

基于改进滑模的高压直挂式构网型储能控制策略

徐志洋¹, 陈来军^{1,2}, 苏小玲¹, 赵正奎¹, 杨军³, 许德操⁴

(1. 青海大学新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室, 西宁 810016; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 3. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810001; 4. 国家能源集团青海电力有限公司, 西宁 810002)

摘要: 高压直挂式构网型储能是解决新能源电力系统电压频率问题的关键设备。大扰动工况下电网电压频率快速变化, 要求快速支撑和抗扰动能力。本文首先基于高压直挂式储能拓扑建立了大扰动工况下的数学模型。在此基础上, 提出了基于滑模控制的高压直挂式构网型储能控制策略, 通过改进滑模面及趋近律函数解决抖振问题。并提出了基于幂次函数的滑模控制律。最后, 建立李雅普洛夫函数证明改进滑模构网控制策略满足稳定条件。仿真结果表明, 与采用比例积分控制器的构网型控制系统相比, 模块化级联高压直挂式构网型储能系统采用基于改进滑模控制具备更强的抗干扰能力和电压支撑效果。

关键词: 构网型储能; 高压直挂式储能; 李雅普洛夫函数; 滑模控制; 高抗扰; 电压支撑

Grid Forming Control Strategy Based on Improved SMC for Modular Cascade High-voltage Direct-mounted Energy Storage

XU Zhiyang¹, CHEN Laijun^{1,2}, SU Xiaoling¹, ZHAO Zhengkui¹, YANG Jun³, XU Decao⁴

(1. Key Laboratory of Smart Operation of New Energy Power System (Qinghai University), Ministry of Education, Xining 810016, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Scientific Research Institute, Xining 810001, China; 4. National Energy Group Qinghai Electric Power Co., Ltd., Xining 810002, China)

Abstract: High-voltage direct-mounted grid-forming energy storage is a key device for solving voltage and frequency in new energy power systems. Under large disturbance conditions, the rapid changes in grid voltage and frequency require rapid support and disturbance rejection capabilities. In this paper, a mathematical model for high-voltage direct-mounted energy storage under large disturbance conditions based on its topology is set up firstly. On this basis, a control strategy for high-voltage direct-hung grid-forming energy storage based on sliding mode control is proposed, which addresses the chattering problem by improving the sliding surface and the reaching law function. Additionally, a sliding mode control based on a power function is proposed. Finally, a Lyapunov function is set up to prove that the improved sliding mode grid-forming control strategy meets the stability conditions. The simulation results show that compared with the grid-forming control system using a proportional-integral controller, the modular cascaded high-voltage direct-mounted grid-forming energy storage system using the improved sliding mode control has stronger disturbance resistance capabilities and voltage support effects.

Keywords: grid-forming energy storage; high-voltage direct-mounted energy storage; Lyapunov function; sliding mode control; high impedance; voltage support

0 引言

新能源^[1]发电及其配套电力电子设备的高比例并网导致电力系统等效惯量下降,电压频率调节难度不断增加。大扰动情况下电网电压快速变化,基于电容器和电抗器阻抗特性的静态无功补偿器^[2]、静态无功发生器^[3]输出容量受母线电压和过载能力约束,输出容量和响应速度难以满足系统运行需求。另一方面,电力系统按预案运行的控制方式固有响应速度慢、通信迟滞等问题^[4],很难适用于以新能源为主体的新型电力系统建设需要。因此,新能源大规模并网需要储能等具备主动支撑能力的设备承担电压频率调节责任^[5]。

由集中布置并采用升压变压器并网^[6]的多级升压储能工程需要考虑储能单元、升压变压器之间的协调控制、故障保护等问题,普遍存在电站结构复杂、运行成本高、损耗大^[7]及占地面积广等问题。高压直挂式储能中模块化级联功率单元的设计结构,各子模块可独立运行,可有效提升储能系统生命周期价值^[8]。此外,高压直挂储能单台设备容量大,无需变压器可直接并网等特征,适用于新能源高占比电网电压频率快速支撑^[9]、高效可靠^[10]、经济安全的需求^[11]。目前 10 kV 及以下电压等级的高压直挂式储能系统已相对成熟^[12],研究工作主要聚焦在系统设计、功率控制^[13]、调制及冗余容错控制策略^[14]。

构网型储能系统同时兼具常规储能、无功补偿等功能,可极大提升储能的惯性和调速响应能力^[15]。下垂控制为有差调节,但无法保证系统电压频率在大扰动后准确收敛到额定值,并不适用于接入电网的储能系统。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)构网控制^[16]可模拟同步发电机的惯量以及阻尼特性从而使储能系统与传统发动机具有相似的电气特性^[17]。文献[18]指出 VSG 控制有惯量支撑^[19],优化控制参数可有效改善 VSG 控制系统的动态响应与优化系统储能容量配置,从而改善系统性能;文献[20]为储能系统设计了自适应 VSG 控制,在稳定输出功率的同时具备良好的频率电压支撑能力,但其建模分析只适用小信号分析,电网大扰动工况下,响应特性尚不明确,控制策略有待完善。

作为典型的非线性控制,滑模控制(sliding mode control, SMC)有响应速度快、鲁棒性强,且与换流器固有的开关变结特征兼容^[21]的特性,能够保证储能系统在电网扰动下的性能。目前 SMC 在机器人协同以及无人机^[22]控制等领域得到了广泛的研究。文献[23]提出了一种基于自适应积分滑模分布式控制策略,不

