

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.026

一种虚拟同步型构网储能变流器的故障电流抑制方法

王涛¹, 王聪¹, 朱恩泽², 戎士敏¹, 李娜¹

(1. 国家电网河北省供电公司石家庄分公司, 石家庄 050000; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 构网型变流器的恒压输出特性使其在故障状态下会出现过电流, 这限制了其应用推广。文中提出了一种虚拟同步型构网储能变流器的故障电流抑制方法, 在实现惯性增强的前提下, 能够限制故障电流。首先, 基于虚拟同步发电机原理, 给出了控制策略, 并分析其惯性增强作用。然后, 分析了故障状态下过电流的原因: 功率指令无法及时调整以及电压跌落瞬态分量是产生过电流的两个主要因素, 并设计了一种基于功率补偿与电压补偿的前馈控制策略, 在单相以及三相故障下均可消除过电流的影响。最后, 搭建了MATLAB/Simulink 仿真模型, 验证了故障电流抑制方法的有效性。

关键词: 储能变流器; 构网变流器; 虚拟同步机; 过电流抑制

Fault Current Suppression Method for a Virtual Synchronous Type Grid-forming Energy Storage Converters

WANG Tao¹, WANG Cong¹, ZHU Enze², RONG Shimin¹, LI Na¹

(1. State Grid Hebei Power Supply Company Shijiazhuang Branch, Shijiazhuang 050000, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The constant voltage output characteristics of grid-forming inverters result in overcurrent under fault conditions, which limits their application and promotion. In this paper, a fault current suppression method for a virtual synchronous grid-forming energy storage converter is proposed which, on the premises of achieving inertia enhancement, can limit the fault current. First, a control strategy is proposed based on the principle of virtual synchronous generator and its inertia enhancement effect is analyzed. Then, the reasons for overcurrent under fault conditions were analyzed. The inability to adjust power commands in a timely manner and the transient component of voltage drop are two main factors causing overcurrent. Moreover, a feedforward control strategy based on power compensation and voltage compensation is designed, which can eliminate the impact of overcurrent under single-phase and three-phase faults. Finally, a MATLAB/Simulink simulation model is set up to verify the effectiveness of the fault current suppression method.

Key words: energy storage converter; grid-forming converters; VSG; overcurrent suppression

0 引言

在建设新型电力系统的指引下, 储能技术发展蓬勃^[1-4], 其在负荷消峰填谷、优化运行、可再生能源消纳以及输配电网安全性都有较强的应用背景^[5-8]。而新能源出力的不确定性导致电网的稳定性变弱, 且电网的旋转备用容量以及转动惯量相对减少^[9], 传统逆变器并未表现出常规电力系统的惯性以及

调频调压特性, 因此对储能技术提出了构网要求, 其稳定出力的特性能够有效的改善新能源发电源荷不平衡现象^[10-11]。

储能系统的构网特性主要依靠变流器来实现, 相较于跟网型变流器, 构网型变流器对外表现为串联低阻抗的可控电压源; 而跟网型变流器对外表现为并联高阻抗的可控电流源^[12-13]。文[14]进一步完善了构网型变流器的概念, 以是否能够为电网提供

收稿日期: 2025-09-21; 修回日期: 2025-12-11

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(kj2022-038)。

Project Supported by Science and Technology Projects of State Grid Corporation of China(kj2022-038).

惯性支撑和是否能够离网运行作为构网型变流器的评判标准。

为解决分布式可再生能源的高渗透问题,使用构网型变流器能够根据所支撑馈线的电压频率状态动态调节交流侧输出功率,从而为系统提供频率支撑和电压基准。基于此,英德等国家出台相应技术标准并要求在新建工程中使用。目前构网型变流器控制策略主要包括有下垂控制、匹配控制、虚拟同步机控制以及虚拟振荡器控制,其中虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术作为其中能够为系统注入惯性和阻尼的典型控制策略受到广泛关注^[15-19]。

