

基于VSG-AVDG的多端柔性互联配电系统控制策略

王振浩¹, 杜成林¹, 庞丹², 葛津铭¹, 王志鹏², 李国庆¹, 王鹤¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 国网长春供电公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 为了提升高比例新能源接入下交直流配电网柔性互联时端口的惯性和阻尼, 提出了一种基于虚拟同步机和自适应虚拟直流电机控制(VSG-AVDG)的多端柔性互联配电系统控制策略。传统虚拟电机控制仅将VSG控制和虚拟直流电机控制(VDG)控制简单组合, 难以同时抑制母线电压波动和提升动态性能。为此, 分析了虚拟电机控制的内在联系, 建立了基于交流侧功率偏差与直流侧电压偏差关联的融合机制, 提出了基于VSG-AVDG的协调控制策略。交流侧采用直流外环电压补偿的改进VSG控制, 降低模式切换对电网的冲击, 实现负载均衡; 直流侧采用一种适用于柔性互联系统的AVDG控制策略, 在抑制母线电压波动同时提升动态性能。通过MATLAB/Simulink仿真, 验证了所提控制策略的有效性和正确性。

关键词: 柔性互联; 虚拟同步控制; 自适应虚拟直流电机控制; 直流母线电压

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.04004

Control Strategy for Multi-terminal Flexible Interconnected Distribution System Based on VSG-AVDG

WANG Zhenhao¹, DU Chenglin¹, PANG Dan², GE Jinming¹, WANG Zhipeng²,
LI Guoqing¹, WANG He¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. State Grid Changchun Power Supply Company, Changchun 130021, China)

Abstract: To enhance the inertia and damping at the ports of flexible interconnected AC/DC distribution networks under high penetration of renewable energy integration, this study proposes a control strategy for multi-terminal flexible interconnected distribution systems based on virtual synchronous generator and adaptive virtual dc generator (VSG-AVDG). Traditional virtual machine control methods merely combine VSG and virtual DC generator (VDG) controls in a simplistic manner, making it difficult to simultaneously suppress bus voltage fluctuations and improve dynamic performance. To address this limitation, the inherent relationship between virtual machine controls is analyzed, and a fusion mechanism coupling AC-side power deviation with DC-side voltage deviation is established, and a coordinated control strategy based on VSG-AVDG is proposed. On the AC side, an improved VSG control with DC outer-loop voltage compensation is adopted to reduce grid impact caused by mode switching and achieve load balancing. On the DC side, an AVDG control strategy suitable for flexible interconnected systems is designed to suppress bus voltage fluctuations while optimizing dynamic response. MATLAB/Simulink simulations demonstrate the validity and correctness of the proposed control strategy.

Key words: flexible interconnection; virtual synchronous control; adaptive virtual DC motor control; DC bus voltage

0 引言

“双碳”背景下, 基于电力电子装置并网的新能源在我国得到广泛利用^[1], 新能源发电装机已超过

1.4×10^9 kW, 总装机容量占比超过 50%。然而大规模新能源并网可能会引发电网宽频振荡等稳定性问题, 给配电网的可靠供电、安全稳定和经济运行带来新挑战^[2-4]。配电网柔性互联技术具有挖掘配电网的供电潜能、增强供电可靠性等诸多优势, 对于改善配电网运行状态和性能具有重要意义^[5-6]。而在柔性互联拓扑中, 基于公共直流母线的智能软开关(Soft Open Point, SOP)柔性互联结构, 融合了直流型电源及负荷、储能装置、微网等设备或子系统的接入, 省去了大量交直流变换结构, 在对互联系统间功

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177074); 国家电网有限公司科技项目(SGJLCC00KJJS2203595)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177074); State Grid Corporation Science and Technology Project (SGJLCC00KJJS2203595)

率进行灵活调节的同时,实现直流形式的“源-储-荷”融合调控,进而实现能源的综合利用^[7-8]。

目前,国内外学者对于 SOP^[9-11]在柔性互联系统中的控制策略展开大量研究。文献[12]提出一种基于三端口 SOP 的功率调控策略。文献[13]提出一种考虑 SOP 和分布式电源的配电系统弹性提升方法。文献[14]提出一种考虑台区变压器经济运行区间的 SOP 控制策略。文献[12-14]所提 SOP 控制策略在控制效果上具有显著优势,但其“刚性”控制策略未能充分满足系统对惯性和阻尼的需求,增加了互联系统运行时的稳定控制难度。因此,通过控制技术提高柔性互联系统的惯性和阻尼,对柔性互联系统的运行控制具有重要意义^[15-16]。

虚拟同步控制(Virtual Synchronous Generator, VSG^[17-19])通过逆变器模拟同步发电机的运行特性,为系统提供了必要的惯性和阻尼支撑。文献[20]提出了一种基于虚拟同步机技术的配电网柔性互联调控策略。基于 VSG 控制思想,在直流变换器中引入虚拟惯性和阻尼环节,使直流端口具备直流电机外特性,即虚拟直流电机控制(Virtual DC Generator, VDG)^[21-23]。文献[24-25]将 VDG 技术运用于直流微网,增强了直流母线电压的稳定性。然而,对于柔性互联系统,由于其同时包含 AC/DC 和 DC/DC 变换器,必须采用统一的虚拟电机技术,才能充分发挥控制策略的优势,确保系统的协调运行与性能优化。文献[26]提出一种基于虚拟电机技术的柔性互联策略。文献[27]提出一种基于储能型柔性多状态开关的柔性互联策略。文献[26-27]在柔性互联系统中采用虚拟电机控制,但缺乏融合机制,并且 VDG 采用固定参数,削弱了系统的动态响应能力^[28]。针对这一问题,文献[29]提出了一种参数自适应微网变换器虚拟惯性控制策略。文献[30]提出了 VDG 参数自适应控制策略。文献[29-30]解决了 VDG 控制动态响应差的问题,但对于多端互联系统适用性较差。

