

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.016

基于线性自抗扰控制的柔性多状态开关直流电压控制策略

王正齐¹, 徐浩¹, 王德全²

(1. 南京工程学院电力工程学院, 南京 211167; 2. 国网淮安供电公司变电检修室, 江苏 淮安 223200)

摘要:为提高柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMSS)的抗干扰能力,以保证在系统干扰的情况下维持直流电压稳定,该文提出一种基于线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)的 FMSS 直流电压控制策略,其控制策略可以将作用于研究对象的不确定因素整合成系统总扰动,并对扰动进行实时跟踪估计和补偿,以此抑制系统干扰。通过 Matlab/Simulink 对 FMSS 建模,并设计线性自抗扰控制器模块来替换电压外环和电流内环中的 PI 控制器模块。在系统干扰的情况下,对 FMSS 的抗干扰能力进行实验验证。仿真结果表明,与传统 PI 双环控制策略相比,基于 LADRC 的控制策略能更好地应对系统干扰,能有效提高系统干扰抑制的能力,维持 FMSS 直流电压稳定。

关键词:柔性多状态开关; 线性自抗扰控制; Matlab/Simulink; 干扰抑制; 直流电压稳定

Flexible Multi-state Switch DC Voltage Control Strategy Based on Linear Active Disturbance Rejection Control

WANG Zhengqi¹, XU Hao¹, WANG Dequan²

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. State Grid Huaian Power Supply Company Substation Maintenance Room,
Jiangsu Huaian 223200, China)

Abstract: For improving the anti-interference ability of the flexible multi-state switch (FMSS) so to ensure stable DC voltage in the case of system interference, a kind of FMSS DC voltage control strategy based on linear active disturbance rejection control (LADRC) is proposed in this paper. Its control strategy can integrate the uncertain factors acting on the research object into the total disturbance of the system, and real-time tracking estimation and compensation of the disturbance so as to suppress the system interference. The FMSS is modeled by Matlab/Simulink, and the linear active disturbance rejection controller module is designed to replace the PI controller module in the voltage outer loop and the current inner loop. Under the condition of system interference, the anti-interference ability of FMSS is experimentally verified. The simulation results show that compared with the traditional PI double-loop control strategy, the LADRC-based control strategy can better deal with a variety of system interference, can effectively improve the ability of system interference suppression and maintain stability of the FMSS DC voltage.

Keywords: FMSS; LADRC; Matlab/Simulink; interference suppression; DC voltage stability

0 引言

随着国家大力推进新能源建设,太阳能发电、风力发电等新能源技术得到了广泛应用,然而这也导致配电网中分布式电源的大量接入,使配电网的电能质量方面受到了巨大的挑战,影响配电网的供电

可靠性^[1]。配电网处于电力系统末端部分,主要负责电能存储、传输和分配的任务,但传统配电网常采用“闭环设计,开环运行”的方式,其网络结构具有局限性,同时传统联络开关不能频繁动作、调控能力有限等问题越来越突出,其原有的调控手段已无法满足如今电网的潮流控制、电压调节、运行优化等调控需求^[2]。

收稿日期:2023-03-21

基金项目:南京工程学院大学生科技创新基金项目(TB202117044)。

柔性多状态开关 (flexible multi-state switch, FMSS) 被认为是替代传统配电网中联络开关的新型一次柔性电力电子设备, 相比较于传统的联络开关, 其潮流调节能力更加灵活优秀, 能够有效调节配电网中电压水平, 也有利于分布式能源消纳水平的提升^[3], 总体上也加强了配电网供电可靠性和安全性, 这对配电网稳定运行是十分有意义的。

目前, 针对 FMSS 这一新型电力电子设备, 国内外研究人员对其的研究还集中在利用 FMSS 优化配电网方面, 优化方向包括网络重构^[4-6]、运行优化^[7-11]、故障恢复^[12-13]等方面, 但对于 FMSS 的控制策略方面研究较少, 为改善 FMSS 控制性能, 相关人员做了以下研究。文献[14]针对模块化多电平变流器结构的柔性多状态开关, 提出一种改进型下垂控制策略, 其控制策略优秀之处是实时改变可调下垂系数来调整换流站的功率分配能力, 明显提高了系统的抗干扰性能, 维持系统运行稳定。文献[15]提出了一种基于改进型线性扩张状态观测器的 FMSS 直流电压控制策略, 其策略主要是在外环进行改进, 利用线性扩张状态观测器实时跟踪直流侧电压参考值, 以此抑制系统干扰来保持系统直流电压稳定。文献[16]针对柔性多状态开关在馈线故障的情况下, 提出了一种 FMSS 平滑切线策略, 以实现 FMSS 工作状态的平滑过渡。文献[17]针对在 FMSS 端口电压不平衡而导致直流侧电压发生波动的情况下, 提出一种基于二阶滑模控制的 FMSS 直流电压控制策略, 利用非线性干扰观测器来实时跟踪电压电流, 以此达到维持系统电压稳定的目的。文献[18-19]提出了一种基于扩张状态观测器的干扰前馈补偿策略, 其策略将系统实时值作为控制输入量, 同时将基准模型的控制输入量作差值, 利用扩张状态观测器估计扰动并前馈, 但是扩张状态观测器参数整定困难。文献[20]为了减小 DC-DC 电感电流给定中的低频分量, 引入改进型带通滤波器, 加入二阶积分环节, 有利于维持微网直流侧电压的稳定。文献[21-22]针对传统自抗扰控制参数复杂等问题, 提出了优化方案, 通过引入观测器带宽和控制器带宽两个概念, 提出了线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC), 很好地解决了传统非线性线性自抗扰控制 (nonlinear active disturbance rejection control, NLADRC) 参数整定困难的问题。文献[23]较为完整地展示了自抗扰控制和线性自抗扰参数整定和设计理念。LADRC 自从诞生就引起了很大的关注, 其在电力电子领域中越来越受关注, 但 LADRC 大多应用在整流器、逆变器