需进行扰动识别可以自适应实现扰动的动态补偿作用;文献[24]指出智能滑模算法虽然可以在不改变系统稳态与动态性能的前提下大幅削弱抖振,但都是基于一阶滑模面设计的,高阶滑模面设计问题仍然需要进一步研究;文献[25]提出模糊 SMC 系统,在提高响应速度的同时减小了超调范围;文献[26]设计了双二阶 SMC,使逆变器具有较好的动态和稳态性能。高压直挂式储能并网控制中采用所提出的改进 SMC,响应速度更快,更好的抑制抖振问题,并且能够稳定并网点电压、电流和控制系统输出功率稳定,为高压直挂式构网型储能并网发生大扰动时,提供一个较好的解决方案^[27]。

为解决新能源大规模接入电网在大扰动情况下的电压频率快速支撑需求,本文设计了模块化级联的高压直挂式构网型储能控制系统。首先基于高压直挂式储能拓扑研究了电池系统控制,模块数量、功率模块等主电路参数设计,建立了数学模型。其次在构网型控制中引入了含幂次环节的 SMC 策略,以提高系统快速响应能力和抗干扰能力。最后通过仿真对比分析,验证基于改进滑模控制的高压直挂式构网型储能控制策略的可行性和有效性。

1 高压直挂储能拓扑

图 1 为高压直挂式储能拓扑,采用模块化串联的设计,每个储能电池子模块由半桥功率模块和电池储能模块两部分组成。并通过改变电池储能模块内电池的串联数量,来满足不同模块的电压和电流的需求。

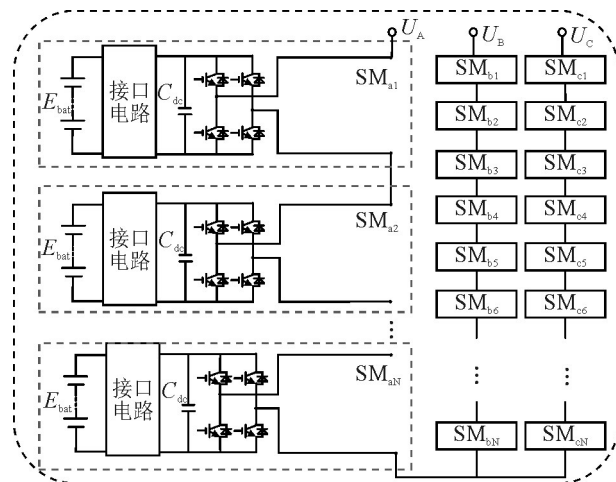


图1 高压直挂式构网型储能拓扑
Fig. 1 Topology of high-voltage direct-mounted grid-type energy storage

每个电池储能模块都可以等效为直流电压源,

所有串联储能模块两端电压可以等效为可控电压源 U , U 的值是由电池储能模块数量 N 决定。因此, 高压直挂储能可等效为一个可控电压源 U 和电感 L_s 串联后并联在线路的两端电压 U_{dc} , 即

$$L_s \frac{dI_s}{dt} = U - NV_{SM} \quad (1)$$

$$\Delta I_s = \frac{U_{sm}(N_t - N_{t+1})}{L_s} \Delta t \quad (2)$$

式(1)、(2)中: V_{sm} 为每个储能子模块电压, 在图1中由 E_{bat} 表示; N_t 为 t 时刻导通的电池储能模块数量; I_s 、 ΔI_s 分别为每个储能模块充放电时的电流以及其波动; Δt 为其中的一个控制周期。并且由式(2)可知可以通过改变接入的电池储能模块数量 N 就可以实现对储能模块充放电电流 I_s 的控制, N 的控制频率越多影响着电感 L_s , I_s 会越来越大, 从而使得 I_s 的波动越小。

2 构网型高压直挂储能控制策略

储能子模块充电时, 可将 SOC 较低的子模块电池优先进入充电模式, 而 SOC 较高的子模块不运行避免不可逆损坏。若储能放电, SOC 较高的储能子模块优先放电, 而 SOC 较低的子模块不运行。另一方面, 储能子模块可由内部模块电池管理单元控制从而对储能子模块电池 SOC 进行均压控制。

$$u_{ai}^* = d_i u_a^* = [K(SOC_a - SOC_{ai}) + 1/N] u_a^* \quad (3)$$

式中: u_a^* 为 A 相总调制电压; u_{ai}^* 为 A 相各子模块调制电压; d_i 为比例系数 $1/N$; K 由电池的充放电状

态决定正负, 充电时为正, 放电时为负。图2为 SOC 相内均衡控制框图。

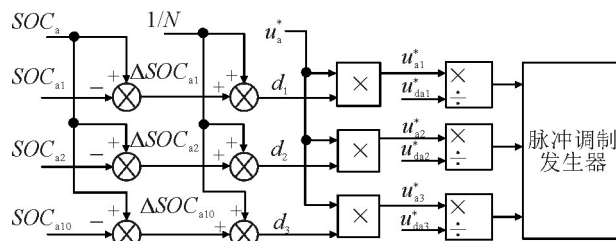


图2 SOC相内均衡控制
Fig. 2 In-phase equalization control of SOC

VSG 的构网型储能换流器在强电网下存在失稳风险。为此, 基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能整体控制框图见图3。主要包括主电路和控制电路。主电路中对电网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 和电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 做 dq 变换得到对应的交直轴分量 i_d 、 i_q 和 u_{sd} 、 u_{sq} 输送至控制电路。控制电路主要包括有功无功控制环, 改进 SMC 高压直挂式构网储能控制策略以及 SOC 均衡控制策略, 输出调制波 u_a^* 、 u_b^* 、 u_c^* , 进入载波移相调制环节形成对应的触发脉冲。

$$\begin{cases} L_g \frac{di_d}{dt} - \omega L_g i_q + u_d = u_{sd} \\ L_g \frac{di_q}{dt} - \omega L_g i_d + u_q = u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