综上所述,本文提出一种基于虚拟同步机和自适应虚拟直流电机控制(Virtual Synchronous Generator and Adaptive Virtual DC Generator, VSG-AVDG)的多端柔性互联配电系统控制策略。其创新之处在于:(1)深入分析交直流两侧控制的耦合机理,建立虚拟电机技术融合机制,并提出 VSG-AVDG 协调控制策略,以提升系统控制的协调性;(2)交流侧改进了 VSG 控制,采用直流电压外环补偿,在实现系统多模式运行及负载均衡的同时,削弱模式切换对电

网带来的冲击;(3)相较于传统 VDG 控制,所提直流侧 AVDG 控制策略通过惯性和阻尼的自适应,在实现互联系统直流母线电压波动有效抑制的基础上,进一步提升了系统的动态响应能力。

1 柔性互联配电系统构架及运行模式分析

1.1 配电系统构架

多端柔性互联配电系统如图 1 所示。其中,3 组背靠背拓扑型 SOP 将交流配电网从馈线末端进行互联,分布式电源、储能及直流负载通过直流母线从直流侧接入,交流负载从交流配电网馈线末端接入,交流侧和直流侧通过 750 V 直流母线并联,3 个交流端口的换流器都采用三相三线制桥式的电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC),光伏模块采用 boost 拓扑,直流负载通过不同等级的 DC/DC 变换器接入直流母线,储能模块采用 buck/boost 拓扑。

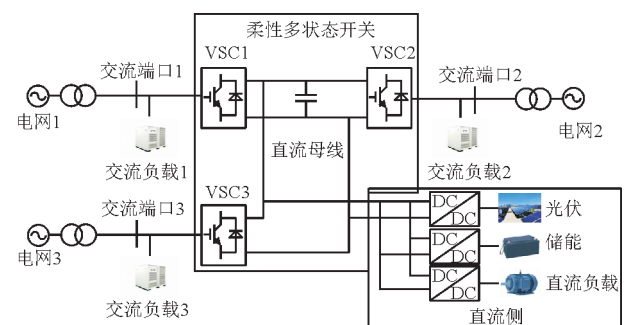


图1 多端柔性互联配电系统基本构架

Fig.1 Basic architecture of multi-terminal flexible interconnected distribution system

1.2 运行模式分析

在工程实际中,多端柔性互联配电系统通过多条馈线实现不同配电网之间的功率支撑、负荷转供,也可实现交直流两侧的功率交互、灵活互济。因此,根据柔性互联配电系统交流馈线故障情况及交直流两侧连接情况,将运行模式划分为正常互联模式、转供电模式及应急模式 3 种。

1)正常互联模式:交流侧配电网和直流侧通过 SOP 联网运行。根据交流侧和直流侧有功功率盈余或缺额情况响应调度指令,消纳分布式电源,维持交直流两侧功率平衡,维持直流母线电压稳定以及参与交流侧调频调压、馈线负载均衡。

2)转供电模式:系统发生 $N-1$ 故障,此时故障馈线负载由正常馈线通过 SOP 实现灵活转供。正常互联模式与转供电模式运行模式下,交流端口始

终采用 VSG 控制,且无需切换控制策略。

3)应急模式:交流侧配电网因故障断开与直流侧的互联,交流馈线末端重要负载由直流侧进行短时应急供电,储能在稳定直流母线电压的同时对交流侧重要负载进行部分功率支撑。

1.3 VSG-AVDG 协调控制策略

由于多端柔性互联配电系统结构复杂、控制困难,因此从直流侧电流角度分析交直流两侧虚拟电机控制的内在联系。根据基尔霍夫电流定律可得:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{VSC1} + i_{VSC2} + i_{VSC3} + i_{PV} + i_{bat} + i_{dl} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压; C 为直流母线侧电容; t 为时间; i_{VSCm} 为 SOP 各端口换流器 m 的输出电流, $m=1,2,3$; i_{PV}, i_{bat}, i_{dl} 分别为光伏、储能及直流负载的电流。

将式(1)变换可得:

$$U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{VSC1} + P_{VSC2} + P_{VSC3} + P_{PV} + P_{bat} + P_{dl} \quad (2)$$

式中: P_{VSCm} 为 SOP 各端口换流器 m 的传输功率, $m=1,2,3$; P_{PV}, P_{bat}, P_{dl} 分别为光伏、储能及直流负载的有功功率。

由式(2)可知,若直流母线电压波动,则会存在不平衡功率。当直流母线电压稳定时,忽略 SOP 内部开关损耗,各端口按照指令输出功率,即输出功率与指令值相同。由功率平衡方程可得式(3):

$$P_{ref1} + P_{ref2} + P_{ref3} + P_{PV} + P_{bat} + P_{dl} = 0 \quad (3)$$

式中: P_{refm} 为 SOP 各端口换流器 m 换流器参考功率, $m=1,2,3$ 。

对式(2)进行变换可得:

$$\frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} = P_{VSC1} + P_{VSC2} + P_{VSC3} + P_{PV} + P_{bat} + P_{dl} \quad (4)$$

对式(4)进行变换可得:

$$(P_{VSC1} - k_1 C \Delta U_{dc}^2) + (P_{VSC2} - k_2 C \Delta U_{dc}^2) + (P_{VSC3} - k_3 C \Delta U_{dc}^2) + P_{PV} + P_{bat} + P_{dl} = 0 \quad (5)$$