力电子设备, 并没有广泛运用该方法。

通过上述文献的研究贡献, 将 LADRC 技术应用到 FMSS 中, 提出了基于线性自抗扰控制的 FMSS 直流电压控制策略。文中以背靠背两端口 FMSS 为研究对象, 主要研究抑制 FMSS 直流侧电压干扰问题。首先, 分析 FMSS 的拓扑结构和建立其数学模型。然后, 由 FMSS 的 U_{dc} - Q 控制端口处的系统变量可以求出系统直流电压动态方程和变量间的非线性方程, 从而设计出 LADRC 电压外环和 LADRC 电流内环。基于背靠背两端口 FMSS, 对比了传统 PI 双闭环控制和 LADRC 的控制效果, 在 Matlab/Simulink 软件中搭建 FMSS 仿真模型, 设置多种系统干扰进行仿真验证, 仿真结果证明了 LADRC 能够更好地抑制系统干扰对 FMSS 直流侧电压的影响。

1 FMSS 数学模型及端口控制模式

FMSS 作为配电网中一种新型电力电子设备, 主要用于未来替代配电网中部分传统联络开关, 其主要构成器件是全控型器件。FMSS 接入拓扑结构一般分为两端口接入和多端口接入, 由于多端口接入的系统较复杂, 文中采用两端口接入方式, 以便研究, FMSS 两端口接入拓扑见图 1。

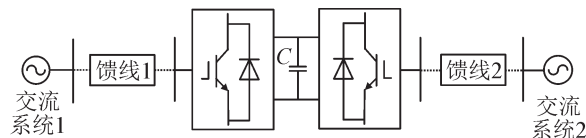


图1 FMSS两端口接入拓扑
Fig. 1 Two-port FMSS access topology

1.1 FMSS 数学模型

两端口 FMSS 主电路组成器件为电压源型变流器 (voltage source converter, VSC), 其两端口结构对称, 两个端口分别为 VSC_1 、 VSC_2 , 通过直流侧电容 C 相互连接, FMSS 主电路拓扑如图 2 所示。

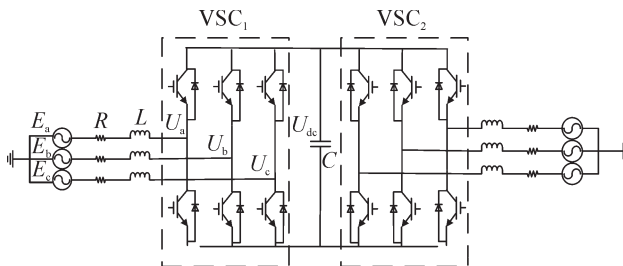


图2 FMSS背靠背两端口变流器主电路拓扑
Fig. 2 FMSS back-to-back two-port converter main circuit topology

图中直流侧电容 C 可当作电压源来使用, 也可减轻纹波的干扰; 交流侧电感 L 起着交流侧与 FMSS 端口之间能量交换的作用, 同时也有滤波功

能;电阻 R 是 VSC 与连接线路之间损耗的等效电阻; U_a 、 U_b 、 U_c 为其中一个端口的变流器输出电压; E_a 、 E_b 、 E_c 为一个端口所接电网的三相电压。设置 VSC₁ 采用定直流电压控制 (U_{dc} - Q 控制端口), 设置 VSC₂ 采用定有功功率控制 (P - Q 控制端口)。

假设 FMSS 中电网电压处于平衡状态, 且忽略 FMSS 开关管损耗。通过坐标变换, 在同步旋转坐标系下建立 VSC₁ 数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = E_d - Ri_d - U_d + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = E_q - Ri_q - U_q - \omega Li_d \\ CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{dc} - P_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为交流测电压角频率; E_d 、 E_q 分别为交流侧馈线电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 VSC₁ 交流侧端口输出电流的 d 、 q 轴分量; U_d 、 U_q 分别为 VSC₁ 交流侧端口输出电压的 d 、 q 轴分量; U_{dc} 为 FMSS 直流侧电压; P_{dc} 为 VSC₁ 直流侧端口输入的有功功率; P_o 为 VSC₁ 直流侧端口输出的有功功率。

与此同时, 若 FMSS 开关损耗和线路损耗被忽略, 则可以求出 FMSS 的 U_{dc} - Q 端口处瞬时功率表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(E_d i_d + E_q i_q) = P_{dc} \\ Q = \frac{3}{2}(E_q i_d - E_d i_q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为 FMSS 中 U_{dc} - Q 端口有功输出功率; Q 为 FMSS 中 U_{dc} - Q 端口无功输出功率。

1.2 端口控制模式

1.2.1 P - Q 控制模式

由式(2)可得瞬时功率 P 、 Q , 其通过低通滤波器可得平均功率 P_{av} 、 Q_{av} , 然后与功率参考值 P_{ref} 、 Q_{ref} 进行比较, 所产生的误差通过 PI 控制器可以得到内环电流分量的参考值 i_{dref} 、 i_{qref} 。图中限幅器是为了在系统出现故障期间对电流进行限值, 防止过电流对电力电子器件造成损伤。控制结构见图 3。

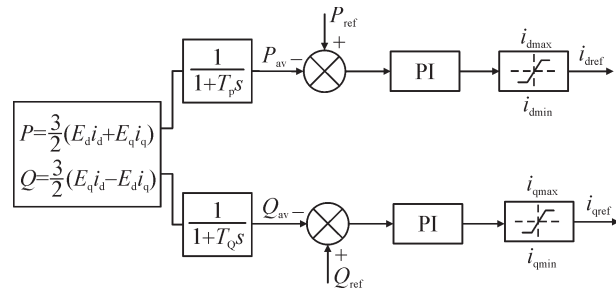


图3 P - Q 外环控制结构
Fig. 3 P - Q outer loop control structure

1.2.2 U_{dc} - Q 控制模式

U_{dc} - Q 控制模式的流程与 P - Q 控制模式基本相

同, 区别是输入量的不同。用直流电压 U_{dc} 及其参考值 U_{dref} 来替换图 3 中有功功率 P 及参考值 P_{ref} , 则将有功功率控制通道替换成直流电压控制通道, 无功功率控制通道保持不变。控制结构见图 4。