2.1 构网控制策略

高压直挂式构网储能整体控制框图见图3。图3中: P_N 为有功功率参考值; K_ω 为有功下垂系数; J 为虚拟转动惯量; ω_N 为角频率额定值; ω 为实际角频率; D 为阻尼系数。构网型控制的机械方程为

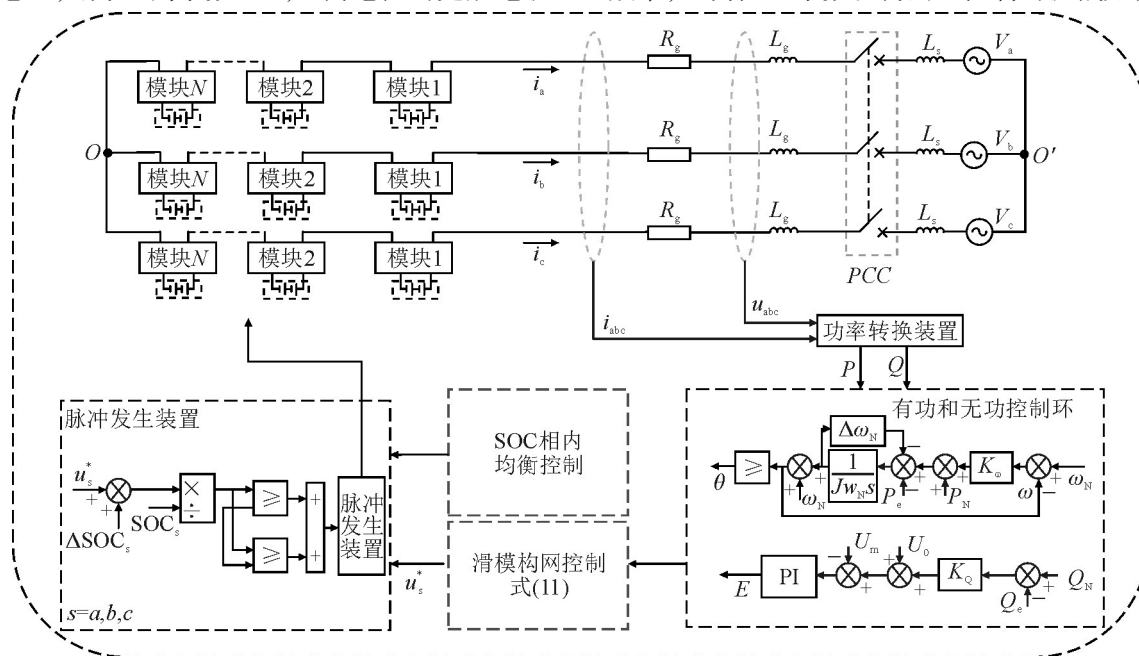


图3 高压直挂式构网储能整体控制框图
Fig. 3 Overall control block diagram of high-voltage direct-mounted grid-forming energy storage

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d \\ T_m = \frac{P_m}{\omega}, T_e = \frac{P_e}{\omega}, T_d = D(\omega - \omega_N) \\ \omega_N = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_m 、 T_e 、 T_d 分别为构网型控制的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩。

为实现调频功能,构网型控制通过调速器调节等效机械功率,响应电网频率偏差,从而实现有功功率的平衡,即

$$P_{\text{ref}} = P_N + K_\omega(\omega_N - \omega) \quad (6)$$

式中: P_{ref} 为构网型控制的有功参考值; P_N 为额定功率。

同时通过励磁系统维持机端电压实现构网型控制的电压调节功能。励磁系统的功能实际上是机端电压和输出无功的下垂关系,因此励磁系统为

$$Q_{\text{ref}} = Q_N + K_Q(U_0 - U) \quad (7)$$

式中: Q_{ref} 为构网型控制的无功参考值; Q_N 为额定无功功率。

2.2 滑模控制器设计

与基于小信号模型的线性控制相比,为更快响应电网,引入指数趋近律,相对于传统 SMC,改进 SMC 的抗干扰能力更强。首先以换流器输出电流为控制量,定义电流内环控制器的滑模面为

$$\begin{cases} S_d = \Delta_1(\dot{i}_d^* - i_d) - \frac{1}{L}(U_d - Ri_d + \omega Li_d - U_{sd}) = 0 \\ S_q = \Delta_2(\dot{i}_q^* - i_q) - \frac{1}{L}(U_q - Ri_q - \omega Li_q - U_{sq}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δ_1 和 Δ_2 表示控制器跟踪误差的收敛速度,并且控制律保证状态变量沿滑模面情况下跟踪误差可将指数收敛为零。即系统正常运行时,滑模控制律设计为

$$\begin{cases} U_d = U_{sd} - \omega Li_q + Ri_d \\ U_q = U_{sq} + \omega Li_d + Ri_q \end{cases} \quad (9)$$

在幂次函数中调整 α, β 值,保证系统远离滑模面时高速趋近,靠近时降低速度,因此提出一种新型趋近律为

$$S = -k_1 |S|^{\alpha} \text{sgn}(S) - k_2 |S|^{\beta \text{sgn}(|S|)} S, k_1 > 0, k_2 > |d_1| \text{ or } k_2 > |d_2| \quad (10)$$