式中: k_m 为比例系数, $m=1,2,3, k_1+k_2+k_3=1/2$; ΔU_{dc} 为直流母线电压偏差。

考虑 SOP 各端口参数相同以及负载均衡要求,本文取 $k_1=k_2=k_3=1/6$ 。

将式(3)代入式(5)整理得:

$$P_{refm} = P_{VSCm} - k_m C \Delta U_{dc}^2 \quad (6)$$

分析式(4)和式(6)可知,直流电压平方与 SOP 端口输出有功功率及直流侧各能量源的输出功率呈线性关系,在 SOP 各端口的有功功率指令中,引入直流侧 $C \Delta U_{dc}^2$ 为补偿量,实现虚拟同步控制对直流母线电压的快速追踪。

因此,本文提出了 VSG-AVDG 协调控制策略,协调控制框图如图 2 所示。多端柔性互联配电系统交流侧采用 VSG 控制,为交流端口提供惯性和阻尼,并在端口功率指令中引入直流侧自适应虚拟直流电机控制(Adaptive Virtual DC Generator, AVDG)的电压外环进行补偿,一定程度上减轻系统运行模式切换对直流母线带来的冲击。直流侧采用 AVDG 控制,抑制直流母线电压的波动,同时提升动态响应能力,保持直流侧各能量源输出功率的稳定。互联系统运行时,交直流两侧通过直流母线实现功率灵活互济以及整体协调控制。

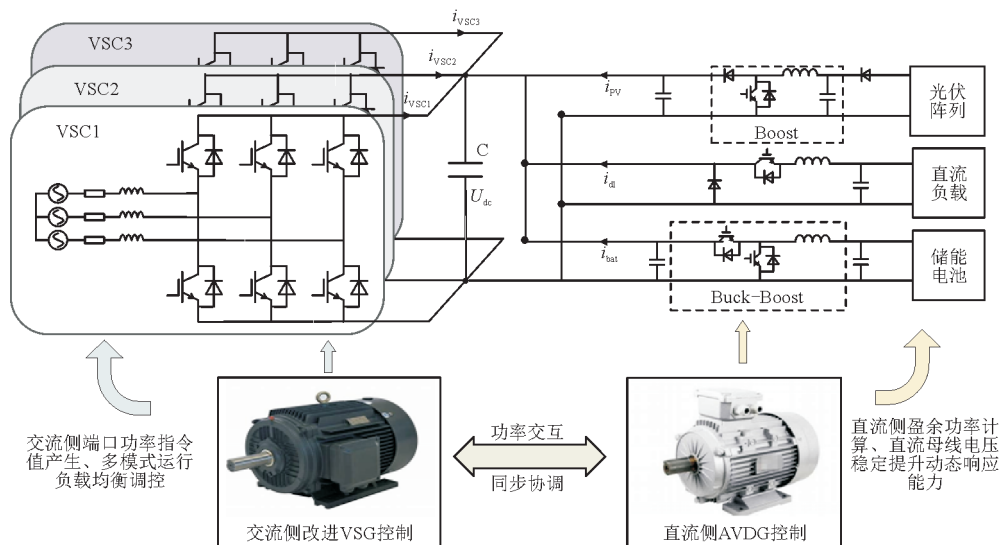


图2 互联系统VSG-AVDG协调控制总体框图

Fig.2 Overall block diagram of VSG-AVDG coordinated control for interconnected system

2 交流侧改进VSG控制

交流侧 VSG 控制模拟了同步电机外特性。VSG 转子运动方程如下:

$$T_{gm} - T_{ge} = D_g(\omega - \omega_n) + J_g \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} \quad (7)$$

式中: D_g, J_g 分别为交流侧 VSG 的阻尼系数和惯性系数; ω, ω_n 分别为 VSG 的角速度和电网额定角速度; T_{gm}, T_{ge} 分别为 VSG 的机械转矩和电磁转矩。

根据 $T_{gm} = P_{gm}/\omega$ 和 $T_{ge} = P_{ge}/\omega$, 将转子运动方程转化为机械功率 P_{gm} 和电磁功率 P_{ge} 与角速度 ω 的关系式:

$$P_{gm} - P_{ge} = D_g \omega(\omega - \omega_n) + J_g \omega \frac{d(\omega - \omega_n)}{dt} \quad (8)$$

式中: P_{gm}, P_{ge} 分别对应系统 SOP 各端口换流器参考功率 P_{ref} 和实际值 P_{VSC} 。

P_{gm} 由 VSG 控制的有功频率调节模块得出; P_{gm} 由馈线负载均衡功率 P_{av_ref} 和频率调节功率 ΔP_f 两部分组成。

P_{av_ref} 根据系统不同的运行模式取值有如下变化:

1) 正常互联模式下。以交直流两侧过剩功率灵活支援功率不足的一侧, 消纳分布式电源, 维持交直流两侧功率平衡。提出负载均衡策略如下:

$$\begin{cases} P_{av_refm} = P_{alM} - P_{acm} \\ P_{acm} = \frac{1}{n} \left(\sum_{m=1}^n P_{alM} \pm |\Delta P_{dc}| \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{alM} 为交流负载功率; P_{acm} 为交流配电网馈线功率; ΔP_{dc} 为直流侧盈余或者缺额功率; n 为正常馈线个数, 在本文中 $n=3$ 。

当 P_{av_refm} 为正时, 此时 SOP 消纳直流侧分布式电源盈余功率, 式(9)中“ \pm ”取“-”, P_{acm} 减小; 当 P_{av_refm} 为负时, 此时 SOP 为直流侧提供缺额功率, 式(9)中“ \pm ”取“+”, P_{acm} 增大。