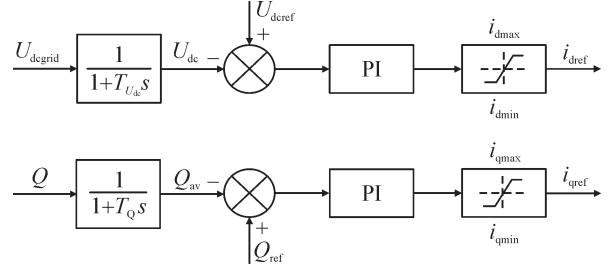


图4 U_{dc} - Q 外环控制结构
Fig. 4 U_{dc} - Q outer loop control structure

2 基于传统PI双环的直流电压控制

传统 PI 双闭环控制策略广泛应用于配电网系统中, 但由于电网中分布式电源的快速增加, 导致系统的功率流向越来越复杂, 未知扰动越来越剧烈, 系统内部参数不停变化, 电压越限问题更加严重, 因此传统的控制策略已满足不了如今电网的控制需求, 文中简单叙述其策略。

2.1 外环设计

由式(1)、(2)可以求出柔性多状态开关直流侧电压的动态方程为

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(E_d i_d + E_q i_q) - 2P_o \quad (3)$$

为了维持 FMSS 直流电压稳定, 该控制方法将 U_{dc} 作为被控量, 同时在控制外环中利用 PI 控制器得到 i_{dref} 。在忽略干扰的情况下 FMSS 直流电压控制方程如式(4), 控制结构见图 4。

$$i_{dref} = \left(K_{UP} + \frac{K_{UI}}{s} \right) (U_{dref} - U_{dc}) \quad (4)$$

式中: i_{dref} 为 FMSS 交流侧端口输出电流 d 轴分量参考值; U_{dref} 为 FMSS 直流母线电压参考值; K_{UP} 、 K_{UI} 分别为电压外环控制中比例、积分调节系数。

2.2 内环设计

由式(1)可知, FMSS 交流侧端口输出电流的 d 、 q 轴分量存在着耦合现象。 i_d 、 i_q 作为电流内环控制中的被控量, 利用 PI 控制器得到 FMSS 端口输出电压 U 的 d 、 q 轴分量, 电流内环控制方程如式(5), 电流内环控制结构图见图 5。

$$\begin{cases} U_d = - \left(K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) + \omega Li_q + E_d \\ U_q = - \left(K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + \omega Li_d + E_q \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{iP} 、 K_{iI} 分别为电流内环控制中的比例、积分

系数; i_{dref} 、 i_{qref} 为 FMSS 交流侧端口输出电流的 d 、 q 轴分量参考值。

最后,基于传统 PI 双环的直流母线电压控制的控制结构见图 6。

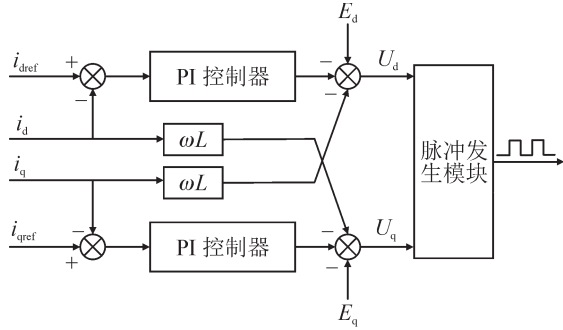


图5 电流内环控制结构图

Fig. 5 Structure diagram of current inner loop control

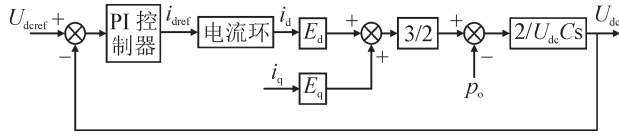


图6 基于传统PI双环控制的直流电压控制结构图

Fig. 6 DC voltage control structure diagram based on traditional PI double-loop control

3 基于LADRC的直流电压控制

LADRC 主要是由 PD 控制器、线性扩张观测器 (LESO) 这两部分组成。其中线性扩张观测器为 LADRC 的核心部位,他的功能主要是对系统运行状态、外部干扰等不确定因素整合成系统总干扰,并进行实时跟踪估计。PD 控制器由高志强学者提出,用 PD 控制器代替非线性误差反馈控制率 (NLSEF) 和跟踪微分器 (TD),使参数减少,能够大大减少参数的调节时间。传统 PI 双环控制策略常应用于 U_{dc} - Q 端口控制,以此抑制直流侧电压波动,但由于不能满足如今电网需求,可采用 LADRC 控制器来替代 PI 控制器,进一步加强系统的抗干扰能力,维持直流电压稳定。

3.1 LADRC 外环设计

根据式(3)可以得到以下方程

$$\frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{3}{C}(E_d i_d + E_q i_q) - \frac{2}{C}P \quad (6)$$

令 $y_1 = U_{dc}^2$, 则得

$$y_1 = \frac{3}{C}(E_d i_d + E_q i_q) - \frac{2}{C}P \quad (7)$$

为了方便构造系统干扰 f_1 , 将式(7)转换为下式

$$y_1 = \frac{3}{C}E_{dN} i_d + \frac{3}{C}[(E_d - E_{dN})i_d + E_q i_q] - \frac{2}{C}P \quad (8)$$

式中: E_{dN} 为 FMSS 交流侧端口输出电压 d 轴分量额

定值。

随后进行下列定义

$$\begin{cases} b_1 = \frac{3}{C}E_{dN} \\ u_1 = i_d \\ f_1 = \frac{3}{C}[(E_d - E_{dN})i_d + E_q i_q] - \frac{2}{C}P \end{cases} \quad (9)$$

同时由于文中采用电压定向控制策略,可知

$$\begin{cases} E_d = \sqrt{2}E_a \\ E_q = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_a 为 FMSS 交流侧端口输出电压 d 轴分量的有效值。