联立式(9)和(10)可得新的滑模控制律:

$$\begin{cases} U_d = k_{d1} |S_d|^{\alpha_1} \text{sgn}(S_d) + k_{d2} |S_d|^{\beta_1 \text{sgn}(|S_d|)} S_d - \omega Li_q + U_{sd} \\ U_q = k_{q1} |S_q|^{\alpha_2} \text{sgn}(S_q) + k_{q2} |S_q|^{\beta_2 \text{sgn}(|S_q|)} S_q + \omega Li_d + U_{sq} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $k_{d1}, k_{d2}, k_{q1}, k_{q2}$ 为指数趋近项系数,系统的运动点距离滑模面较远时, k_{d1} 和 k_{d2} 越大,到达系统稳定点的速度越快。反之 k_{q1} 和 k_{q2} 的取值偏高则引起系统抖振。

根据式(10)可得滑模控制框如图3所示。以

$$\begin{aligned} V_d &= S_d \dot{S}_d = S_d(\dot{i}_d^* - \dot{i}_d) \\ \Rightarrow V_d &= -\frac{1}{L} S_d(U_d - Ri_d + \omega Li_d - U_{sd}) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(11)的控制律代入式(12)得

$$V_d = -\frac{1}{L} S_d(k_{d1} |S_d|^{\alpha_1} \text{sgn}(S_d) + k_{d2} |S_d|^{\beta_1 \text{sgn}(|S_d|)} S_d) \quad (13)$$

因为式(13)中 k_{d1} 和 k_{d2} 都大于0,本文设计的 α, β 取恒定值,数值见表1所示。所以 V_d 小于0,即式(14)

$$V_d = S_d \dot{S}_d < 0 \quad (14)$$

同理,可以证明 q 轴模型稳定,即 $V = S\dot{S} < 0$,说明本文提出的基于改进滑模控制的高压直挂式构网储能并网控制策略满足稳定性条件。

3 算例分析

基于 Matlab/Simulink 搭建高压直挂式构网储能系统仿真模型,仿真参数见表1。并建立采用 PI 控制器的高压直挂式构网储能模型,作对比分析。

表1 系统主要参数
Table 1 Main parameters of the system

参数	数值	参数	数值
仿真步长/s	5e-6	惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.1
系统频率/f/Hz	50	阻尼 $D/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	31 830
储能容量/MW	5	有功环系数 k_p	0
储能子模块数 N	10	有功环系数 k_v	10 000
储能子模块电压 V_{sm}/kV	2	滑模控制环系数 k_{d1}, k_{q1}	10, 10
直流母线电压 U_{dc}/kV	10	滑模控制环系数 k_{d2}, k_{q2}	0.0, 0.09
输出线路电感 L_g/H	5e-3	比例积分控制系数 k_p, k_i	22, 1700
输出线路电阻 R_g/Ω	0.01	电感 L/H	6.5e-3
k_q	0.01	A	0.5
k_{sd}, k_{sq}	0.5, 0.5	B	0.689

3.1 工况一:电网频率升高

高压直挂储能系统正常运行 1 s,在 1~2 s 时将电网频率升高至 50.5 Hz,电压基本保持 10 kV 不变。在 2 s 时,电网频率恢复至 50 Hz。电网频率波形如图 4 所示。1 s 时刻,电网频率阶跃至 50.5 Hz,基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能经 0.251 s 频率稳定至 50.5 Hz;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能,经 0.126 s 频率稳定至 50.5 Hz。2 s 时刻,电网频率恢复至 50 Hz,基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能经 0.121 s 频率恢复至 50 Hz;而基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能经 0.116 s 频率恢复至 50 Hz。仿真结果表明,高压直挂式储能采用基于改进 SMC 的动态特性明显优于基于 PI 构网控制的高压直挂式构网型储能。

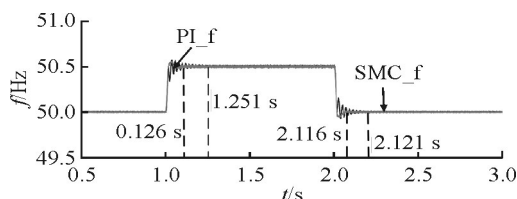
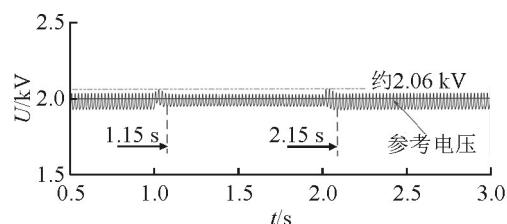
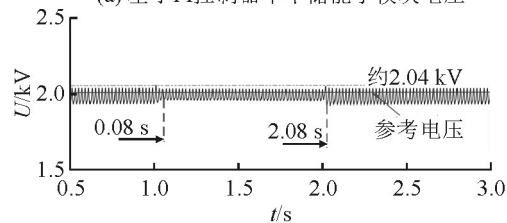


图4 高压直挂式构网型储能系统频率波形
Fig.4 Frequency waveform of high voltage direct-mounted grid-forming energy storage system

高压直挂式储能单个储能子模块电压波形如图 5 所示。



(a) 基于PI控制器单个储能子模块电压



(b) 基于改进SMC构网储能单个储能子模块电压

图5 高压直挂式构网型储能单个储能子模块电压波形
Fig.5 Voltage waveform of a single energy storage sub-module of high-voltage direct-mounted grid-forming energy storage

