基于残差生成器的分散补偿控制策略

周文,杨少波

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院,河北 石家庄 050021)

摘要:在直流微电网中,母线电压稳定是维持系统正常运行的关键。负载投切和分布式微源功率波动都 会对直流母线电压的稳定造成影响。针对上述问题提出一种基于残差生成器的分散补偿控制策略。首先,将 Boost变换器模型进行线性化处理得到其状态空间方程。其次,设计直流*I—V*下垂控制以及电压偏差补偿控 制。最后,针对电流扰动设计基于残差生成器的补偿控制结构,并通过模型匹配求解补偿控制器。通过仿真 实验可知,该控制结构在不改变原系统控制结构的前提下,可以有效地解决直流母线电压波动问题,增强整个 直流微电网系统的鲁棒性。

关键词:直流微电网;电能质量;残差生成器;模型匹配 中图分类号:TM46 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd23220

Decentralized Compensation Control Strategy Based on Residual Generator

ZHOU Wen, YANG Shaobo

(The State Grid Hebei Electric Power Company Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: In the DC microgrid, bus voltage stability is the key to maintain the normal operation of the system. Load switching and distributed micro-source power fluctuations will affect the stability of the DC bus voltage. To solve the above problem, a compensation control strategy based on the residual generator was proposed. Firstly, the state-space model of the Boost system was established. Then, the DC I-V droop control method and voltage deviation compensation control were designed. Finally, a compensation control structure based on the residual generator was obtained by the model matching principle. Simulation experiments show that the control strategy can effectively solve the DC bus voltage fluctuation problem, and enhance the robustness of the DC microgrid system.

Key words: DC microgrid; power quality; residual generator; model matching

近年来我国的社会经济水平飞速发展,高比 例可再生能源伴随着电力电子装置开始大规模 地接入到电网系统中^[1-2]。直流微电网是可再生 能源并网的关键桥梁,其通常由分布式能源、电 力电子装置、储能装置、保护装置以及多种类型 的负荷组成^[3-4]。为了电网技术的发展,实现电力 系统的智能化,直流微电网需要得到进一步推 广^[5]。而提高系统可靠性、解决电能质量问题是 直流微电网研究的重点。

维持直流微电网系统稳定运行的关键是保 持母线电压的恒定,由于靠近用户侧,受到负载 投切的影响,直流母线电压容易发生突变⁶⁶。同 时分布式微源的投切和输出功率的随机性同样 会造成直流母线电压波动。传统的控制策略可 以保证正常情况下的母线电压稳定,但在电能质 量问题发生时,母线电压无法维持稳定。

为了解决此问题,众多专家学者进行了相应 研究。文献[7]提出了基于储能电池的协调控制 策略,保持直流母线电压的稳定。文献[8]基于非 线性扰动观测器提出了一种直流母线电压控制方 法,增加系统的鲁棒性。文献[9]在文献[8]的基础 上改进DC-DC双向变流器控制策略,从而解决了 直流母线电压波动的问题。文献[10]基于残差生 成器提出了一种新型的直流母线电压控制策略, 实现了直流母线电压波动幅值的削弱。文献[11] 基于直流分布式电网的弱耦合特点提出了一种基 于鲁棒分散式的电压控制框架,抑制了变换器和 本地负载接入/切除所产生的电压波动。文献[12]

基金项目:国家电网有限公司科学技术项目(kjcb-2020-36) 作者简介:周文(1978—),男,高级工程师,Email:hbdyyzhw@163.com

中提出了一种计及直流微电网扰动抑制的残差 动态分散补偿控制策略,将本地负荷电流、线路 电流稳态值与环流作为扰动进行补偿,但此方法 需要添加多个电流信号采集器,增加了系统成