所以令

$$b_1 = \frac{3}{C}E_{dN} = \frac{3\sqrt{2}}{C}E_{aN} \quad (11)$$

由式(8)、(9)、(11)可以得到方程

$$y_1 = b_1 u_1 + f_1 \quad (12)$$

从式(12)可以知道该电压外环控制设计中, LADRC 将 FMSS 的 U_{dc} - Q 端口的参数变化、交流侧输出电压电流的 d 、 q 轴分量和直流侧端口输出的有功功率当作系统扰动,从而整合成系统总扰动 f , 随后 LESO 实时跟踪估计系统总扰动 f , 补偿系统, 以达到抑制 FMSS 直流侧电压波动的目的。LADRC 外环设计过程如下:

令 $x_1 = y_1$, $x_2 = f_1$, h 为 f_1 的微分, 则关于 U_{dc}^2 的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_1 u_1 \\ \dot{x}_2 = h \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

再设置其估计量, 令 z_1 为 x_1 的估计量, z_2 为 f_1 的估计量, 则 U_{dc}^2 的 LESO 状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y_1) + b_1 u_1 \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - y_1) \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中 β_1 、 β_2 是 LESO 的增益系数, 且式(14)的特征方程为

$$s^2 + \beta_1 s + \beta_2 = 0 \quad (15)$$

随后再将式(15)转换为 $(s + \omega_0)^2 = 0$, 此时 β_1 、 β_2 取值就可等效为 $2\omega_0$ 、 ω_0^2 , 其目的是让系统的调节时间缩短, 提高其稳定性。(ω_0 取值可由 LESO 带宽整定) 一阶 LADRC 设计采用高志强学者所提出的 PD 控制方法, 其算法为

$$u_0 = k_p(v - z_1) \quad (16)$$

式(16)中, v 为 LADRC 中被控量的给定值; k_p 为比例系数。

此时, U_{dc}^2 的控制量表示为

$$u_1 = (u_0 - z_2)/b_1 \quad (17)$$

为了使系统更容易控制,可以将原系统结构转换为简单的积分串联结构,则可以将式(17)代入式(12)可得

$$y_1 = x_1 \approx u_0 \quad (18)$$

随后整理式(16)、(17)可得控制量方程为

$$u_1 = i_{dref} = [k_p(v - z_1) - z_2]/b_1 \quad (19)$$

最后,一阶 LADRC 外环控制结构见图 7。

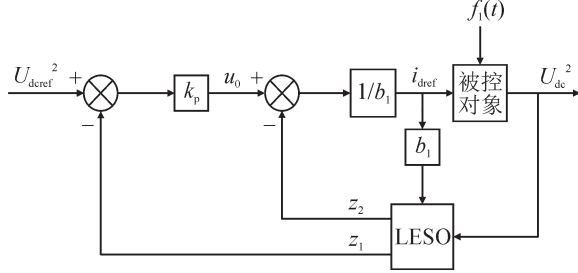


图7 一阶LADRC电压外环控制结构图
Fig. 7 Structure diagram of first-order LADRC voltage outer loop control

3.2 LADRC 内环设计

由式(1)可以推出 FMSS 的 U_{dc} - Q 端口交流侧输出电流的 d 、 q 轴分量的动态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{E_d}{L} - \frac{R}{L}i_d - \frac{U_d}{L} + \omega i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{E_q}{L} - \frac{R}{L}i_q - \frac{U_q}{L} - \omega i_d \end{cases} \quad (20)$$

由上式可知关于 FMSS 电流内环 d 、 q 轴分量的方程为一阶微分方程,则根据 3.1 节 LADRC 外环设计中线性自抗扰控制器推导过程,推导出 FMSS 电流内环 d 、 q 轴分量的一阶线性自抗扰控制器,推导公式如下:

首先,进行下列定义

$$\begin{cases} y_2 = i_d, & y_3 = i_q \\ u_2 = U_d, & u_3 = U_q \\ b_2 = -\frac{1}{L}, & b_3 = -\frac{1}{L} \\ f_2 = \frac{E_d}{L} - \frac{R}{L}i_d + \omega i_q, & f_3 = \frac{E_q}{L} - \frac{R}{L}i_q - \omega i_d \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)得

$$\begin{cases} y_2 = f_2 + b_2 u_2 \\ y_3 = f_3 + b_3 u_3 \end{cases} \quad (22)$$

从式(22)可以知道 LADRC 电流内环设计中,将其 d 、 q 轴电流的耦合项、系统的控制参数和交流侧电压 d 、 q 轴分量整合成系统扰动,从而形成系统总扰动 f_2 、 f_3 ,随后 LESO 实时跟踪估计系统总扰动,补偿系统,以达到电流内环耦合项解耦和提高系统抗干扰能力的目的。LADRC 电流内环设计过程可

参考 3.1 节 LADRC 外环设计过程, d 、 q 轴电流具有对称性,所以它们设计过程基本相同,文中不做过多叙述。 d 、 q 轴电流的一阶 LADRC 内环控制结构见图 8-9。

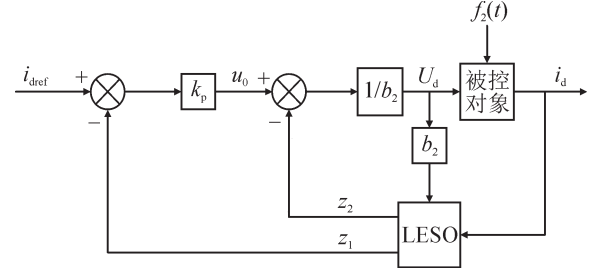


图8 d 轴电流的一阶LADRC内环控制结构图
Fig. 8 First-order LADRC inner loop control structure diagram of d -axis current

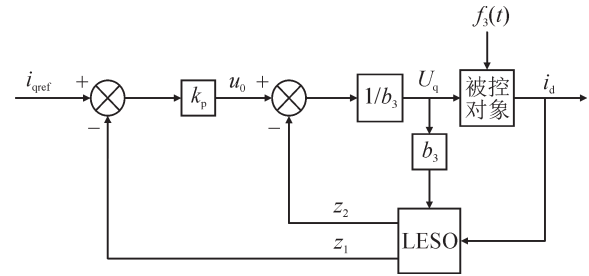


图9 q 轴电流的一阶LADRC内环控制结构图
Fig. 9 First-order LADRC inner loop control structure diagram of q -axis current

