

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.012

构网型储能变流器支撑微电网柔性黑启动的控制策略研究

张亮^{1,2,3}, 方舟², 郑玉平¹, 吴在军³, 张敬昊², 侯凯¹, 王俊辉¹
(1. 南瑞集团有限公司, 南京 211106; 2. 南京工程学院, 南京 211167; 3. 东南大学, 南京 210096)

摘要: 为提高微电网故障恢复能力,文中提出了一种构网型储能变流器支撑微电网黑启动控制策略。首先,开展了微电网黑启动过程电压支撑和变压器励磁涌流产生的工作机理分析。在此基础上,采用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术控制构网型储能变流器作为黑启动微源,为孤岛微电网提供电压支撑,并将构网型储能变流器当作主电源而跟网型储能变流器当作从电源进行协同配合;其次,提出一种构网型储能变流器输出电压建立的柔性启动策略,以减小配电变压器的励磁涌流。最后,在MATLAB/Simulink建立模型开展仿真研究,仿真结果验证了所提策略的可行性和有效性。

关键词: 构网型变流器; 黑启动; 励磁涌流; 主从控制

Research on Control Strategy of Grid-forming Energy Storage Converter for Supporting Flexible Black Start of Microgrid

ZHANG Liang^{1,2,3}, FANG Zhou², ZHENG Yuping¹, WU Zaijun³, ZHANG Jinghao²,
HOU Kai¹, WANG Junhui¹

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To enhance the fault recovery ability of microgrid, a black start control strategy supported by grid-forming energy storage converter is proposed in this paper. First, the operating mechanism analysis of voltage support and transformer inrush current generation during black start of microgrid is performed. On this basis, the virtual synchronous generator(VSG) technology is adopted to control the grid-forming energy storage converter as the black start micro-source so to provide voltage support for island microgrid, and the grid-forming energy storage converter as the main power supply as well as the grid-following energy storage converter as the secondary power supply for coordination. Then, a flexible starting strategy based on output voltage of grid-forming energy storage converter is proposed to reduce the inrush current of distribution transformer. Finally, a model in MATLAB/Simulink is set up for simulation research, and the feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified by the simulation result.

Key words: grid-forming converter; black start; inrush current; master-slave control

0 引言

随着中国能源结构调整和“双碳”战略的不断推进,新能源建设得到大力发展,配电网已呈现高比例新能源和高比例电力电子化特征^[1-3]。然而,传

统跟网型电力电子变流器通常难以像传统同步发电机一样为电网提供足够的惯量支撑,使得近年来构网型变流器成为新型电力系统发展中一个研究热点。当中,构网型储能变流器具备无需外部电网条件下带负载运行的能力,能够帮助孤岛电力系统

收稿日期:2025-10-15; 修回日期:2025-12-22

基金项目:江苏省重点研发计划(BE2017169);南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ202210);国家电网总部科技项目(5419-202140235A-0-0-00)。

Project Supported by Key R & D Plan of Jiangsu Province(BE2017169), Research Startup Fund for Introduced Talents at Nanjing Institute of Technology(YKJ202210), Science and Technology Project of State Grid Headquarters(5419-202140235A-0-0-00).

有效实现黑启动。因此,文中重点关注构网型与跟网型变流器混合的含高比例新能源新型电力系统,研究如何有效利用构网型储能变流器支撑微电网黑启动的相关控制技术。

黑启动是指电网由于外部干扰或者内部故障导致进入全黑状态后,不依靠外部电网帮助,由系统中具备黑启动能力的微源带动没有黑启动能力的微源^[4],逐步建立系统的电压和频率,最终重新恢复至稳定运行状态。国内外学者针对微电网黑启动和变压器励磁涌流控制问题开展了大量研究,文[5]设计了一种应用于DFIG的改进虚拟同步控制策略以达到更好地为微网提供电压和频率支撑的目的。文[6]在传统VSG控制的基础上提出一种双阈值—全程自适应频率控制策略,在减小频率超调量的同时,消除了次振荡周期。同时,应用到微电网黑启动中,实现了微电网从启动到稳态的全程调节,避免了控制模式频繁切换可能导致的黑启动失败问题。文[7]针对交流微电网带负载黑启动的问题,提出了一种主从结构下的黑启动协调控制策略。文[8]采用无功功率同步策略使光伏逆变器具有构网型变换器功能,实现了光伏电站在电网故障恢复阶段的完全自主黑启动。文[9]提出一种延长换流器电压升压时间并调整变压器分接开关位置的方法来抑制直流输电系统黑启动时变压器的励磁涌流。文[10]提出了一种变流器输出电压按照复合函数曲线逐渐上升方法来抑制变压器的励磁涌流。文[11]详细对比了预先消磁、合闸电阻、选相合闸等3种变压器励磁涌流抑制方法,为不同应用场合变压器励磁涌流的抑制选择提供设计参考。文[12]分析了磁通、合闸相角、合闸电阻与励磁涌流的关系,提出将合闸电阻与相控技术结合起来抑制变压器励磁涌流。