1 s 时刻,电网频率升高至 50.5 Hz 时,子模块电压出现波动,其中基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能子模块电压上升最大值为 2.06 kV,经 0.15 s 系统电压稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能子模块电压上升最大值为 2.04 kV,经 0.08 s 系统电压稳定。2 s 时刻电网频率恢复至 50 Hz,基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能有功功率向上升至 5.3 MW,无功功率向下降至 1.1 Mvar,分别经 0.285 s、0.250 s 系统输出稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能有功功率向上升至 5.2 MW,无功功率向下降至 1.1 Mvar,分别经 0.129 s、0.110 s 系统输出稳定。

基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能子模块电压经 0.15 s 恢复电压稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能子模块经 0.08 s 恢复电压稳定,比基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能子模块系统稳定运行短约 0.07 s。

高压直挂式储能输出有功功率、无功功率波形如图 6 所示。

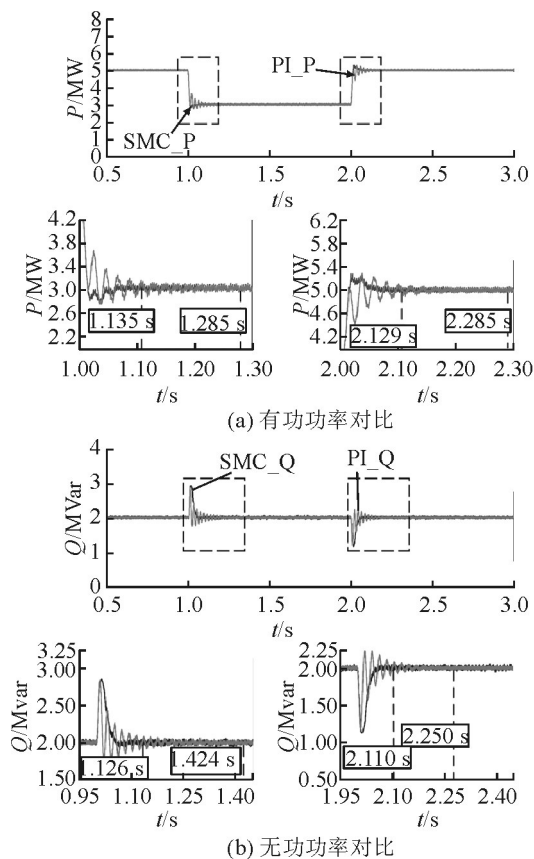


图6 高压直挂式构网型储能系统输出功率对比
Fig.6 Output power comparison of high-voltage direct-mounted grid-forming energy storage system

1 s 时刻电网频率升高至 50.5 Hz 时,有功功率、无功功率发生波动,其中基于 PI 构网型的高压直挂式构网型储能有功功率向下降至 2.8 MW,无功功率向上升至 2.8 Mvar,分别经 0.285 s、0.424 s 系统输出稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能有功功率向下降至 2.7 MW,无功功率向上升至 2.8 Mvar,分别经 0.135 s、0.126 s 系统输出稳定。2 s 时刻电网频率恢复至 50 Hz,基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能有功功率向上升至 5.3 MW,无功功率向下降至 1.1 Mvar,分别经 0.285 s、0.250 s 系统输出稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能有功功率向上升至 5.2 MW,无功功率向下降至 1.1 Mvar,分别经 0.129 s、0.110 s 系统输出稳定。

3.2 工况二:电网电压升高 10%

高压直挂储能系统正常运行 1 s,在 1~2 s 时,将电网电压升高至 11 kV。在 2 s 时,电网电压恢复至 10 kV。1 s 时刻,电网电压升高 10%,子模块电压出现波动如图 7 所示,其中基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能子模块电压升高至 2.16 kV,经 0.61 s 系统电压稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能子模块电压升高至 2.09 kV,经 0.16 s 系统电压稳定。2 s 时刻电网电压恢复至 10 kV,基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能子模块电压升高至 2.3 kV,经 0.46 s 恢复电压稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能子模块输出电压升高至 2.14 kV,经 0.16 s 恢复电压稳定,比基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能子模块系统稳定运行短约 0.3 s。

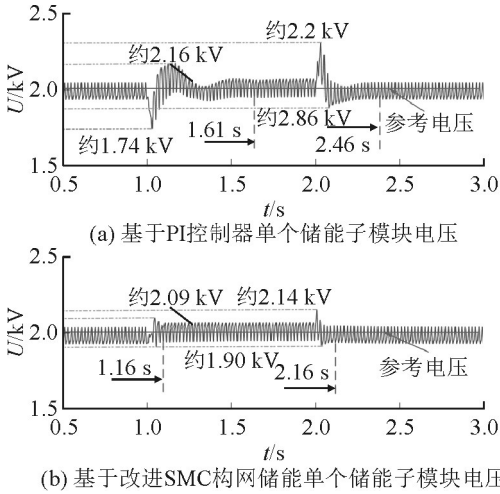


图7 高压直挂式构网型储能单个储能子模块电压波形
Fig. 7 Voltage waveform of a single energy storage sub-module of high-voltage direct-mounted grid forming energy storage

高压直挂式储能系统输出电流如图 8 所示,1 s 时刻,电网电压升高至 11 kV,采用基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能输出电流升高至 750 A,系统稳定时间为 0.575 s,采用基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能的输出电流升高至 625A,系统稳定运行时间为 0.125 s;2 s 时刻,电压恢复至 10 kV,基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能输出电流升高至 690 A,系统稳定时间为 0.275 s,采用基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能的输出电流升高至 650 A,系统稳定运行时间为 0.062 5 s。基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能系统动态特性明显优于基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能系统。