现有的VSG研究大多关注VSG的小干扰稳定性分析,只有少量文献针对VSG的大扰动故障下的故障穿越进行了研究^[20]。针对虚拟同步机电压穿越的方法主要集中在增加限流硬件^[21]、正负序分离^[22]、前馈补偿^[20]、虚拟阻抗^[23]几个方面。由于前馈抑制无需增加限流硬件且调参方便,同时对电网的大扰动具有优秀的抑制功能,因此采用前馈抑制的低电压穿越策略能够使现有设备在尽可能小的改动条件下实现大扰动下的过电流抑制,使得构网变流器能更稳定、经济、高效的运行。

将储能设备与构网型变流器结合,相较于直流侧直接接入分布式新能源发电设备,能够保证在功率灵活控制的基础上,有效起到惯性源的功能,能够改善新能源发电时间尺度大的影响,更加充分地利用电能,优化高比例新能源电网的短路容量问题。

文中针对分布式新能源导致系统稳定性变弱以及低电压穿越的问题,提出了一种基于虚拟同步的储能变流器故障电流抑制方法,首先阐述了所提控制策略的工作模式,通过分析虚拟同步机的数学模型得出对电网惯性的增强作用,然后介绍了交流侧电网故障时的低电压穿越控制策略,最后通过仿真分析,验证了所提控制策略的有效性,并在结论中对整个控制策略进行总结,分析了所提控制策略的优缺点。

1 储能变流器控制

根据转子摇摆方程与无功下垂方程可以建立虚拟同步机的有功与角频率方程以及无功与交流电压幅值的关系,并根据构造方程将计算出的电压与频率得到虚拟同步机的参考输出

$$\begin{cases} P_{in}^{ref} - P_g = M\omega_m \frac{d\omega_m}{dt} - D(\omega_g - \omega_m) \\ Q_{in}^{ref} + \sqrt{2}D_q(U_g^{ref} - U_g) - Q_g = \sqrt{2}KsU_m \\ U_{vsg} = \sqrt{2}U_m[\sin\theta_m \sin(\theta_m - \frac{2}{3}\pi) \sin(\theta_m + \frac{2}{3}\pi)] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_{in}^{ref} 为参考输入功率; P_g 为 PCC 处交流母线传输的瞬时有功功率; ω_m 为虚拟同步机产生的角频率; ω_g 为电网的角频率; M 和 D 则分别为虚拟同步机的阻尼系数和惯性系数; Q_{in}^{ref} 为无功的给定值; Q_g 为实际发出无功量; U_g^{ref} 为电网电压的参考值的有效值; U_g 为电网电压的实际值的有效值; D_q 和 K 分别为下垂参数和电压调节系数; U_m 为虚拟同步机发出电压的有效值; U_{vsg} 为虚拟同步机输出的参考电压有效值; θ_m 为虚拟同步机产生的相位。

构网型储能变流器控制策略见图1,主体控制模式为电压型虚拟同步机控制模型,能够有效为系统提供惯性增强的作用,系统通过检测PCC处的电流、电压、频率,获得此时系统的 ω_g 、 u_g 以及根据瞬时功率理论计算得到的 P_g 进行反馈,再根据式(1)所列写的虚拟同步机方程,得到构造电压 U_{vsg} ,最后经过PWM环节输入系统。