为保证直流微电网母线电压的稳定,在原变 换器采用分散控制的基础上,本文提出了一种基 于残差生成器的分散式补偿控制策略。在直流 微电网 Boost变换器 I—V下垂控制基础上,针对 负载投切和分布式微源输出功率波动造成的母 线电压波动问题,利用模型匹配原理设计求解补 偿控制器,通过基于残差生成器的分散式补偿控 制策略对直流母线电压波动进行抑制,增强了直 流微电网系统的抗干扰能力。

1 系统建模与下垂控制

1.1 Boost 变换器建模

本,不利于实际应用。

Boost变换器是常见的电力电子转换装置,在 直流微电网中经常并联应用,并联系统如图1所 示。其中,u_{pec}为直流母线电压;R_{pec}为公共负载;i_{pec} 为公共负载电流;r_{ine,i},r_{ine,j}分别为变换器i和j的线 路电阻;R_i,R_j分别为变换器i和j的本地负载;L_i,L_j 分别为变换器i和j的电感;C_i,C_j分别为变换器i和 j的电容;r_i,r_j分别为变换器i和j的电感寄生电阻; i_{L,i},i_{L,j}分别为变换器i和j的电感电流;u_{e,i},u_{e,j}分别为 变换器i和j的电容电压;i_{o,i},i_{o,j}分别为变换器i和j 的输出电流;E_i,E_j分别为变换器i和j的稳定直流 源电压;i_{ij}为变换器i和j的本地负载电流;i_{pec,i},i_{pec,j} 分别为流向Boost变换器i的公共负载电流。



根据图1得到Boost变换器i的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L},i}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L_i} E_i - \frac{r_i}{L_i} i_{\mathrm{L},i} - \frac{(1-D_i)}{L_i} u_{\mathrm{e},i} \\ \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{e},i}}{\mathrm{d}t} = \frac{(1-D_i)}{C_i} i_{\mathrm{L},i} - \frac{1}{C_i} i_{\mathrm{o},i} \end{cases}$$
(1)

式中: D_i 为Boost变换器i的开关占空比。

在考虑本地负载电流、公共负载电流和变换器之间电流的基础上,Boost变换器i的输出电流可表示为

 $i_{o,i} = i_{pec,i} + i_{load,i} - i_{ij} + i_{d,i}$ (2) 式中: $i_{d,i}$ 为变换器i的非基波扰动电流,其在理想 状态下为0。

在式(1)中存在 $(1-D_i)u_{e,i}$ 和 $(1-D_i)i_{L,i}$ 两项非 线性项,为得到 Boost 变换器的状态空间模型,定 义稳定点的微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L0,i}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L_i} E_i - \frac{r_i}{L_i} i_{\mathrm{L0,i}} - \frac{(1 - D_{\mathrm{0,i}})}{L_i} u_{\mathrm{c0,i}} \\ \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c0,i}}}{\mathrm{d}t} = \frac{(1 - D_{\mathrm{0,i}})}{C_i} i_{\mathrm{L0,i}} - \frac{1}{C_i} i_{\mathrm{c0,i}} \end{cases}$$
(3)

式中:D_{0,i}为变换器i的稳态点占空比;u_{e0,i},i_{L0,i}分 别为变换器i的稳态点电容电压和电感电流;i_{e0,i} 为变换器i稳定点输出电流,其不包含扰动电流 项i_{d,i}。

当变换器为单极调制,载波幅值为1时,调制 波 *u*_k,=*D*_i。结合式(1)和式(3)得到稳定点处的线 性化状态空间方程:

$$\begin{bmatrix} i_{\mathrm{L},i} - i_{\mathrm{L}0,i} \\ u_{\mathrm{c},i} - u_{\mathrm{c}0,i} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{\mathrm{L},i} - i_{\mathrm{L}0,i} \\ u_{\mathrm{c},i} - u_{\mathrm{c}0,i} \end{bmatrix} + B(u_{k,i} - u_{k0,i}) + Ei_{\mathrm{d},i}$$
$$\begin{bmatrix} u_{\mathrm{c},i} - u_{\mathrm{c}0,i} \\ u_{\mathrm{c},i} - u_{\mathrm{c}0,i} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{\mathrm{L},i} - i_{\mathrm{L}0,i} \\ u_{\mathrm{c},i} - u_{\mathrm{c}0,i} \end{bmatrix}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{(1 - D_{0,i})}{L_i} & -\frac{r_i}{L_i} \\ \frac{(1 - D_{0,i})}{L_i} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{u_{e0,i}}{L_i} \\ -\frac{i_{10,i}}{C_i} \end{bmatrix}$$
$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_i} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.2 直流下垂控制与电压偏差补偿

为使变换器实现分散控制策略,完成负载电流均分,本文并联Boost变换器采用基于*I—V*特性曲线的下垂控制策略,其控制策略表达式为

$$u_{c,i}^* = v_{dc,i}^* - n_i i_{o,i}$$
(5)

式中:u^{*}_{ci}为变换器i的电压环给定参考值;v^{*}_{dci}为 变换器i的下垂环给定参考值;n_i为变换器i的下 垂系数。

在采用I-V特性曲线情况下,两台变换器输

(4)

出电流的关系为

$$\frac{\dot{i}_{o,i}}{\dot{i}_{o,j}} = \frac{n_j + r_{\text{line},j}}{n_i + r_{\text{line},i}} \tag{6}$$

式中:n_j为Boost变换器j的下垂系数,也可称为虚 拟电阻。

在传统的下垂控制中,虽然可以根据下垂系数对变换器输出电流按比例控制,但是下垂系数同时导致了输出电压的偏差,进而影响到母线电压的稳定性,因此需要设计电压偏差补偿控制, 从而实现母线电压稳定,其表达式为^[13]

$$u_{c,i}^{*} = v_{dc,i}^{*} - n_{i}i_{o,i} + \Delta v_{i}^{0}$$
(7)

其中

$$\Delta v_i^0 = a_i I_i^{\text{avg}} I_i^{\text{rated}} \tag{8}$$

式中:Δv_i⁰为电压偏差值;a_i为调节增益;I_i^{ated}为变 换器i的额定电流值;I_i^{avg}为系统中所有分布式微 源输出电流的平均值。

2 分散式补偿控制结构

2.1 基于残差生成器的分散式补偿控制结构

根据式(4)得到系统的一般状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}_i + \boldsymbol{E}_i \boldsymbol{d}_i \\ \boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{x}_i \end{cases}$$
(9)

其中

$$\boldsymbol{x}_{i} = \begin{bmatrix} i_{\mathrm{L},i} - i_{\mathrm{L}0,i} & \boldsymbol{u}_{\mathrm{c},i} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{c}0,i} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{u}_{i} = \boldsymbol{u}_{k,i} - \boldsymbol{u}_{k0,i}$$
$$\boldsymbol{\gamma}_{i} = \boldsymbol{u}_{c} = \boldsymbol{u}_{c0,i}$$

式中: x_i 为变换器i的状态量; u_i 为变换器i的输入 量; d_i 为变换器i的扰动输入量; y_i 为变换器i输出 量; A_i , B_i , C_i , E_i 为适当维数矩阵。

根据式(9)被控对象状态空间模型,采用极 点配置设计观测器增益矩阵*L_i*,从而得到状态观 测器的状态空间方程:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_i = (\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{L}_i \boldsymbol{C}_i) \hat{\boldsymbol{x}}_i + \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}_i + \boldsymbol{L}_i \boldsymbol{y}_i \\ \hat{\boldsymbol{y}}_i = \boldsymbol{C}_i \hat{\boldsymbol{x}}_i \end{cases}$$
(10)

其中

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{i} = [\hat{i}_{\mathrm{L},i} - \hat{i}_{\mathrm{L}0,i} \quad \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{c},i} - \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{c}0,i}]^{\mathrm{T}} \\ \hat{\boldsymbol{y}}_{i} = \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{c},i} - \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{c}0,i}$$