高压直挂式储能输出有功功率、无功功率波形如图 9 所示。

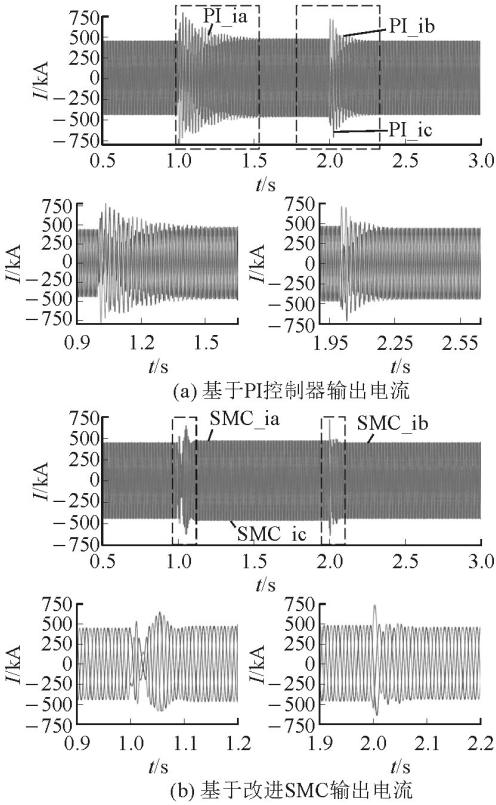


图8 高压直挂式构网型储能系统输出电流波形对比
Fig. 8 Comparison of output current waveform of high-voltage direct-mounted grid forming energy storage systems

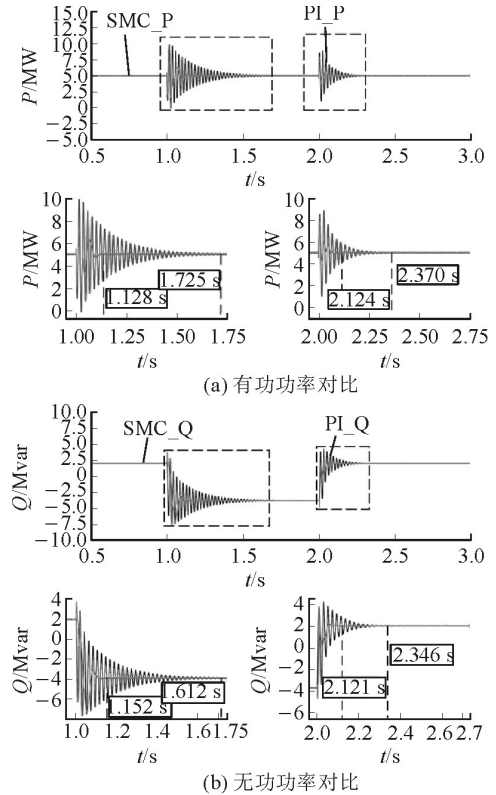


图9 高压直挂式构网型储能系统输出有功功率、无功功率对比
Fig. 9 Comparison of active and reactive power output of high-voltage direct-mounted grid forming energy storage system

1 s 时刻电网电压升高至 11 kV 时,有功功率、无功功率发生波动,其中基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能有功功率向上升高至 10 MW,无功功率向下降至 -7.5 Mvar,分别经 0.725 s、0.612 s 系统输出稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能有功功率向上升高至 7 MW,无功功率向下降至 -7.2 Mvar,分别经 0.128 s、0.152 s 系统输出稳定。2 s 时刻,电网电压恢复至 10 kV,基于 PI 控制器高压直挂式构网型储能有功功率向上升高至 9 MW,无功功率向下降至 -3.5 Mvar,分别经 0.370 s、0.346 s 系统稳定;基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能有功功率向上升高至 7.9 MW,无功功率向下降至 -4.5 Mvar,分别经 0.124 s、0.121 s 系统输出稳定。并且基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能输出功率基本无抖振。

3.3 工况三:电网电压升高 1.35 p.u.

高压直挂式储能稳定运行,1~2 s 时刻电网电压阶跃到 1.35 p.u.,仿真结果见图 10。图 10(a)表明,采用 PI 控制器高压直挂式构网型储能系统在 1 s 故障时有功功率先降至 -10 MW 经过约 0.75 s 恢复至 0 MW,在 2 s 故障后有功功率向上升高至 17.6 MW 并且波动大。而采用基于改进 SMC 的高压直挂式构网型储能系统在 1 s 故障时有功功率下降至 -7.4 MW 经过约 0.1 s 恢复至 0 MW,在 2 s 故障结束后向上升高至 12 MW 并在 0.23 s 便恢复至故障前状态。

图 10(b)采用基于 PI 控制器的高压直挂式储能系统在 1 s 故障发生后无功功率下降至 -24 Mvar 经过约 0.75 s 稳定在 -20 Mvar;2 s 故障结束后向上升高至 20 Mvar 并发生波动且无法恢复至故障前状态,而采用基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能系统的无功功率在 1 s 故障发生时向下降至 -20 Mvar 经过约 0.75 s 稳定,2 s 故障结束后向上升高至约 1 Mvar 并在 0.23 s 恢复至故障前状态。图 10(c)采用基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能系统输出电流在 1 s 故障发生后和采用基于改进 SMC 高压直挂式构网型储能系统的输出电流进行对比,可知在 1 s 故障发生时,采用 PI 控制器高压直挂式构网型储能系统输出电流向升高至 1.5 kA,2 s 故障结束后采用基于 PI 控制器的高压直挂式构网型储能输出电流发生波动升高至约 1.9 kA 并在故障发生后无法恢复至电流初始值。而采用基于 SMC 高压直挂式构网型储能系统输出电流在 1 s 故障发生时升高至 1.2 kA,在 2 s 故障结束后向上升高至 1.3 kA,并在 0.23 s 恢复至电流初始值状态。