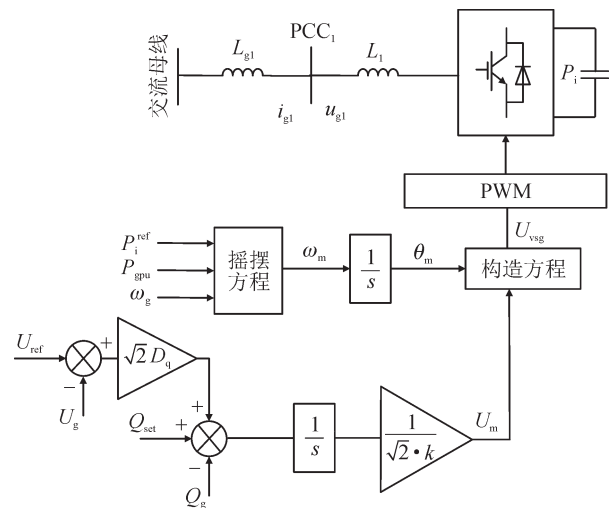


图1 构网型储能变流器控制框图

Fig. 1 Control block diagram of energy storage converter

2 虚拟同步发电机过电流产生原因

2.1 稳态过电流产生原因

当系统发生单相或三相接地故障时,有功功率的调节无法及时跟踪。电网运行时,交流侧有由于构网型变流器的外环为功率外环,工作时始终有

$$P_g = UI \cos \theta \quad (2)$$

当外环功率保持恒定而发生电压跌落故障时, P_g 大幅跌落,在虚拟同步机环节中, P_{in}^{ref} 与 P_g 之间存在较大净差,由于虚拟同步机容量有限,无法将电压抬升至原状态,在调节过程中必然导致过电流

的产生, 因此需要在虚拟同步机外环增加功率补偿, 从而抑制在电压跌落期间产生的过电流。

2.2 暂态过电流产生原因

如图1所示, 本控制器用于低电压穿越的环节有功率前馈环节以及电压前馈环节。在三相故障发生时, 针对电压跌落以及恢复过程, 采用dq坐标系分析, 无前馈的虚拟同步机侧数学表达式可以写为

$$\begin{cases} L \frac{di_g}{dt} = u_i^{\text{ref}} - v_g - Ri_g \\ P_{\text{in}}^{\text{ref}} - P_g = M\omega_m \frac{d\omega_m}{dt} - D(\omega_g - \omega_m) \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m - \omega_g \end{cases} \quad (3)$$

当故障发生时 $\Delta U_g = u_i^{\text{ref}} - u_g$, 由于虚拟同步机的惯性特性, 角频率的变化速度慢, 摇摆方程和角频率变化公式可以忽略不计, 将电流 i_g 的公式进行dq坐标变换, 即可得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{dg} \\ \Delta i_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_g \\ -\omega_g & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{dg} \\ \Delta i_{qg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(\cos\theta - 1) \\ \frac{1}{L}\sin\theta \end{bmatrix} \Delta u_{gd} \quad (4)$$

式(4)中

$$\Delta u_{gd} = \begin{cases} -\Delta U_g & t_1 \leq t < t_2 \\ \Delta U_g & t_2 \leq t \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中的 $\begin{bmatrix} \frac{1}{L}(\cos\theta - 1) \\ \frac{1}{L}\sin\theta \end{bmatrix} \Delta u_{gd}$ 分量为瞬态电压分量,

结合式(4)、(5)可知, 瞬态电压是导致瞬态波动电流产生的根本原因, 如果能够通过降低瞬态电压分量的值, 则可实现对瞬态电流分量的抑制。

当单相故障发生时, 设a相发生接地故障, u_g 相位不发生变化, 忽略零序分量, 则采用三相静止坐标系进行正负序分离分析有

$$\begin{bmatrix} (U_a - \Delta U_g) \cos(\omega t + \theta_a) \\ U_b \cos(\omega t + \theta_b) \\ U_c \cos(\omega t + \theta_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \cos(\omega t + \theta_d) \\ U_d \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_d) \\ U_d \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \cos(\omega t + \theta_n) \\ U_n \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \\ U_n \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中: U_a, U_b, U_c 分别为不对称三相电路的不平衡量; U_d 为正序分量; U_n 为负序分量。

3 过电流抑制策略

3.1 有功功率给定抑制与外环切换

根据功角公式可得

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = \frac{U_{\text{out}} U_{\text{grid}}}{X} \sin\delta \\ Q_{\text{out}} = \frac{U_{\text{out}}(U_{\text{out}} - U_{\text{grid}} \cos\delta)}{X} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: P_{out} 为输出有功功率; Q_{out} 为输出无功功率; U_{out} 为变流器端口处电压; U_{grid} 为电网电压; δ 为变流器输出电压的相位与电网电压相位差。

由于变流器端口电压与电网电压的有效值接近, 可以近似得到

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = \frac{U_{\text{grid}}^2}{X} \sin\delta \\ Q_{\text{out}} = \frac{U_{\text{grid}}^2(1 - \cos\delta)}{X} \end{cases} \quad (8)$$

