还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 任大伟,侯金鸣,肖晋宇,等.支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J].中国电力,2023,56(8):17-25.
REN D W, HOU J M, XIAO J Y, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality [J]. ELECTRIC POWER, 2023, 56(8): 17-25.
- [2] VLACHOU I, KARAKATSANIS S, KLADAS G. Energy savings in elevators by using a particular permanent-magnet motor drive[J]. Energies, 2023, 16(12): 171-193.
- [3] 石荣亮,黄冀,张烈平,等.基于二自由度 PID 的永磁同步曳引机调速策略[J].桂林理工大学学报,2022,42(4):996-1001.
SHI R L, HUANG J, ZHANG L P, et al. Optimized speed regulation strategy based on two-degree-of-freedom PID regulator for permanent magnet synchronous tractor[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2022, 42(4): 996-1001.
- [4] JIAN L, WEN L, YI W, et al. Research on high-frequency isolation type of dual-PWM variable frequency speed regulation[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2023, 18(4): 2929-2941.
- [5] 石荣亮,刘维莎,王国斌,等.基于二自由度 PID 的三相 PWM 整流器调压改进策略[J].电力工程技术,2023,42(3):149-156,178.
SHI R L, LIU W S, WANG G B, et al. An optimization strategy for voltage regulation of three-phase PWM rectifier based on two-degree-of-freedom PID [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 149-156,178.
- [6] 张琪.基于功率前馈补偿的双 PWM 变换器预测控制研究[D].西安:西安理工大学,2021.
ZHANG Q. Research on predictive control of dual PWM converter based on power feedforward compensation[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2021.
- [7] 聂滢.双 PWM 永磁同步电力驱动系统控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2018.
NIE Y. Research on control strategy of dual-PWM permanent magnet synchronous power drive system[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [8] 牟耀荣,石荣亮,黄冀,等.超级电容储能装置在电梯节能中的应用与分析[J].中国电梯,2023,34(3):13-16.
MOU Y R, SHI R L, HUANG J, et al. Application and analysis of supercapacitor energy storage device in elevator energy saving [J]. China Elevator, 2023, 34(3): 13-16.
- [9] 王冠,李相俊,孙振广,等.“锂离子电池—超级电容”混合储能系统的建模与状态估计[J].电子测量技术,2023,46(1):103-111.
WANG G, LI X J, SUN ZH G, et al. Modeling and state estimation of “lithium-ion battery-supercapacitor” hybrid energy storage system [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 103-111.
- [10] 齐冠然,杨淑贞,李民,等.曳引电梯蓄能器储能液压节能系统及电容能耗研究[J].机床与液压,2023,51(3):146-150.
QI G R, YANG SH ZH, LI M, et al. Study on traction elevator accumulator energy storage hydraulic energy saving system and capacitor energy consumption[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(3): 146-150.
- [11] 王婧怡,翁绍捷,张国健.超级电容驱动的电梯制动能量回馈损耗控制[J].计算机仿真,2021,38(5):219-222,291.
WANG J Y, WENG SH J, ZHANG G J. Research and design of load balancing algorithm for edge coverage network storage[J]. Computer Simulation, 2021, 38(5): 219-222,291.
- [12] 陈慧,谢丽蓉,信博文,等.基于 Beta 分布的塔筒电梯储能容量配置最小区间研究[J].太阳能学报,2021,42(4):454-459.
CHEN H, XIE L R, XIN B W, et al. Research on minimum interval of energy storage capacity configuration of tower elevator based on Beta distribution[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(4): 454-459.
- [13] ZAKARIYA D, TAHA A, OSAMA S. Energy recovery control in elevators with automatic rescue application [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 13(8): 168-182.
- [14] 冷文鹏,逢海萍.双向 DC/DC 变换器 Boost 模式下的建模及控制[J].电子测量技术,2019,42(6):6-11.
LENG W P, PANG H P. Modeling and control of bidirectional DC/DC converter in boost mode [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 6-11.
- [15] 范灿明,李惠林,边东生,等.基于无源控制的车用双管升压变换器研究[J].国外电子测量技术,2024,43(2):101-106.
FAN C M, LI H L, BIAN D S, et al. Research on automotive dual-switches boost converter based on passive control [J]. Foreign Electronic Measurement

- Technology, 2024, 43(2): 101-106.
- [16] 周美兰,刘洋,黄锋涛,等. 电动汽车辅助动力系统双向DC/DC变换器[J]. 电机与控制学报,2020,24(11): 73-81.
ZHOU M L, LIU Y, HUANG F T, et al. Bidirectional DC/DC converter for auxiliary power system of electric vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(11): 73-81.
- [17] MIRJALILI S. The ant lion optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 83(5): 80-98.
- [18] 陈伟,杨盘隆,吴宣够. 改进蚁狮优化算法及其工程应用[J]. 传感技术学报,2023,36(4):565-574.
CHEN W, YANG P L, WU X G. Improved ant lion optimizer and its application in engineering problems[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(4): 565-574.
- [19] 石荣亮,邓臣权,黄冀,等. 基于VSR-VSI的电梯能量回馈系统建模与控制[J]. 桂林理工大学学报,2023, 43(1):148-154.

SHI R L, DENG CH Q, HUANG J, et al. Research on modeling and control of elevator energy feedback system based on VSR-VSI [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 43(1): 148-154.

作者简介

刘维莎, 硕士研究生, 主要研究方向为电梯能量回馈及其利用控制技术。

E-mail:1293655434@qq.com

石荣亮(通信作者), 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为新能源利用与分布式发电技术。

E-mail:shirl163@163.com

周其锋, 硕士研究生, 主要研究方向为图腾柱PFC。

E-mail:2326220408@qq.com

钟志贤, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为新能源利用与分布式发电技术。

E-mail:705703304@qq.com

陶敏, 本科, 主要研究方向为新能源利用与分布式发电技术。

E-mail:3338237993@qq.com