综上所述,在构网型和跟网型变流器混合的微电网中,如何实现黑启动中多机并联协同控制,提高故障恢复能力、减小变压器励磁电流,已成为亟待研究问题。文中在分析含微电网黑启动电压支撑问题以及微电网黑启动过程变压器励磁涌流过流机理的基础上,开展了微电网黑启动过程电压支撑和变压器励磁涌流的过流机理分析,提出一种黑启动多机并联协同控制策略;即采用构网型储能变流器作为主电源建立并维持微网电压和频率;跟网型变流器作为从电源,实时跟踪主电源的输出实行

相应协同控制。与此同时,在构网型储能变流器的电压输出控制环节设计了变压器励磁涌流抑制模块。最后,在MATLAB/Simulink建立模型开展仿真研究,结果验证了所提策略的可行性和有效性。

1 含构网型和跟网型变流器的微电网黑启动问题分析

1.1 含构网型和跟网型变流器的微电网黑启动电压支撑问题分析

以新能源为主的典型微电网系统见图1,由风电、光伏、储能等组成。其中,光伏和风电自身出力受气象因素影响较大,因此黑启动过程通常用储能变流器对电压频率进行支撑^[13]。

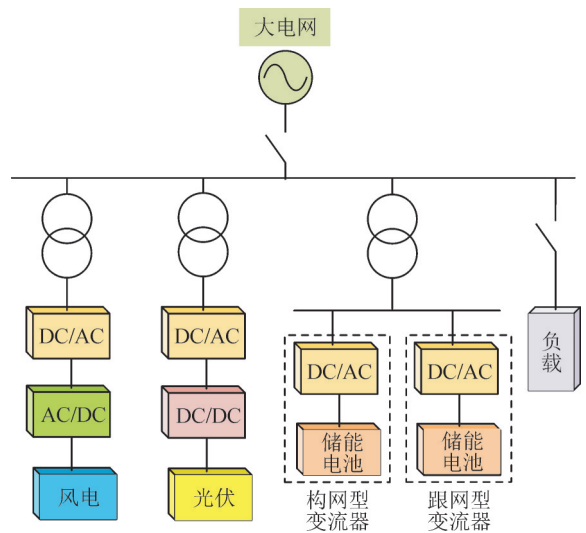


图1 以新能源为主的典型微电网

Fig. 1 A typical microgrid based on new energy

当前微电网中新建的储能电站部分采用了构网型变流器技术,因此在微电网黑启动过程中可将构网型储能变流器作为主电源,建立起系统电压和频率,见图2。由于系统短路比小,跟网型变流器与尚未升级改造的跟网型储能变流器、以及其他变流器之间的相互作用可能引发振荡,因此黑启动过程中还需要合理设计构网型储能变流器和跟网型储能变流器的协同控制策略。

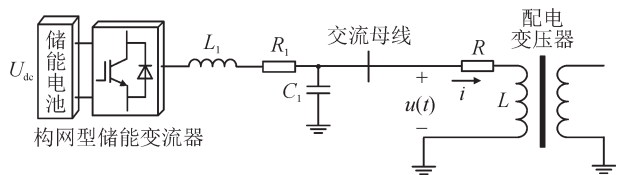


图2 储能变流器建立电压的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of building voltage of energy storage converter

1.2 微电网黑启动过程变压器励磁涌流抑制机理分析

储能变流器具有动态响应速度快等优点,但是黑启动过程储能变流器输出电压过快往往会导致配电变压器出现磁通过饱和现象^[14]。

变压器的磁通方程为

$$N_1 \frac{R}{L} \phi + N_1 \frac{d\phi}{dt} = u(t) \quad (1)$$

式(1)中: N_1 、 R 分别为变压器与变流器相连的一次侧绕组的匝数和电阻; ϕ 为通过一次侧绕组的总磁通; L 为一次绕组自感,在磁通分析中近似为常数。

通过变压器一次侧绕组总磁通可表示为

$$\phi = -\phi_m \cos(\omega t + \alpha) + [\phi_m \cos(\alpha) + \phi_r] e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