根据上述 LADRC 的外环设计和内环设计,最终可以得到 U_{dc} - Q 控制端口的 LADRC 控制结构框图,见图 10。

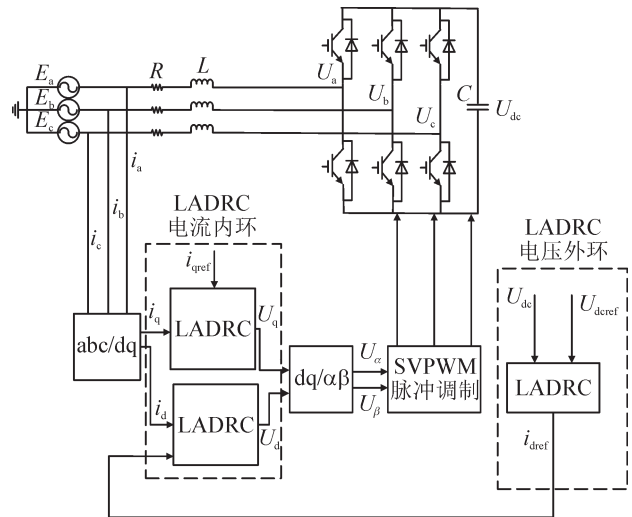


图10 LADRC控制结构图
Fig.10 LADRC control structure diagram

3.3 LADRC 稳定性分析

文中利用赫尔维茨(Hurwitz)稳定判据来验证 LADRC 的稳定性,且文中 LADRC 的观测器状态方程为

$$\begin{cases} z_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) + bu \\ z_2 = -\beta_2(z_1 - y) \end{cases} \quad (23)$$

则其特征方程为

$$s^2 + \beta_1 s + \beta_2 = 0 \quad (24)$$

根据赫尔维茨稳定判据的判定过程,列出该特征方程的系数行列式(Hurwitz 行列式)

$$\Delta = \begin{vmatrix} \beta_1 & 0 \\ 1 & \beta_2 \end{vmatrix} \quad (25)$$

又因为 β_1 、 β_2 的取值由LESO的带宽 ω_0 所决定,而文中 ω_0 取值恒大于零,则 β_1 、 β_2 的取值恒大于零。

由赫尔维茨稳定判据的判定方法可知,特征方程中系数要全部大于零,同时其顺序主子式也要全部为正值,式(25)满足要求($\Delta > 0$, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$),则可知LADRC控制系统是稳定的。

4 仿真分析

为了验证文中所提控制策略的有效性,在Simulink中搭建两端口FMSS仿真模型,通过构造电压暂降、有功突增等系统干扰,再分别采用基于传统PI双环控制的直流电压控制策略和基于LADRC的直流电压控制策略进行仿真分析,最后对比两种直流电压控制策略的控制性能。两端口具体仿真参数见表1。

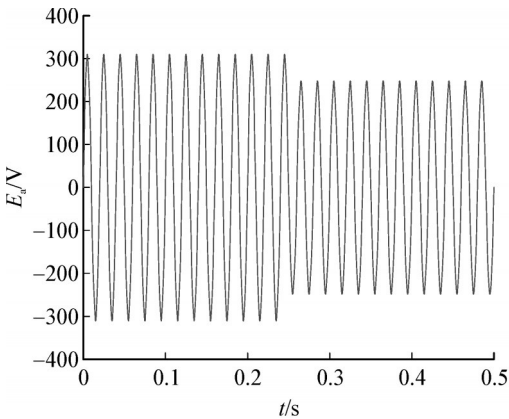
表1 系统仿真参数
Table 1 System simulation parameters

参数	数值
交流侧额定电压 U/V	380
交流侧电感值 L/mH	1.1
交流系统1等值电抗 R/Ω	0.1
交流系统2等值电抗 R/Ω	1
直流侧电容 $C/\mu F$	10 000
直流侧电压 U_{dc}/V	600
交流系统频率 f/Hz	50

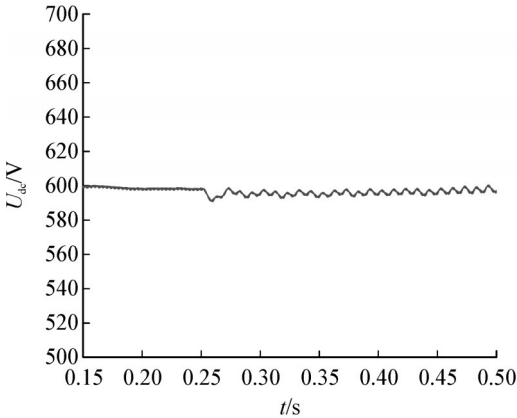
4.1 U_{dc} - Q 控制端口处馈线电压发生三相非对称跌落
文中以功率流入FMSS直流侧的方向为正方向,当系统正常运行时,在 $t=0.25\text{ s}$ 时,FMSS的VSC1部分,也就是工作模式为 U_{dc} - Q 的端口处馈线电压发生三相非对称跌落,对FMSS直流侧电压的稳定造成了干扰,仿真波形见图11, E_a 表示A相电压。图11(a)为端口交流侧A相电压仿真波形图,图中A相电压在 $t=0.25\text{ s}$ 时发生电压跌落,电压跌落20%,其余两相电压不变。

在A相电压跌落,文中采用两种直流电压控制策略来进行仿真实验,观察两种直流电压控制策略对直流侧电压波动抑制效果,其中图11(b)是采用

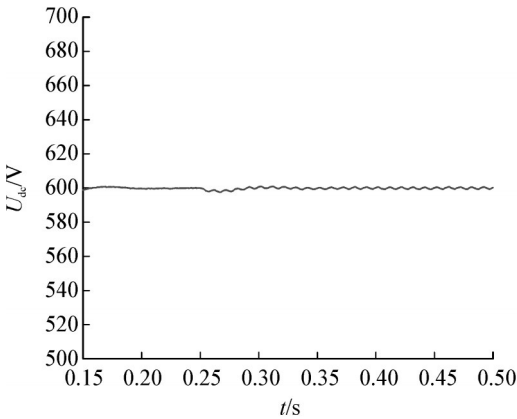
用基于传统PI双闭环的直流电压控制策略所得到仿真波形图,图11(c)是采用基于LADRC的直流电压控制策略所得到仿真波形图。进行对比可以看出,图11(c)中直流电压的波动幅度小于图11(b)中直流电压的波动幅度,两者最大波动幅度相差约4 V,因此可以发现在电压突降后,采用LADRC控制策略能有效抑制直流侧电压波动,抑制干扰的效果是优于采用传统PI双闭环控制策略的。