式中: \hat{x}_i 为变换器i的重构状态量; \hat{y}_i 为状态观测量。

基于下垂控制的Boost变换器并联系统是典型的分散控制结构,在原控制器保证系统稳定时,针对扰动输入对系统稳定性的影响,文献[14] 中提出了一种基于残差生成器的容错控制结构, 如图2所示。



在图 2 中,残差信息 r_i常被用来进行系统故障定位与诊断,以及扰动的检测与抑制。为得到系统的残差,根据式(9)和式(10)得到残差生成器的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \hat{x}_{i} = (A_{i} - L_{i}C_{i})\hat{x}_{i} + B_{i}u_{i} + L_{i}y_{i} \\ r_{i} = y_{i} - \hat{y}_{i} = C_{i}x_{i} - C_{i}\hat{x}_{i} \\ = (u_{c,i} - u_{c0,i}) - (u_{c,i} - u_{c0,i}) \end{cases}$$
(11)

式中:r_i为残差输出量。

残差信息能体现扰动和故障等因素对系统的影响程度,当系统不受扰动和故障影响时,*r*_{*i*}=0;当系统受到扰动和故障影响时,*r*_{*i*}≠0。

如图3所示,在Boost变换器采用下垂控制策略时,补偿控制器Q'(s)的补偿控制信号 u'_{ri} 对扰动 d_i 进行补偿,从而保证输出信号 y_i 的稳定。然而,通过下垂控制中的电压电流双闭环结构会导致二次扰动的出现。 u'_{ri} 经过部分被控对象 $G_{1,i}(s)$ 后会通过反馈通道影响电流内环误差 $e_{1,i}$,造成二次扰动。为了避免补偿信号变为新的扰动信号,将补偿控制器Q'(s)进行位置变化,得到新的控制结构,其补偿控制器为Q(s)。



为方便采用模型匹配的方法求解补偿控制器 Q(s),对图3中的控制结构进行转换,由式(9)和式 (10)得到扰动残差生成器的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_{rd} = (\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{L}_i \boldsymbol{C}_i) \boldsymbol{x}_{rd} + \boldsymbol{E}_i \boldsymbol{d}_{rd} \\ \boldsymbol{y}_{rd} = \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{x}_{rd} \end{cases}$$
(12)

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rd} &= \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i \\ \mathbf{d}_{rd} &= \mathbf{i}_{d,i} \\ \mathbf{y}_{rd} &= \mathbf{r}_i = (u_{c,i} - u_{c0,i}) - (\hat{u}_{c,i} - \hat{u}_{c0,i}) \end{aligned}$$

式中:x_{rd}为状态量;d_{rd}为输入量;y_{rd}为残差输出量。

基于式(12)可将图3中以控制信号 u_i 和输出 信号 y_i 为输入的残差生成器转化为以扰动信号 d_i 为输入的扰动残差生成器,如图4所示。



Fig.4 Improved compensation control structure based on the disturbance residual generator

根据图4在没有给定输入的情况下,只考虑 扰动信号*d*_i为系统输入时,得到系统的模型匹配 结构,如图5所示。



其中,**T**_{rd}(s)为以扰动为输入残差为输出的 扰动残差生成器,其状态空间表达式为式(11)。 **T**_{yd}(s)为以扰动为输入的被控对象,其传递函数 表达式为

$$\boldsymbol{T}_{\rm yd}(s) = -1 \tag{13}$$

 $T_{p}(s)$ 为以补偿信号为输入的被控对象,其传递函数表达式为

$$\boldsymbol{T}_{p}(s) = \frac{\boldsymbol{K}_{1,i}(s)\boldsymbol{G}_{1,i}(s)}{1 + \boldsymbol{K}_{1,i}(s)\boldsymbol{G}_{1,i}(s)}$$
(14)