2) 转供电模式下。故障馈线负载由正常馈线及直流侧转移功率通过 SOP 实现灵活转供, 交直流两侧电网根据馈线故障情况调度运行。以 $N-1$ 故障为例, 转供电模式下的负载均衡策略如式(10), 式中“ \pm ”取值与正常互联模式下取值方法相同。

$$\begin{cases} P_{av_refj} = P_{alj} , P_{acj} = 0 \\ P_{acm} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{m=1}^n P_{alM} \pm |\Delta P_{dc}| \right) \\ P_{av_refm} = P_{alM} - P_{acm} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{av_refj}, P_{acj}, P_{alj}$ 分别为故障端口 j 的馈线负载均

衡功率、交流配电网馈线功率以及交流负载功率。

3) 应急模式下。 P_{av_ref} 由储能及紧急切负载下重要负载的状态共同决定。

VSG 的有功频率及无功电压特性方程如式(11):

$$\begin{cases} \Delta P_f = -k_f(f - f_n) \\ E_0 = \left(\frac{k_{QP} + k_{QI}}{s} \right) [Q_{ref} - Q_e + k_v(U - U_n)] \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_f 为频率调节系数; f 为交流端口输出电压频率; f_n 为交流侧电网电压额定频率; E_0 为励磁电动势; Q_{ref}, Q_e 分别为交流端口无功功率参考值和实际值; k_{QP}, k_{QI} 分别为无功电压调节模块中的比例系数和积分系数; k_v 为电压调节系数; U, U_n 分别为交流电压有效值和电网额定电压有效值; s 为拉普拉斯算子。

E_0 经过坐标变换得到交流端口输出电压 u_{o_abc} , 然后经过电压电流双闭环控制精确跟踪, 最后通过脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)将信号反馈至 SOP。

需要指出的是, 本文改进 VSG 控制采用直流侧电压外环对 SOP 端口有功功率指令进行补偿, 可以在相同直流母线电压波动下, 使电容储能提供更大的功率支撑, 提升直流母线的稳定性。改进 VSG 控制如图 3 所示。

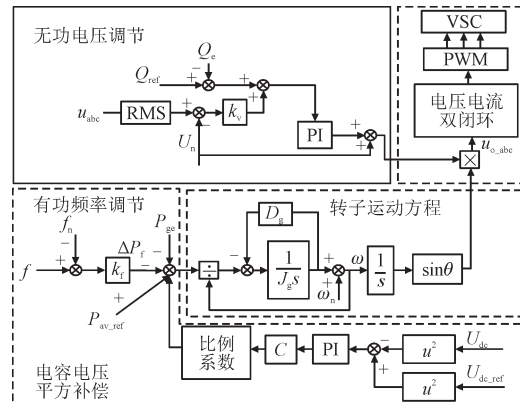


图3 交流侧改进VSG控制框图

Fig.3 Improved AC-side VSG control block diagram

其中, PI 为比例积分控制器, RMS 为有效值取值环节; u^2 为平方取值模块, θ 为 VSG 的相位。

3 直流侧 AVDG 控制

3.1 VDG小信号分析

直流侧 VDG 控制模拟了直流电机外特性, VDG 的机械方程及电枢回路方程如下:

$$T_{dm} - T_{de} = D_d(\omega_d - \omega_{dn}) + J_d \frac{d(\omega_d - \omega_{dn})}{dt} \quad (12)$$

$$\begin{cases} U_{dc} = E_d - I_d R_a \\ E_d = C_T \Phi \omega_d \end{cases} \quad (13)$$

式中： T_{dm} 、 T_{de} 分别为直流电机的机械转矩和电磁转矩； D_d 、 J_d 分别为直流电机的阻尼系数和惯性系数； ω_d 、 ω_{dn} 分别为直流电机实际角速度及额定角速度； E_d 、 I_d 分别为直流电机的电枢电压和电枢电流； R_a 为电枢电阻； C_T 为转矩系数； Φ 为磁通， $C_T \Phi = 5.1$ 。

为实现多端柔性互联配电系统直流母线电压稳定控制，抑制其波动，加快动态响应速度，首先针对直流侧储能变换器进行小信号建模^[23]，小信号模型如图 4 所示，进而分析参数扰动对系统的影响。其中， U_{bat} 为储能侧电压， L 为储能侧电感， d 为占空比； \hat{u}_{dc} 、 \hat{i}_{bat} 、 \hat{u}_{bat} 、 \hat{i}_d 及 \hat{d} 分别为添加小扰动后的直流母线电压、储能侧电压、储能侧电路及占空比。

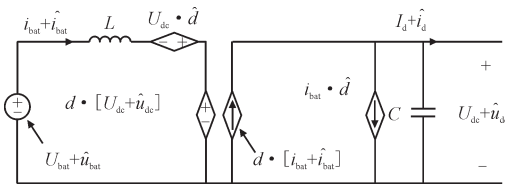


图 4 储能变换器小信号模型

Fig.4 Small-signal model of energy storage converter

由图 4 可得添加小扰动后的双向 DC/DC 变换器关于 U_{dc} 和 i_{bat} 的传递函数 $G_{ud}(s)$ 和 $G_{id}(s)$ 分别为：

$$G_{ud}(s) = \frac{(1-d)U_{dc} - Ls i_{bat}}{LCs^2 + (1-d)^2} \quad (14)$$

$$G_{id}(s) = \frac{(1-d)i_{bat} - Cs U_{dc}}{LCs^2 + (1-d)^2} \quad (15)$$

由图 4 及式 (12) 一式 (15) 得出互联系统 VDG 控制的小信号模型，如图 5 所示。其中， \hat{u}_{dc_ref} 为添加小扰动后的直流母线电压参考值；传递函数 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 及 $G_3(s)$ 如式 (16) 一式 (18) 所示。