(a) 交流侧 A 相电压波形



(b) 采用基于传统PI双闭环控制策略时的直流侧电压波形



(c) 采用基于LADRC控制策略时的直流侧电压波形

图11 U_{dc} - Q 控制端口处馈线电压发生三相非对称跌落时的仿真波形
Fig. 11 Simulation waveform of three-phase asymmetric drop of feeder voltage at U_{dc} - Q control port

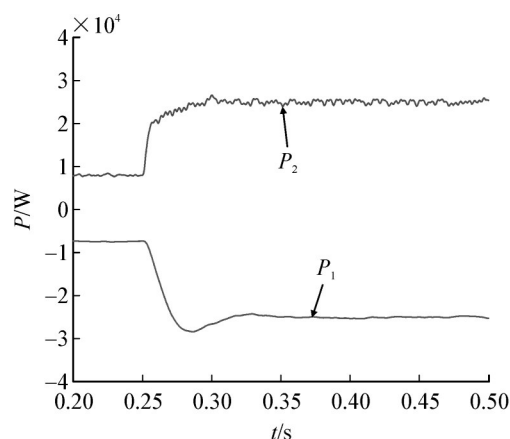
4.2 P - Q 控制端口处输出有功发生变化

初始条件与4.1节相同, P - Q 控制端口处输出有功突增时的仿真波形见图12,图12(a)和图12(b)分别为采用传统PI双闭环控制策略和采用LADRC控制策略所得到的各控制端口有功功率波形图。在FMSS系统正常运行时,FMSS的 U_{dc} - Q 控制端口有功功率 P_1 为-8 000 W, P - Q 控制端口有功功率 P_2 为8 000 W,以此保持功率平衡。在 $t=0.25$ s时,有功功率 P_2 突增到25 000 W,此时有功功率 P_1 也同样发生变化,导致FMSS直流侧电压也受到干扰。

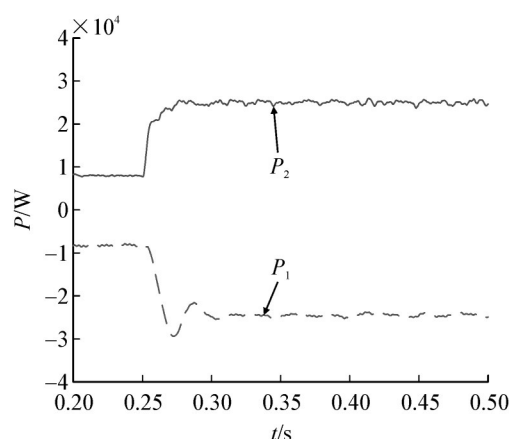
如图12(a)、图12(b)所示, P - Q 控制端口有功

功率 P_2 增大后,当采用传统PI双闭环控制策略时,有功功率 P_1 超调为3 kW,经0.11 s后重新稳定。当采用LADRC控制策略时,有功功率 P_1 超调为4.5 kW,经0.07 s后重新稳定。

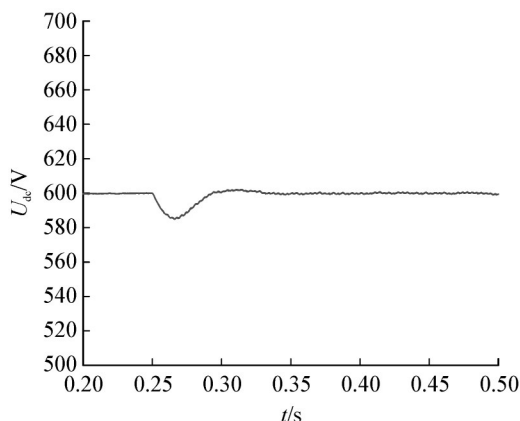
图12(c)和图12(d)分别是采用传统PI双闭环控制策略和采用LADRC控制策略时所得到的直流电压波形图,进行对比后可以发现,当采用传统PI双闭环控制策略时,直流侧电压波动幅度约为17 V,经过0.1 s重新回到600 V,而采用LADRC控制策略所得到的直流侧电压波动幅度约为8 V,经过0.06 s重新回到600 V。因此这证明了LADRC控制策略的有效性,可以有效抑制直流电压波动。



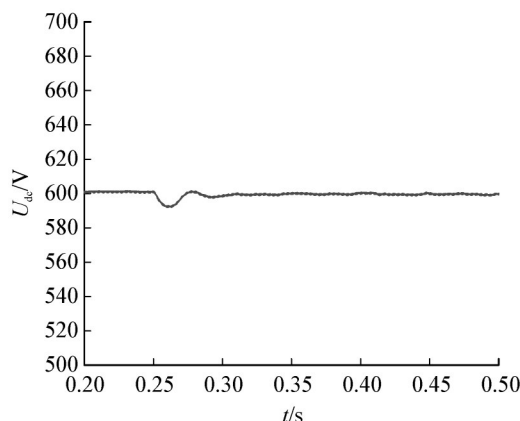
(a) 采用基于传统PI双闭环控制策略时各端口有功功率波形



(b) 采用基于LADRC控制策略时各端口有功功率波形



(c) 采用基于传统PI双闭环控制策略时的直流侧电压波形



(d) 采用基于LADRC控制策略时的直流侧电压波形

图12 P - Q 控制端口处输出有功突增时的仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform in case of sudden increase of active power at the P - Q control port

为了进一步验证LADRC控制策略的抗干扰性能,则在 $t=0.25$ s时, P - Q 控制端口有功功率 P_2 突然增加到25 000 W,而在 $t=0.35$ s时,有功功率 P_2 突降10 000 W,此时对比两种控制策略的控制效果。