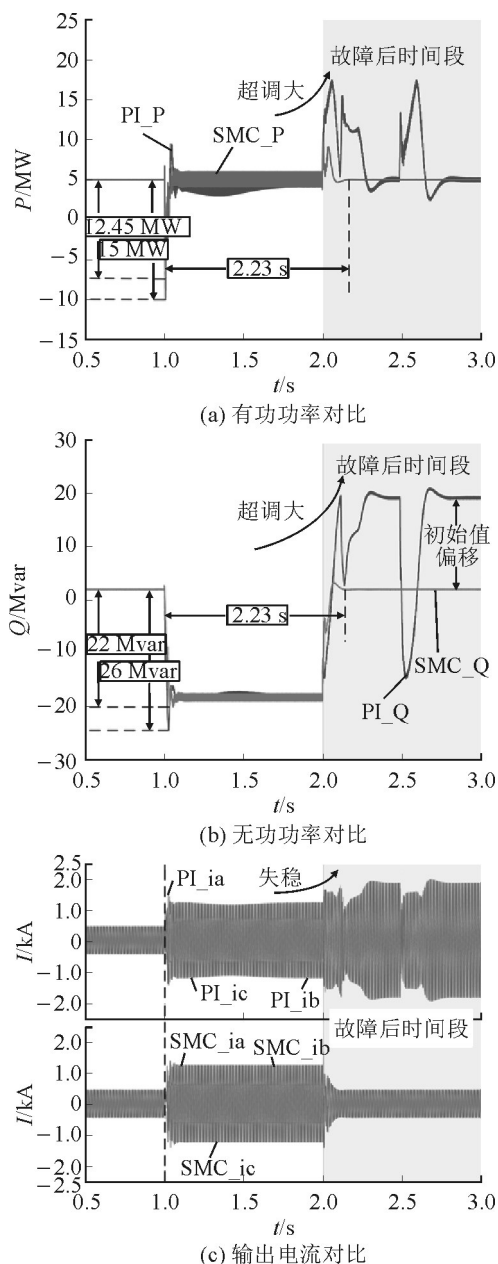


图 10 高压直挂式构网型储能系统有功功率、无功功率和输出电流对比

Fig. 10 Comparisons of active power, reactive power and output current of high-voltage direct-mounted grid forming energy storage systems

4 结语

本文研究了模块化级联的高压直挂式构网型储能系统在电网电压和频率快速变化的大扰动工况运行场景中,提出基于改进滑模控制的高压直挂式构网型储能系统控制策略,通过改进滑模面及趋近律函数解决输出抖振问题,并根据滑模面设计了基于幂次函数的滑模控制律。仿真结果表明,在电网频率、电网电压发生大扰动时,本文提出的策略可以保证高压直挂式构网型储能系统输出子模块

电压、电网频率、输出电流、有功功率以及无功功率具有更好的控制效果,备更强的抗干扰能力和电压频率支撑效果。

参考文献

- [1] 刘瀚琛,王冲,鞠平. 双碳背景下综合能源电力系统弹性分析与提升研究综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 108-124.
LIU Hanchen, WANG Chong, JU Ping. Review on resilience analysis and enhancement of integrated energy power systems considering dual Carbon goal[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 108-124.
- [2] 温才权,全杰雄,周凯,等. 大容量SVC相控电抗器对站用低压直流电源的影响分析及防范措施[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 45-53.
WEN Caiquan, QUAN Jiexiong, ZHOU Kai, et al. Analysis on influence of large capacity SVC reactor on low voltage DC power supply for station and preventive measures[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 45-53.
- [3] 王涵宇,邱荣禄,吴家伟,等. 基于模块选择的级联H桥型静止无功发生器直流侧电容在线状态监测策略[J/OL]. 电工技术学报: 1-11.
WANG Hanyu, QIU Ronglu, WU Jiawei, et al. Online condition monitoring strategy for DC-side capacitor of cascaded H-bridge static reactive power generator based on module selection[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-11.
- [4] 李建林,丁子洋,游洪灏,等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [5] 吴靖,许杰,陈佩军. 电池储能系统中电力电子变换器并网结构发展综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 104-112.
WU Jing, XU Jie, CHEN Peijun. Review on the integration structure development of power electronics converters for battery energy storage system[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 104-112.
- [6] 李建林,武亦文,王楠,等. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 2-14.
LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, et al. Review and prospect of gigawatt-level electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 2-14.
- [7] 朱博,徐攀腾,崔远卓,等. 连接无源网络的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 151-160.
ZHU Bo, XU Panteng, CUI Yuanzhuo, et al. AC fault ride-through control strategy for LCC-FHMMC hybrid HVDC system with passive network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 151-160.
- [8] 宋延涛,范雪峰,吴庆范,等. 基于MMC的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63-74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [9] 李丝丝,方春恩,阴晓旭,等. 模块化多电平换流阀子模块用真空旁路开关设计[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 138-147.
LI Sisi, FANG Chunen, YIN Xiaoxu, et al. Design on vacuum bypass switch for sub-module of modular multi-level converter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 138-147.
- [10] 蔡旭,李睿,刘畅,等. 高压直挂储能功率变换技术与世界首例应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 200-211.
CAI Xu, LI Rui, LIU Chang, et al. Transformerless high-voltage power conversion system for battery energy storage system and the first demonstration application in world[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 200-211.
- [11] 孙伟卿,刘唯,裴亮,等. 高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储-输多阶段联合规划[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 983-992.
SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 983-992.
- [12] 刘畅,吴胜兵,吴西奇,等. 35 kV高压直挂大容量电池储能系统[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 914-928.
LIU Chang, WU Shengbing, WU Xiqi, et al. High-voltage large-capacity battery energy storage system connecting to 35 kV grid without transformer[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 914-928.
- [13] 陈强. 高压直挂大容量电池储能功率转换系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [14] 薛皓,何晋伟,郭培健. 基于级联H桥变换器的电池储能系统容错控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3418-3428.
XUE Hao, HE Jinwei, GUO Peijian. Fault-tolerance Control of Battery Energy Storage System Based on Cascaded H-bridge Converter[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3418-3428.
- [15] 董一诺,白志红. 一种应用于MMC的具有较高次环流抑制功能的改进载波移相调制策略[J/OL]. 电源学报: 1-12 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.