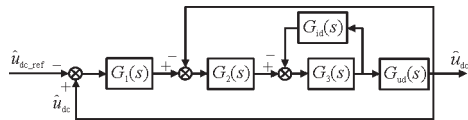


图 5 加入虚拟直流电机控制的小信号模型

Fig.5 Small-signal model incorporating virtual DC machine control

$$G_1(s) = \frac{(k_{pu}s + k_{iu})C_T \Phi}{(J_d s + D_d)s \omega_{dn}} \quad (16)$$

$$G_2(s) = \frac{U_{dc_ref}}{R_a U_{bat}} \quad (17)$$

$$G_3(s) = \frac{(k_{pi}s + k_{ii})}{sV_m} \quad (18)$$

式中： k_{pu} 、 k_{iu} 为电压环 PI 参数； k_{pi} 、 k_{ii} 为电流环 PI 参数； U_{dc_ref} 为电压参考值； V_m 为载波峰值。

进一步推导出加入 VDG 控制后储能部分开环传递函数：

$$G(s) = \frac{\hat{u}_{dc}}{u_{dc_ref}} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_{ud}(s)}{1 + G_3(s)G_{id}(s) + G_2(s)G_3(s)G_{ud}(s)} \quad (19)$$

为了分析 J_d 和 D_d 对 VDG 控制的 buck/boost 变换器动态特性的影响，根据式 (19) 在 MATLAB 中绘制系统不同 J_d 和 D_d 的 VDG 开环波德图。图 6 为 D_d 和 J_d 参数扰动时柔性互联系统直流侧储能虚拟直流电机控制的伯德图。

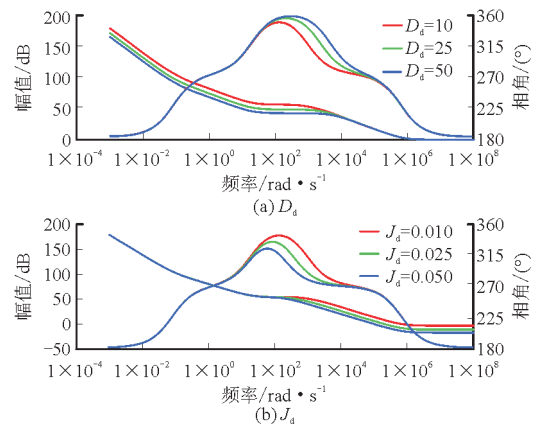


图 6 D_d 和 J_d 参数扰动时的伯德图

Fig.6 Bode plots under D_d and J_d parameter perturbations

由图 6(a) 分析可知，阻尼系数 D_d 主要影响低频段，随着阻尼系数 D_d 的增加，控制系统的相位裕度增加，系统对扰动信号的抑制能力增强。因此，VDG 控制方法可以用来缓冲和控制系统的扰动，从而有效提高控制系统的稳定性。由图 6(b) 分析可知，惯性 J_d 主要影响高频段，随着 J_d 的增大，控制系统的稳定性提高。但由于惯性系数 J_d 的增大，系统截止频率降低，系统响应速度变慢。

3.2 自适应虚拟直流电机控制策略

在多端柔性互联配电系统中，母线电压波动可以通过 VDG 得到抑制，但无法快速跟踪不同时刻波动的状态，从而限制了系统的动态响应能力。因此，本文在互联系统中的储能控制部分，通过相关参数的自适应，提高直流母线的动态响应能力。

由 3.1 节分析得出， J_d 和 D_d 的增大，提高了系统的抗干扰能力。因此，在直流母线受扰动而产生电压波动的起始阶段，采用较大的 J_d 和 D_d 来抑制波动。减小 J_d 可以加快波动的恢复速度，但是稳定

性降低,因此在母线电压波动的恢复阶段,为了得到较快的响应速度,且保持系统稳定性,采用较小的 J_d 和较大的 D_d ,使参数给定值随着波动的变化而自适应改变,具体参数变化原则见表 1。因此,在 VDG 控制框图中引入 J_d 和 D_d 参数自适应模块,直流侧 AVDG 控制部分如图 7 所示。

表 1 AVDG 控制参数变化原则

Table 1 Principles of AVDG control parameter variation

项目	ΔU_{dc}	dU_{dc}/dt	$\Delta U_{dc} \cdot (dU_{dc}/dt)$	J_d	D_d
波动起始阶段 1	>0	>0	>0	增大	增大
波动起始阶段 2	<0	<0	>0	增大	增大
波动恢复阶段 1	≥ 0	≤ 0	≤ 0	减小	增大
波动恢复阶段 2	≤ 0	≥ 0	≤ 0	减小	增大

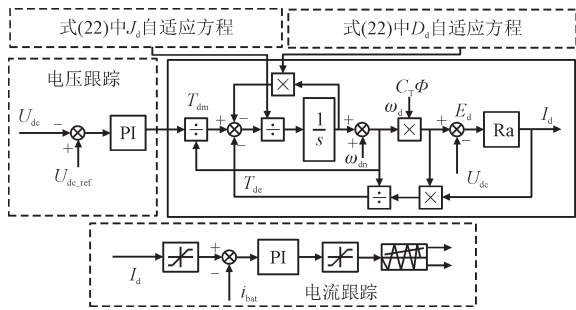


图 7 直流侧 AVDG 控制框图

Fig.7 DC-side AVDG control block diagram

综上所述,AVDG 控制方程为:

$$J_d = \begin{cases} J_{dH} & \Delta U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} > 0 \\ J_{dH} + A \cdot \tanh(|\Delta U_{dc}|) & \Delta U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$D_d = \begin{cases} D_{dL} & \Delta U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} > 0 \\ D_{dL} + B \cdot \tanh(|\Delta U_{dc}|) & \Delta U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \leq 0 \end{cases}$$