根据图5模型匹配结构,在扰动*d*_i作为输入时,由于补偿控制器*Q*(*s*)的加入补偿了扰动信号 *d*_i,使得输出*z*_i趋近于0,消除了扰动对系统稳定的影响。*Q*(*s*)可通过下式进行求解^[15]:

 $\min \|T_{yd}(s) - T_{rd}(s)Q(s)T_{p}(s)\|_{s}$ (15) 根据图5可以将模型匹配问题转化为鲁棒控 制问题,如图6所示。其中, $T_{rd}(s)$, $T_{yd}(s)$ 和 $T_{p}(s)$ 构成广义控制对象,Q(s)相当于鲁棒控制器,整 个结构属于典型的鲁棒反馈控制结构。由文献 [16]可知,Q(s)可采用线性矩阵不等式方法进行

为了方便在实际工程中的应用,也可用简便 方法求解Q(s)。假设在理想情况下 $z_i=0$,根据式 (15),将 $T_{rd}(s)$ 的状态空间表达转换为传递函数, 得到Q(s)的求解公式为

求解。



图6 鲁棒控制框架

Fig.6 Robust control framework

将基于残差生成器的动态补偿控制应用于 Boost变换器系统中,得到如图7所示的整体控制 结构。



图 7 基于残差生成器的 Boost 变换器并联系统补偿控制 Fig.7 Compensation control of parallel system of Boost converter based on residual generator

3 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建 Boost 变换器并联 系统,设计公共负载投切和功率波动实验。在同 时具有下垂控制和电压偏差补偿控制时,对比有 无本文所提补偿控制的电压波形,验证控制算法 的有效性。系统参数如表1所示。

表1 Boost 变流器参数

Tab.1 Boost converter parameters		
参数	变换器1	变换器2
滤波电感/mH	0.8	0.8
电感寄生电阻/Ω	0.1	0.1
滤波电容/μF	3 000	3 000
线路电阻/Ω	0.5	0.2
公共母线电压/V	400	400
电压环比例系数	0.5	0.5
电压环积分系数	40	40
电流环比例系数	10	10
电流环积分系数	0	0
下垂系数	0.3	0.3

3.1 公共负载投切实验

在并联 Boost 变换器并联系统中, 直流母线

上接入10 Ω负载作为系统的稳态负荷,同时使用 20 Ω负载作为投切负荷。在负荷投切时,对比本 文所提控制策略与传统直流下垂控制下的Boost 变换器输出电压和母线电压,实验结果如图8~图 10所示。



如图8所示,在公共负载投切时,距离公共负载较远的Boost变换器1输出电压突变幅值较小,减载时突增16.5 V,加载时突降15.2 V。距离公共负载较近的Boost变换器2输出电压突变幅值较大,减载时突增19.1 V,加载时突降18.3 V。





如图9所示,在加入本文所提补偿策略后,变换 器输出电压突变幅值明显下降,距离公共负载较远 的Boost变换器1输出电压减载时突增0.5 V,加载 时突降0.8 V。距离公共负载较近的Boost变换器 2输出电压减载时突增1.5 V,加载时突降3.2 V。

如图 10 所示,在公共负载投切时,无补偿控制的母线电压突变幅值较大,减载时突增 21.6 V,加载时突降 19.2 V。在加入本文所提补偿策略后母线电压突变幅值明显降低,减载时突增 4.3 V,加载时突降 4.1 V,电压变化率分别为 1.075% 和 1.025%,符合 5% 以内的国家标准。

3.2 功率波动实验

在并联Boost变换器并联系统中,直流母线上接 人10Ω负载作为系统的稳态负荷,同时在直流母 28





线上并联受控直流源。通过受控电流源输出正弦电流,模拟分布式微源功率波动,本文所提控制策略与传统直流下垂控制下的Boost变换器输出电压和母线电压,实验结果如图11~图13所示。