- DONG YiNo, BAI Zhihong. An improved carrier phase-shift modulation strategy with higher sub-loop current rejection applied to MMC[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-12 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- [16] 李祥柱, 徐永海. 储能 VSG 环流抑制及电压稳定控制策略研究[J/OL]. 电源学报: 1-13 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- Li Xiangzhu, Xu Yonghai. Research on loop current suppression and voltage stabilization control strategy of energy storage VSG[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-13 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids>.
- [17] 葛俊, 刘辉, 江浩, 等. 虚拟同步发电机并网运行适应性分析及探讨[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 26-35.
- GE Jun, LIU Hui, JIANG Hao, et al. Analysis and investigation on grid-connected operation adaptability of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 26-35.
- [18] 吴泓林, 李海啸, 李山, 等. 面向储能容量配置优化的 VSG 参数协调控制策略[J/OL]. 电气工程学报, 1-10 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v>.
- WU Honglin, LI Haixiao, LI Shan, et al. Coordinated control strategy of VSG parameters for energy storage capacity allocation optimization[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 1-10 [2025-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v>.
- [19] 付媛, 万悻, 张祥宇, 等. 储能虚拟惯量主动支撑与调频状态转移控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2628-2640.
- FU Yuan, WAN Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Energy storage virtual inertia active support and frequency modulation state transfer control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2628-2640.
- [20] 朱作滨, 孙树敏, 丁月明, 等. 基于自适应 VSG 控制策略永磁直驱风电系统研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 116-124.
- ZHU Zuobin, SUN Shumin, DING Yueming, et al. Research on permanent magnet direct-drive wind power system based on adaptive VSG control strategy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 116-124.
- [21] 胡颖新, 宁志毫, 兰征, 等. 基于滑模控制的牵引网低频振荡抑制方法[J]. 电气工程学报, 2022, 17(1): 129-136.
- HU Yingxin, NING Zhihao, LAN Zheng, et al. Low frequency oscillation suppression method of traction network based on sliding mode control[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(1): 129-136.
- [22] 袁聪, 皇甫宜耿, 白浩, 等. 带混合负载的电动无人机双极性直流电力系统拓扑结构设计及稳定性分析[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 110-121.
- YUAN Cong, HUANGFU Yigeng, BAI Hao, et al. Topology design and stability analysis of bipolar DC power system of electric unmanned aerial vehicle feeding mixed load[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(2): 110-121.
- [23] 马良, 许刚, 谈元鹏. 考虑扰动影响的微电网分布式自适应控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 146-155.
- MA Liang, XU Gang, TAN Yuanpeng. Distributed adaptive control strategy for microgrids considering disturbance effects[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 146-155.
- [24] 刘陆, 丁世宏, 李世华. 高阶滑模控制理论综述[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2193-2201.
- LIU Lu, DING Shihong, LI Shihua. A survey for high-order sliding mode control theory[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(12): 2193-2201.
- [25] 黄自鑫, 汪伟, 王乐君. 基于模糊控制的 PWM 整流器电压调速策略[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(1): 101-107.
- HUANG Zixin, WANG Wei, WANG Lejun. Fuzzy control based voltage regulation strategy for PWM rectifier[J]. Journal of Shenzhen University(Science & Engineering), 2024, 41(1): 101-107.
- [26] 侯世英, 邹学伟, 孙韬, 等. 新型双 Buck 并网逆变器及其二阶滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(10): 7-13.
- HOU Shiyong, ZOU Xuwei, SUN Tao, et al. Double second-order sliding mode control based on dual buck grid-connected inverter[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10): 7-13.
- [27] 朱国宇, 安兴科, 诸德宏, 等. 基于改进自适应超螺旋观测器的永磁同步电机无位置控制[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 84-95.
- ZHU Guoyu, AN Xingke, ZHU Dehong, et al. Position sensorless control for permanent magnet synchronous motor using improved adaptive super twisting observer[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 84-95.

作者简介:

徐志洋(1997—),男,硕士,主要研究方向为新能源并网控制技术。E-mail: 2085142664@qq.com。

陈来军(1984—),男,教授,主要研究方向为新能源电力系统稳定与控制等。E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn。

苏小玲(1986—),女,副教授,主要研究方向为新型储能系统并网控制。E-mail: suxiaoling@qhu.edu.cn。