式中: J_{dH}, D_{dL} 分别为起始波动阶段的惯性系数和阻尼系数; A, B 分别为惯性、阻尼自适应调节系数。

A, B 系数的存在,使惯性和阻尼可根据 ΔU_{dc} 的变化进行自适应调节,从而更好地抑制直流母线电压的波动,加快波动恢复速度^[30]。

4 仿真分析

为验证本文所提基于 VSG-AVDG 多端柔性互联配电系统控制策略的可行性和有效性,以三端 SOP 为例,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建如图 1 系统模型。仿真参数如表 2 所示。

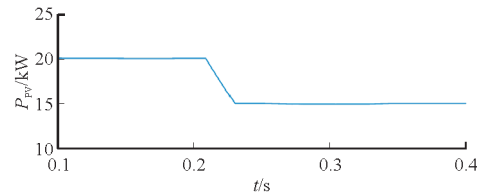
表 2 多端柔性互联配电系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of multi-terminal flexible interconnected distribution system

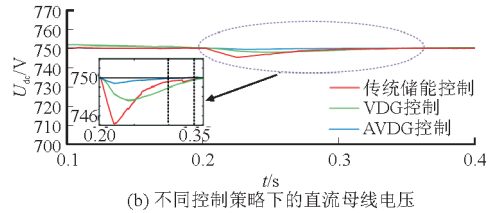
参数	数值
配电网电压等级/kV	10/0.4
U_{dc}/V	750
运行电压/V	380
馈线电阻 $R_{line1}, R_{line2}, R_{line3}/\Omega$	0.1
馈线电感 $L_{line1}, L_{line2}, L_{line3}/mH$	1.5
交流各端口侧滤波电感 $L_{n1}, L_{n2}, L_{n3}/mH$	3
交流各端口侧滤波电容 $C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}/\mu F$	40
$P_{al1}, P_{al2}, P_{al3}/kW$	20, 30, 40
J_g	0.000 1
D_g	10
J_{dH}	0.01
D_{dL}	25

4.1 AVDG 控制与不同控制策略对比

仿真模拟分布式光伏出力在 0.2 s 时由 20 kW 突减至 15 kW,光伏输出有功功率波形如图 8(a)所示,3 种不同控制策略对应的直流母线电压波形如图 8(b)所示。



(a) 光伏输出有功功率



(b) 不同控制策略下的直流母线电压

图 8 直流母线电压动态响应

Fig.8 Dynamic response of DC bus voltage

由图 8(b)可以看出,传统储能控制策略下直流母线电压跌落约 5 V,经过约 0.14 s 进入稳态。采用 VDG 控制后,母线电压跌落约为 2.5 V,经过约 0.16 s 进入稳态,说明采用 VDG 控制后虽有效减少母线电压波动,但损失了一定的恢复时间。采用 AVDG 控制后,母线电压跌落约为 1 V,经过 0.1 s 进入稳态。由此表明,应用本文所提 AVDG 控制后,直流母线电压得到了有效的抑制,且波动的恢复时间明显缩短。

4.2 系统多模式运行及切换特性分析

为验证在本文所提控制策略下,系统正常运行以及模式切换时的控制效果,设置仿真方案如下:

系统运行起始阶段为正常互联模式,响应“削峰填谷”措施,由交流侧消纳直流侧盈余功率 18 kW;0.3 s 时,交直流两侧功率灵活互济、双向流动,交流侧向直流侧传输功率 3 kW;0.5 s 时,交流端口 3 发生故障离网,进行故障转供,系统运行模式切换为转供电模式;0.7 s 时,交直流两侧互联断开,交流配电网馈线末端重要负载由直流侧进行短时供带,系统运行在应急模式。仿真结果如图 9 所示。

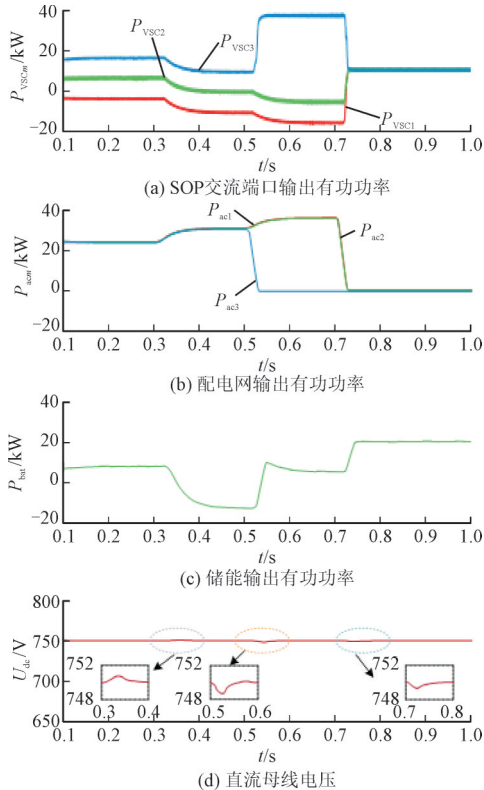


图9 系统多模式运行及切换特性仿真

Fig.9 Simulation of system multi-mode operation and switching characteristics

由图 9 可以看出,[0.1,0.3) s 时, $P_{VSC1}=-4$ kW, $P_{VSC2}=6$ kW, $P_{VSC3}=16$ kW, $P_{ac1}=P_{ac2}=P_{ac3}=24$ kW,端口 2 和 3 所需功率由端口 1 及直流侧供带。[0.3,0.5) s 时, $P_{VSC1}=-11$ kW, $P_{VSC2}=-1$ kW, $P_{VSC3}=9$ kW, $P_{ac1}=P_{ac2}=P_{ac3}=31$ kW,直流侧缺额功率及端口 3 所需功率由端口 1 和 2 供带;0.5 s 时, $P_{ac3}=0$ kW, $P_{VSC3}=40$ kW,交流馈线 3 末端的负载由端口 1 和 2 以及直流侧进行转供电模式下的故障转供,分析可知,[0.3,0.7) s 时在 2 种运行模式下系统均能实现负载均衡。[0.7,1) s 时 $P_{acm}=0$ kW,储能输出功率增加,为系统提供一定的功率支撑,3 条交流馈线末端的重要负载由直流侧进行了短时供带,互联系统成功切换为应急模式。系统交直流两侧交互功率方向改变或者因故障导致运行模式切换时,馈线功率和