如图 11 所示,在功率波动时,距离较远的 Boost变换器1输出电压波动幅值差较小,为26.8 V。 距离较近的 Boost变换器2输出电压波动幅值差 较大,为28.8 V。



如图 12 所示,在加入本文所提补偿策略后,变 换器输出电压波动幅值差明显下降,距离较远的 Boost变换器 1 输出电压波动幅值差为 8.7 V。距离 较近的 Boost变换器 2 输出电压波动幅值差为 6.4 V。

如图 13 所示,在功率波动时,无补偿控制的 母线电压波动较大,波动幅值差为 34.4 V。在加 入本文所提补偿策略后母线电压波动明显减弱, 波动幅值差为 4.5 V,电压变化率为 1.125%,符合



Fig.13 Power fluctuation DC bus voltage contrast

4 结论

本文针对直流微电网中负载投切和功率波 动导致的母线电压失稳,提出了一种基于残差生 成器的补偿控制结构。以Boost变换器的线性化 模型为例,在I—V下垂控制与电压偏差补偿控制 的基础上,设计残差生成器与补偿控制器,利用 残差信号补偿电流扰动带来的母线电压波动问 题,最后在PSCAD/EMTDC仿真平台上,验证了本 文所提控制策略的有效性。

参考文献

- 白建华,辛颈旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展 路径研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
 Bai J H, Xin S X, Liu J, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3699-3705.
- [2] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
 Kang C Q, Yao L Z. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(9):2-11.
- [3] Mokhtar M, Marei M I, El-Sattar A A. An adaptive droop control scheme for DC microgrids integrating sliding mode voltage and current controlled Boost converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1685–1693.
- [4] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
 Li X L, Guo L, Wang C S, *et al.* Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (1):2-17.
- [5] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.

Wang C S, Wu Z, Li P. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(2):1-12.

- [6] 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 C S, Li W J, Wang Y F, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):84-98.
- [7] 范柱烽,毕大强,任先文,等.光储微电网的低电压穿越控制 策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):6-12.
 Fan Z F, Bi D Q, Ren X W, et al. Low voltage ride-through control of the photovoltaic/battery microgrid system[J]. Power System Protection and Control,2015,43(2):6-12.
- [8] Li X L, Wang C S, Guo L, *et al*. A nonlinear disturbance observerbased DC-bus voltage control for a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11):6162– 6177.
- [9] 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 X L, Guo Li, Feng Y B, *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.

- [10] 关丛荣,陆珩,胡长斌,等.基于残差生成器的直流微电网动 态补偿控制[J].控制工程,2021,28(8):1608-1614.
 Guan C R, Lu H, Hu C B, *et al.* Dynamic compensation control strategy of DC microgrid based on residual generator[J]. Control Engineering of China,2021,28(8):1608-1614.
- [11] Sadabadi M S, Shafiee Q, Karimi A. Plug-and-play robust voltage control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6): 6886–6896.
- [12] 胡长斌,王慧圣,罗珊娜,等.计及直流微电网扰动抑制的残差动态分散补偿控制策略[J].电工技术学报,2021,36(21):4493-4507,4543.
 Hu C B, Wang H S, Luo S N. Residual dynamic decentralized

compensation control strategy considering disturbance suppression in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21):4493–4507, 4543.

- [13] Anand S, Fernandes B G, Guerrero J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1900–1913.
- [14] Ding S X. Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant systems[M]. New York : Springer, 2014.
- [15] Francis B A. A course in H1 control theory[M]. Berlin: Springer, 1987.
- [16] 吴敏,桂卫华,何勇.现代鲁棒控制(第二版)[M].长沙:中南 大学出版社,2006.
 Wu M,Gui W H,He Y. Modern robust control(second edition)
 [M]. Changsha; Central South University Press, 2006.

收稿日期:2021-03-16 修改稿日期:2021-06-10