P - Q 控制端口处输出有功发生变化时的仿真波形见图13所示,在有功功率突增后,有功的超调量、直流电压波动最大幅度和重新恢复时间与前面分析的相同,而在有功功率下降后,当采用传统PI

双闭环控制策略时,有功 P_1 最大超调约为3.5 kW,重新恢复时间为0.12 s,直流电压波动幅度最大为10 V,且经过0.11 s重新回到600 V。当采用LADRC控制策略时,有功 P_1 最大超调约为1.4 kW,重新恢复时间为0.07 s,直流电压波动幅度最大为7 V,且经过0.05 s重新回到600 V。进行对比可以发现,采用传统PI双闭环控制策略时,系统的响应速度慢,直流电压波动幅度大,并且直流电压重新

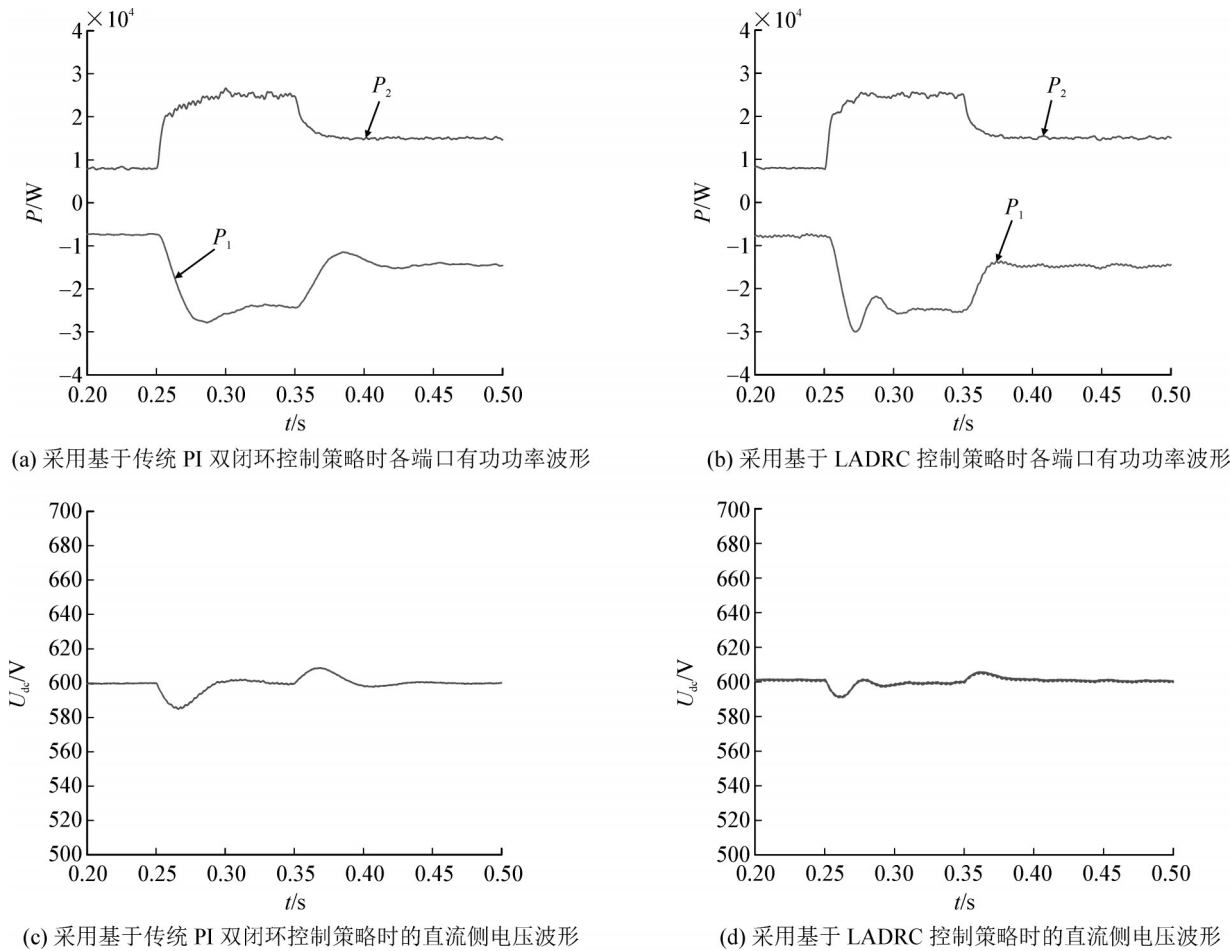


图 13 P - Q 控制端口处输出有功发生变化时的仿真波形
Fig. 13 Simulation waveform in the case of variation of output active power at the P - Q control port

稳定时间较长,而采用 LADRC 控制策略时,系统的响应速度快,直流电压波动幅度小,并且直流电压重新稳定时间短。由此可知,采用 LADRC 控制策略更能抑制系统干扰对 FMSS 直流侧电压的影响。

综合上述仿真结果可知,在面对多种干扰时,文中所提的 LADRC 控制策略对 FMSS 直流侧电压有着更好的控制效果。当电压跌落,采用 LADRC 控制策略时,直流电压的波动幅度明显小于采用传统 PI 双闭环控制策略时。当端口有功突然变化,采用 LADRC 控制策略时,虽然端口有功超调有所增加,但是有功重新稳定所需的时间也减少,同时系统的直流电压波动幅度明显减小,直流电压重新稳定时间大大缩短。由此可知,文中所提的 LADRC 控制策略对 FMSS 直流侧电压有着更好的控制效果,体现所提控制策略具有优秀的抗扰性能,这也验证了所提控制策略的有效性。

5 结语

基于背靠背型两端口 FMSS,本文分析其工作原理,建立了数学模型,探讨了传统 PI 双闭环和

LADRC 控制的工作原理,研究了电压外环和电流内环的控制结构,从而提出基于 LADRC 的 FMSS 直流电压控制策略。此控制策略用 LADRC 控制器替换电压外环和电流内环中的 PI 控制器,通过跟踪估计直流电压和内环电流偏差及其变化趋势,并进行补偿,加强对电压电流的跟踪能力,进而获得更强的抗干扰性能,维持系统直流电压稳定。最后将本文所提控制策略与传统 PI 双环控制相比,当面对系统干扰时,基于 LADRC 的控制策略对于系统干扰有着更好的控制效果,其能够很好抑制 FMSS 直流侧电压波动,使电压稳定在要求值附近,并且有效减小直流电压超调,加快系统稳定。