当 P_{out} 与 U_{grid} 的平方成比例时, 有功给定值 P_{ref} 与 $U_{\text{gridp.u}}^2$ 相乘得到新的有功给定值 \hat{P}_{ref} , 当稳态运行时, $\hat{P}_{\text{ref}} = P_{\text{ref}}$, 当故障发生时, \hat{P}_{ref} 能够跟随跌落电压响应, 降低参考值, 实现对电压跌落时过电流的抑制。

但是当电压跌落发生时, 如果仍然由无功控制环路对电压幅值进行调节, 交流侧由于容量较大, 参考交流侧电压 U_{ref} 和 U_g 必然存在误差, 将会导致电流上升, 因此需要引入外环切换, 当故障发生时, 将无功外环控制切换为0, 以保证虚拟同步机所产生电压幅值的稳定。

3.2 前馈电压过电流抑制

当电压跌落故障结束, 电压恢复时产生的过电流需要使用电压前馈的策略对此时突变电压进行抑制, 同时采用双同步旋转坐标系法提取电网电压的幅值与相位, 相较文[21]中的T/4延时相消法能够更平滑的处理在故障发生过程中的响应曲线。

构造参考电压以及电网电压有

$$\begin{cases} u_1 = \sqrt{2} U_g^{\text{ref}} [\sin\theta_g \quad \sin(\theta_m - \frac{2}{3}\pi) \quad \sin(\theta_m + \frac{2}{3}\pi)] \\ u_2 = \sqrt{2} U_g [\sin\theta_g \quad \sin(\theta_m - \frac{2}{3}\pi) \quad \sin(\theta_m + \frac{2}{3}\pi)] \end{cases} \quad (9)$$

将虚拟同步机产生的参考电压、电网构造电压以及参考电压共同作用产生的电压作为变流器的给定输入电压有

$$u_v^{\text{ref}} = u_{\text{vsg}} + u_2 - u_1 \quad (10)$$

忽略通信延迟, 则在理想情况下有 $u_2 \approx u_g$, 方向与电网电压相反, u_1 主要作用是防止电网构造电压前馈作用导致VSG环节产生过电压, 前馈结构简化模型见图2。

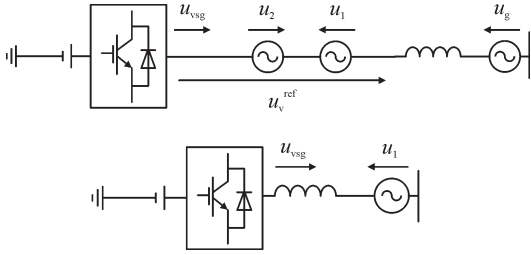


图2 电压前馈抑制框图

Fig. 2 Voltage feedforward suppression block diagram

当电网电压前馈作用在给定输出参考上时,电网构造电压 u_2 与电网电压 u_g 相抵消,整个系统中只剩虚拟同步机产生的电压和构造参考电压的作用,此时系统方程为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} + U_g^n \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (11)$$

从式(11)中可得,瞬态电压分量已经消除,不会产生瞬态电流分量,电感上的压降只有VSG产生电压和参考电压之差的稳态电压成分,因此,不论是三相故障还是单相故障,都能够在保证虚拟同步机惯性运行的前提下,没有瞬态电压分量出现,保证系统的平滑稳定运行。