端口功率均能缓慢且平稳变化,且直流母线电压始终保持 750 V 左右。

4.3 直流母线电压稳定性仿真

为验证分析多端配电网柔性互联系统直流侧扰动情况下,采用 VSG-AVDG 控制后的直流母线电压波动抑制情况,设置仿真方案如下:初始阶段,直流侧光伏额定功率为 20 kW,直流负载为 10 kW,蓄电池处于待机充电状态;0.2 s 时光伏出力降低至 15 kW,蓄电池进入动态放电状态,输出有功功率 7 kW;0.4 s 时直流负载 DC/DC 变换器故障,直流侧负载离网;0.6 s 时光照强度增大,光伏出力升高 5 kW;0.8 s 时,14 kW 的直流负载从直流侧接入互联系统。仿真结果如图 10 所示。

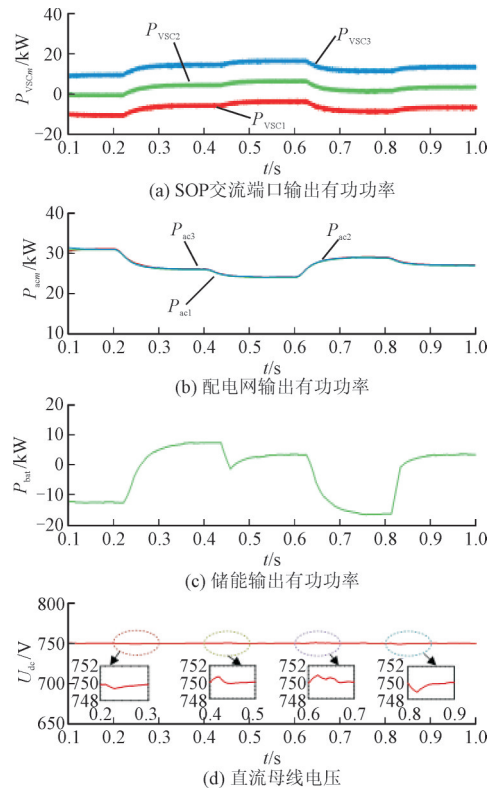


图10 直流母线电压稳定性仿真

Fig.10 Simulation of DC bus voltage stability

由图 10(a)和(b)可知,直流侧光伏出力波动和负载投切发生时, $P_{ac1}=P_{ac2}=P_{ac3}$,多端柔性互联系统始终保持馈线负载均衡,端口之间传输功率平稳变化,表明 VSG-AVDG 控制下的多端柔性互联系统具有更好的适应性和互联性,使交直流各个端口的控制灵活性得以增强。由图 10(c)可知,AVDG 控制下的储能输出功率随着直流母线电压的波动而发生变化,在 0.2 s 时,直流母线电压下降,储能输出有功功率上升;0.4 s 时,直流母线电压升高,储能输出有功功率降低;0.6 s 及 0.8 s 时储能输出有功

率和直流母线电压波动方向相反,表明所提控制策略下,储能参与稳定直流母线电压并且为系统提供有功功率支撑。由图 10(d)可以看出,变化的阻尼和惯性提升了直流母线的稳定性,在所提控制策略下,当发生光伏出力随机波动及负载投切时,直流母线电压的波动幅度被限制在较小的范围,从波动开始到恢复稳定值仅需要较短时间。

5 结语

本研究以分布式电源接入的柔性互联配电系统为研究对象,针对柔性互联变换器低惯性、弱阻尼特性,结合虚拟电机技术自身优势,提出了一种基于 VSG-AVDG 的多端柔性互联配电系统控制策略。在建立 VSG 和 AVDG 融合机制的基础上,将改进 VSG 控制和 AVDG 控制分别作用于交流侧变换器和直流侧储能变换器,实现系统多模式稳定运行及馈线负载均衡。仿真结果表明,相较于传统虚拟电机控制,所提控制策略在有效抑制直流母线电压波动的同时进一步提升直流母线动态响应速度。研究结果为中低压柔性互联配电系统的运行控制提供了新的技术路径与理论支撑。