本文所提控制策略,简化了参数整定过程,节约调节时间,同时其策略易于实现,对于 FMSS 的稳定有着很大的帮助,具有一定工程应用价值。但是该策略也有不足之处,比如其参数仍需人工整定,不能实现实时整定,这也就是接下来所要研究的工作。

参考文献

[1] 欧繁,范心明,彭元泉,等. 主动配电网中多端柔性多状态开关的选址定容优化[J]. 电力电容器与无功补偿,

- 2021,42(1):142-149.
- OU Fan, FAN Xinming, PENG Yuanquan, et al. Optimization of location and capacity of multi-terminal flexible multi-state switches in active distribution network[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 142-149.
- [2] 王成山,孙充勃,李鹏. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
- WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng. Optimization and analysis of distribution network operation based on SNOP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.
- [3] 杨勇,陆翌,许烽. 基于FMSS的配电网馈线互联控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 152-156.
- YANG Yong, LU Yi, XU Feng. Control strategy of feeder interconnection in distribution network based on FMSS[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 152-156.
- [4] SHAIK M, CHEN H, RASHED G, et al. Adequate topology for efficient energy resources utilization of active distribution networks equipped with soft open point[J]. IEEE Access, 2019(7): 99003-99016.
- [5] LIU W, SUN L, LIN Z, et al. Multi-objective restoration optimization of power systems with battery energy storage systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1749-1757.
- [6] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [7] 彭翠萍,栗梦涵,刘水,等. 用于馈线互联的柔性多状态开关研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 132-136.
- PENG Cuiping, LI Menghan, LIU Shui, et al. Research on flexible multi-state switch for feeder interconnection[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 132-136.
- [8] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A method for optimizing operation sequence of distribution network with coexistence of tie switch and intelligent soft switch[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [9] 彭元泉,麦志远,艾维,等. 含柔性多状态开关的主动配电网有功-无功协调动态优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 54-61.
- PENG Yuanquan, MAI Zhiyuan, AI Wei, et al. Active power-reactive power coordination dynamic optimization of active distribution network with flexible multi-state switches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 54-61.
- [10] 王灿,吴耀文,孙建军,等. 基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 77-85.
- WANG Can, WU yanwen, SUN Jianjun, et al. Double-layer load balancing method for active distribution network based on flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 77-85.
- [11] 袁勇,袁旭峰,邵振,等. 含SNOP的柔性互联配电网无功优化技术研究评述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 114-122.
- YUAN Yong, YUAN Xufeng, SHAO Zhen, et al. Review on reactive power optimization technology of flexible interconnected distribution network with SNOP[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 114-122.
- [12] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust restoration method for active distribution networks[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2016, 31(5): 4005-4015.
- [13] DING T, WANG Z, JIA W, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2020(11): 4795-4808.
- [14] 蔡云旖,屈子森,杨欢,等. 柔性多状态开关改进型下垂控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2488-2497.
- CAI Yunyi, QU Zisen, YANG Huan, et al. Research on improved droop control strategy for soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2488-2497.
- [15] 沈聪,张国荣,彭勃,等. 具备干扰抑制能力的柔性多状态开关直流电压控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1198-1205.
- SHEN Cong, ZHANG Guorong, PENG Bo, et al. DC voltage control strategy of flexible multi-state switch with disturbance rejection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1198-1205.
- [16] 张国荣,沈聪,彭勃,等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3050-3058.
- ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multi-state switch in the case of feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [17] 张国荣,朱一鸣,彭勃,等. 基于三端口柔性多状态开关不同运行模式间的切换技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 1-8.
- ZHANG Guorong, ZHU Yiming, PENG Bo, et al. Switching technology between different operating modes based on three-port flexible multi-state switch[J]. Electrical Measure-

- ment & Instrumentation, 2020, 57(11): 1-8.
- [18] YOU J, VILATHGAMUWA M, GHASEMI N. DC bus voltage stability improvement using disturbance observer feed-forward control[J]. Control Engineering Practice, 2018, 75: 118-125.
- [19] ZHANG L, CHEN K, LYU L, et al. Research on the operation control strategy of a low-voltage direct current microgrid based on a disturbance observer and neural network adaptive control algorithm[J]. Energies, 2019, 12(6): 1-17.
- [20] 李霞林, 郭力, 冯一彬, 等. 基于非线性干扰观测器的直流微电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 350-359.
- LI Xialing, GUO Li, FENG Yibin, et al. A nonlinear disturbance observer based DC bus voltage control for a DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 350-359.
- [21] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [22] GAO Z. Scaling and bandwidth - parameterization based controller tuning[C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, USA: IEEE, 2003: 4989 - 4996.
- [23] 魏选. 三电平PWM整流器线性自抗扰控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- 作者简介:**
- 王正齐(1984—), 男, 副教授, 主要研究方向为新型智能配电设备及其应用。E-mail: wzqnjit@163.com。
- 徐浩(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性多状态开关及其控制策略。
- 王德全(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护、交直流专业工作。

(上接第106页)

- QU Zhenming, WANG Bin, ZHANG Huifen. Single phase grounding fault location of multi branch cable line in distribution network with neutral point via small resistance grounding[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(5): 28-33.
- [25] 陈维江, 孙昭英, 王献丽, 等. 35 kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 61-65.
- CHEN Weijiang, SUN Zhaoying, WANG Xianli, et al. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 61-65.
- 作者简介:**
- 李瑞祥(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术。E-mail: lrx.wetenschap@foxmail.com。
- 李舟(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 李巍(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 王雨(1992—), 男, 工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 王少鲁(1982—), 男, 工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 黄易之(1989—), 男, 博士, 主要从事高电压技术工作。
- 李永峰(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 杨兰均(1969—), 男, 教授, 研究方向为高电压技术。