综合上述抑制,以及式(10),建立的控制框图见图3,相较于图1,增加了功率前馈环节、电压前馈环节以及用以防止故障时过压的外环切换环节。

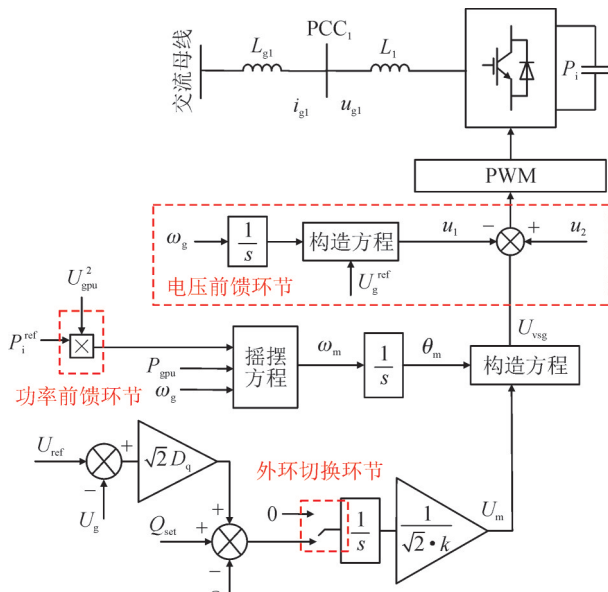


图3 储能变流器控制框图

Fig. 3 Control block diagram of energy storage converter

4 仿真结果与分析

为验证所提策略的正确性和有效性,搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型,仿真参数见表1。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
单变流器容量/kW	1 500
变流器电流额定值/A	110
直流母线电压额定值/V	750
线路相电压有效值/V	220
变流侧滤波电感/mH	5
变流侧滤波电阻/ Ω	0.1
滤波电容/ μF	10
整流侧双闭环 k_p, k_i	3, 120
虚拟同步机惯性常数/p.u.	130
虚拟同步机阻尼系数	8
变流器开关频率/kHz	10
仿真采样周期/ μs	10

4.1 电网电压三相跌落时

为验证故障时的功率前馈控制和电压前馈控制的有效性,设计如下仿真:系统初始运行在逆变状态,1 s时逆变交流侧发生三相接地故障,跌落至 0.2 p.u.,故障持续 1 s。2 s时,交流侧三相跌落电压恢复至 1 p.u。

功率响应曲线见图4,红色线为功率给定,蓝色线为实际的功率响应,具备功率前馈抑制时,电压变化的参考功率能够跟随交流侧电压的变化而变化,抑制公式中功率差的突变,在优先保证器件正常工作的前提下,抑制电压跌落过程中过电流的产生。

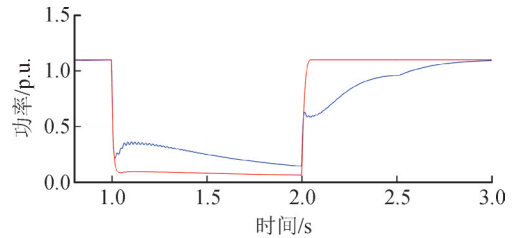


图4 功率响应曲线

Fig. 4 Power response curve

三相故障时的逆变端口电流响应见图5,不具备电压前馈时,电压跌落没有过电流的产生,过渡过程迅速,但当电压恢复时,过电流达到 1.5 p.u。连接电压前馈环节,电流响应见图6,由仿真响应图像可知,在电压跌落以及恢复过程中,均没有过电流产生,且过渡过程平滑。

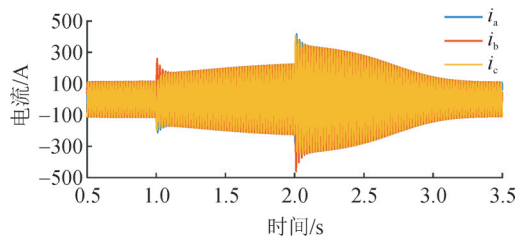


图5 无优化三相故障

Fig. 5 No optimized three-phase fault

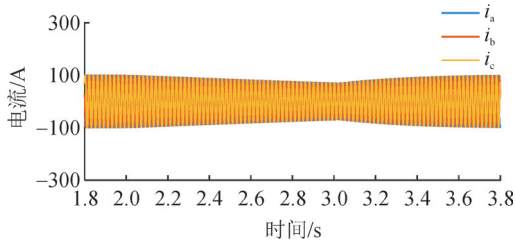


图6 优化后三相故障

Fig. 6 Three-phase fault after optimization

4.2 电网电压单相跌落时

为验证不平衡故障下功率—电压前馈抑制的效果,设计如下仿真:系统初始运行在逆变状态下,1 s时A相电压跌落至0.2 p.u.,BC相电压仍然保持1 p.u.,当故障发生时,三相电流出现不对称,见图7。