参考文献

- [1] 尹昌洁, 权楠, 苏凯, 等. 我国分布式能源发展现状及展望[J]. 分布式能源, 2022, 7(2): 1-7.
YIN Changjie, QUAN Nan, SU Kai, et al. Status and outlook of distributed energy development in china[J]. Distributed Energy, 2022, 7(2): 1-7.
- [2] 徐旖旎, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3986-4001.
XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3986-4001.
- [3] 向念文, 王书来, 邵冰冰, 等. 柔性低频输电系统宽频振荡研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 1967-1977.
XIANG Nianwen, WANG Shulai, SHAO Bingbing, et al. Research status and challenges of wide-band oscillation in flexible low-frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1967-1977.
- [4] 朱介北, 罗贺予, 俞露杰, 等. 新型电力系统惯量-频率“云-网-端”感知与控制技术展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3090-3104.
ZHU Jiebei, LUO Heyu, YU Lujie, et al. Modern power system inertia-frequency sensing and control technology outlook across “cloud-grid-terminal”[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3090-3104.
- [5] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 18-29.
ZHANG Guojun, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.
- [6] 彭寒梅, 尹棠, 肖千皓, 等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 117-129.
PENG Hanmei, YIN Tang, XIAO Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution networks with high proportion of distributed generation[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 117-129.
- [7] 周剑桥, 张健文, 施刚, 等. 应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 277-288, 342.
ZHOU Jianqiao, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Exploration on power converter topologies flexible interconnection of distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288, 342.
- [8] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平, 等. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping, et al. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [9] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开点的规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 1-11.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Planning method of soft open point for an active distribution network considering conditional value at risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 1-11.
- [10] 卢慧, 谢开贵, 胡博, 等. 混合交通流下计及储能型柔性开关影响的交通-配电网联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 108-119.
LU Hui, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Coordinated planning of transportation and distribution networks with mixed traffic flow and E-SOP[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 108-119.
- [11] 胡益菲, 钱峰, 李海龙, 等. 基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J]. 供用电, 2024, 41(2): 21-27.
HU Yifei, QIAN Feng, LI Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 21-27.
- [12] 吕知彼, 裴雪军, 王朝亮, 等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动越限抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 150-157.
LYU Zhibei, PEI Xuejun, WANG Chaoliang, et al. A voltage over-limit suppression method based on soft normally-open point in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 150-157.
- [13] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 77-86.
ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage

- support[J].Electric Power Construction,2023,44(7):77-86.
- [14] 涂春鸣,王鑫,杨万里,等.考虑台区变压器经济运行区间的智能软开关控制策略[J].电网技术,2023,47(2):848-858.
TU Chunming, WANG Xin, YANG Wanli, et al. Soft open point control strategy considering transformer economic operation range of distribution area[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 848-858.
- [15] 陈景文,周媛,李晓飞,等.光储直流微网混合储能控制策略研究[J].智慧电力,2022,50(1):14-20,87.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.
- [16] 嘉言,施凯,徐培凤,等.交直流混合微电网接口变换器改进型双向下垂控制策略[J].分布式能源,2023,8(4):1-10.
JIA Yan, SHI Kai, XU Peifeng, et al. Improved bidirectional droop control of hybrid AC-DC microgrid interface converter[J]. Distributed Energy, 2023, 8(4): 1-10.
- [17] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]//International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-6.
- [18] 卢栩舜,朱金荣,王磊,等.基于自适应阻尼的虚拟同步发电机并离网控制[J].电子设计工程,2023,31(15):157-162.
LU Xushun, ZHU Jinrong, WANG Lei, et al. Grid-connected/islanded control of virtual synchronous generator based on adaptive damping[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(15): 157-162.
- [19] 卢栩舜,朱金荣,王磊,等.基于虚拟同步发电机的并离网控制策略优化[J].电子设计工程,2023,31(13):156-162.
LU Xushun, ZHU Jinrong, WANG Lei, et al. Optimization of grid-connected/islanded control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(13): 156-162.
- [20] 段青,沙广林,盛万兴,等.配电网柔性互联系统多模式运行及其调控策略[J].电力自动化设备,2020,40(11):9-24.
DUAN Qing, SHA Guanglin, SHENG Wanxing, et al. Multi-mode operation and its control strategy of flexible interconnected system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 9-24.
- [21] ZHI N, DING K, DU L, et al. An soc-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1411-1420.
- [22] WANG P, ZHAO J, LIU K. Parameter-adaptation-based virtual DC motor control method for energy storage converter[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90795-90804.
- [23] ZHI N, DING Y, DU L. Virtual DC generator control strategy based on differential compensation[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, USA, 2019: 1454-1458.
- [24] 马越超,王生铁,刘广忱,等.基于虚拟直流发电机的风储直流微电网控制策略研究[J].高电压技术,2020,46(11):3819-3831.
MA Yuechao, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Research on virtual dc generator-based control strategy of DC microgrid with wind/energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3819-3831.
- [25] 朱晓荣,韩丹慧.基于虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析及改进方法[J].电力自动化设备,2019,39(12):121-127.
ZHU Xiaorong, HAN Danhui. Stability analysis of DC microgrid based on virtual inertia control and its improved method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 121-127.
- [26] 兰征,涂春鸣,姜飞,等.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, et al. 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.
- [27] 杨万里,涂春鸣,兰征,等.基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略[J].电力自动化设备,2021,41(5):254-260.
YANG Wanli, TU Chunming, LAN Zheng, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multistate switch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 254-260.
- [28] 姚王永,张立臣,穆勇,等.基于自适应虚拟电机策略的微电网储能控制研究[J].供用电,2022,39(7):84-92.
YAO Yuyong, ZHANG Lichen, MU Yong, et al. Research on energy storage control in microgrid based on adaptive virtual machine strategy [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 84-92.
- [29] 曹新慧,刘昱良,苗世洪,等.考虑参数自适应的直流微电网DC/DC变换器虚拟惯性控制策略研究[J].高电压技术,2020,46(4):1281-1290.
CAO Xinhui, LIU Yuliang, MIAO Shihong, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC/DC converter in DC microgrid considering selfadaptive parameters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1281-1290.
- [30] 王勉,唐芬,赵宇明,等.虚拟直流电机的参数自适应控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):148-155.
WANG Mian, TANG Fen, ZHAO Yuming, et al. Parameter adaptive control strategy of virtual DC machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 148-155.

(责任编辑 付小平)

收稿日期:2024-07-08; 修改日期:2025-02-27

作者简介:王振浩(1964),男,吉林吉林人,教授,主要研究方向为柔性直流输电技术等。E-mail:zhenhaowang@126.com。

杜成林(1999),男,通信作者,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网柔性互联系统运行与控制。E-mail:2256323478@qq.com。