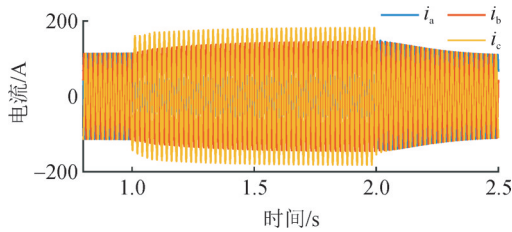


图7 无优化单相故障

Fig. 7 Non-optimized single-phase fault

由单相故障发生时的情况可以看出,A相电压跌落时,由于功率前馈作用,BC相电流跟随降低,故障相电流从1 p.u.逐渐降低至0.96 p.u.,在3 s电压恢复时,也出现了不对称过电流,当连接虚拟电压前馈抑制环节时,仿真效果见图8,电压穿越过程平滑,除去仅在电压跌落时由于无功控制滞后性产生的0.06 p.u.过电流,其余情况过电流均得到抑制,三相保持对称。

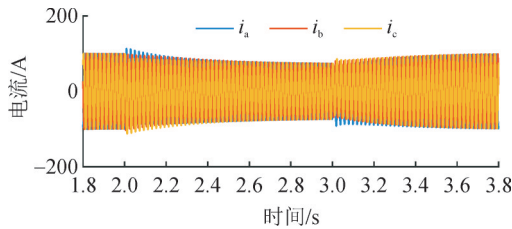


图8 优化后单相故障

Fig. 8 Single phase fault after optimization

5 结论

文中提出了一种惯性支撑型PCS控制策略,当电网发生单相或三相故障时,能够通过前馈抑制以及外环切换抑制变流器出现的过电流,得到以下结论:

1)文中所提出的控制策略能够有效实现对电网惯性的增强,且在交流侧发生电压故障以及故障切除恢复过程中,变流器能够继续平稳运行,不出现过电流。

2)文中的控制策略可靠性实施的前提是能够快速诊断出交流侧电压波动是由故障产生的还是系统高负荷所导致的,否则无功电压控制环节可能在高负荷运行时不参与电网电压调控。

参考文献:

- [1] 葛磊蛟,郑轶文,李小平,等.高比例分布式光伏接入下配电网多类型储能优化配置技术综述[J].浙江电力,2025,44(5):1-11.
GE Leijiao, ZHENG Yiwen, LI Xiaoping, et al. A review of optimal allocation technologies for multi-type energy storage in distribution networks with high penetration of DPV[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 1-11.
- [2] 查鲲鹏,胡江溢,杨岳峰,等.基于自抗扰控制的斜坡式重力储能并网[J].大电机技术,2025(4):82-88.
ZHA Kunpeng, HU Jiangyi, YANG Yuefeng, et al. Grid-connected ramped gravity energy storage based on active disturbance rejection control[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4): 82-88.
- [3] 邵冲,李春华,段瑞超,等.面向新能源消纳的多元储能配置及经济优化调度[J].电网与清洁能源,2025,41(9):141-147.
SHAO Chong, LI Chunhua, DUAN Ruichao, et al. Multi-energy storage configuration and economical optimal scheduling for new energy consumption[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(9): 141-147.
- [4] 李妍,王青山,张群,等.基于指标权重最优匹配的重力储能发电电动机并网方法[J].大电机技术,2025(1):69-75.
LI Yan, WANG Qingshan, ZHANG Qun, et al. Grid connected method for generator/motor in gravity energy storage system based on optimal matching of indicator weight[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(1): 69-75.
- [5] 曾珠梅,孙建梅.计及电—气—热需求响应的区域综合能源系统运行优化[J].电力工程技术,2024,43(5):48-57.
ZENG Zhumei, SUN Jianmei. Operation optimization of regional integrated energy system with electricity-gas-thermal demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 48-57.
- [6] 唐波,刘一龙,朱瑞金,等.考虑系统灵活性的配电网分布式电源消纳能力分析[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):80-88.
TANG Bo, LIU Yilong, ZHU Ruijin, et al. Analysis of distributed generator consumption capacity of distribution networks considering system flexibility[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 80-88.
- [7] 马会萌,李相俊,吴荣宇,等.兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J].电力建设,2024,45(6):111-119.
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 111-119.
- [8] 于雷,姚俊伟,杨金龙.小样本下风光储耦合系统的新能源消纳能力概率评估方法[J].智慧电力,2024,52(10):9-15.
YU Lei, YAO Junwei, YANG Jinlong. Probabilistic evaluation

- method for renewable energy integration capability for wind - photovoltaic-storage coupling system with small sample[J]. Smart Power, 2024, 52(10):9-15.
- [9] 张佳辉,张洪福,牛玉广,等.考虑新能源出力不确定性的风—光—柴—储系统调度策略[J].电测与仪表,2024,61(3):20-25. ZHANG Jiahui, ZHANG Hongfu, NIU Yuguang, et al. Dispatching strategy of wind - solar - diesel - battery hybrid power generation considering renewable energy output uncertainty[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3):20-25.
- [10] 肖峻,李承晋,屈玉清,等.含储能有源配电网的运行域模型、求解及机理分析[J].电网技术,2023,47(12):5181-5192. XIAO Jun, LI Chengjin, QU Yuqing, et al. Dispatchable region model and its solution and mechanism for active distribution network with energy storage[J]. Power System Technology, 2023, 47(12):5181-5192.
- [11] 于重阳.基于直觉模糊S-粗决策模型的储能变流器双环控制[J].大电机技术,2025(4):94-98. YU Chongyang. Dual loop control of energy storage inverter based on intuitionistic fuzzy S-rough decision model[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4):94-98.
- [12] 黄炳政,陈俊儒,刘牧阳,等.基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(12):57-68. HUANG Bingzheng, CHEN Junru, LIU Muyang, et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12):57-68.
- [13] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid - forming converters: Control approaches, grid - synchronization, and future trends - a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021(2):93-109.
- [14] 梁军,李传玥.并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J].电网技术,2022,46(10):3703-3711. LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid - connected inverters and weak-grid stabilization[J]. Power System Technology, 2022, 46(10):3703-3711.
- [15] 戎士洋,范辉,梁纪峰,等多VSG单元的惯量协调控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):170-180. RONG Shiyang, FAN Hui, LIANG Jifeng, et al. Research on inertia coordinated control strategy of multiple VSG cells[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2):170-180.
- [16] 郭磊磊,贾凯阳,朱虹,等.基于有功微分补偿与虚拟惯量自适应的光储VSG控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):21-31. GUO Leilei, JIA Kaiyang, ZHU Hong, et al. Control strategy for a PV energy storage VSG based on active power differential compensation and virtual inertia adaptive strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10):21-31.
- [17] 唐英杰,查晓明,田震,等.弱电网条件下虚拟同步机与SVG并联系统的暂态稳定性分析[J].电网技术,2022,46(10):4020-4029. TANG Yingjie, ZHA Xiaoming, TIAN Zhen, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator and SVG parallel system under weak grid conditions[J]. Power System Technology, 2022, 46(10):4020-4029.
- [18] YANG Yaqian, XU Jiazhu, LI Chang, et al. A new virtual inductance control method for frequency stabilization of grid-forming virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1):441-451.
- [19] SAFFAR K G, DRISS S, AJAEI F B. Impacts of current limiting on the transient stability of the virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2):1509-1521.
- [20] KOIWA K, INOO K, ZANMA T, et al. Virtual voltage control of VSG for overcurrent suppression under symmetrical and asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11):11177-11186.
- [21] SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3):2137-2150.
- [22] 董纪清,潘佳清,毛行奎.自适应正负序复合控制的VSG低电压穿越策略[J].电网技术,2023,47(2):815-822. DONG Jiqing, PAN Jiaqing, MAO Hengkui. Low voltage ride - through strategy of VSG based on adaptive positive and negative sequence composite control[J]. Power System Technology, 2023, 47(2):815-822.
- [23] LIANG Xiaodong, ANDALIB - BIN - KARIM C, LI Weixing, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1):46-60.
- 王涛(1983—),女,硕士,高级工程师,研究方向为分布式配电网(E-mail:2764759491@qq.com)。
- 朱恩泽(1997—),男,博士研究生,研究方向为电力电子设备与电力电子设备在电力系统中的应用(通信作者)(E-mail:zhuenze@mail.iee.ac.cn)。