式(2)中: ϕ_r 为变压器的剩磁; ϕ_m 为稳态磁通幅值^[15-16]; α 为电压初相角。

由于储能变流器输出电压上升快慢由斜率决定,假设变压器一次侧施加电压为

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U_m}{T_s} t \cos(\omega t + \alpha) & t \in [0, T_s] \\ U_m \cos(\omega t + \alpha) & t \in [T_s, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: U_m 为配电变压器一次侧电压幅值; T_s 为升压时间。

将式(3)用复变量表示成三相形式,再根据欧拉公式可改写为

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U_m}{T_s} t e^{j(\omega t + \alpha)} & t \in [0, T_s] \\ U_m e^{j(\omega t + \alpha)} & t \in [T_s, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

当 $t > T_s$ 时,将式(4)代入式(1),解得

$$\phi(t) = \begin{cases} \phi_m \frac{M e^{j(\omega t + \alpha)}}{T_s N} \left(t - \frac{1}{K} \right) + (\phi_r + \phi_m \frac{M e^{j\alpha}}{T_s N K}) e^{-\frac{R}{L}t} & t \in [0, T_s] \\ \phi_m \frac{M e^{j(\omega t + \alpha)}}{N} + \phi_r e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{M e^{j\alpha}}{T_s N K} (e^{-\frac{R}{L}T_s} - e^{j\omega T_s}) e^{-\frac{R}{L}t} & t \in [T_s, +\infty) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $M = \frac{R}{L} - j\omega$; $N = \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}$; $K = j\omega + \frac{R}{L}$ 。

假设当储能系统通过变流器建立电压时,变压器的剩磁已经衰减完毕,即 $\phi_r = 0$,而变压器铁心饱和和主要是磁通幅值过大导致。忽略指数衰减,即 $R=0$ 。对式(10)右边各分量分别取模并求和,得

$$|\phi(t)| \leq \begin{cases} \phi_m + \frac{\phi_m}{T_s \omega} & t \in [0, T_s] \\ \phi_m + \frac{2\phi_m}{T_s \omega} & t \in [T_s, +\infty) \end{cases} \quad (11)$$

当变压器磁通大于临界饱和点时,会产生励磁

$$\phi(t) = C e^{-\frac{R}{L}(t-T_s)} + e^{-\frac{R}{L}t} \int \frac{U_m}{N_1} e^{j(\omega t + \alpha)} e^{\frac{R}{L}t} dt = C e^{-\frac{R}{L}(t-T_s)} + \frac{U_m}{N_1} \frac{e^{j(\omega t + \alpha)}}{j\omega + \frac{R}{L}} \quad (5)$$

将式(5)用稳态磁通 $\phi_m = \frac{U_m}{N_1 \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$ 表示为

$$\phi(t) = C e^{-\frac{R}{L}(t-T_s)} + \phi_m \frac{\left(\frac{R}{L} - j\omega\right) e^{j(\omega t + \alpha)}}{\sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} \quad (6)$$

式(6)中, C 为常数,可由 $t = T_s$ 时刻的初始条件计算。

当 $t < T_s$ 时

$$\phi(t) = D e^{-\frac{R}{L}t} + e^{-\frac{R}{L}t} \int \frac{U_m}{N_1 T_s} t e^{j(\omega t + \alpha)} e^{\frac{R}{L}t} dt = D e^{-\frac{R}{L}t} + \phi_m \frac{\left(\frac{R}{L} - j\omega\right) e^{j(\omega t + \alpha)}}{T_s \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} \left(t - \frac{1}{j\omega + \frac{R}{L}} \right) \quad (7)$$

由初始条件 $\phi(t=0) = \phi_r$ 得出 D

$$D = \phi_r + \phi_m \frac{\left(\frac{R}{L} - j\omega\right) e^{j\alpha}}{T_s \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} \frac{1}{j\omega + \frac{R}{L}} \quad (8)$$

联立式(7)、(8),可得

$$C = \phi_r e^{-\frac{R}{L}T_s} + \phi_m \frac{\left(\frac{R}{L} - j\omega\right) e^{j\alpha}}{T_s \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} \frac{1}{j\omega + \frac{R}{L}} (e^{-\frac{R}{L}T_s} - e^{j\omega T_s}) \quad (9)$$

所以,电压建立时间各时间段内的三相磁通为

涌流,以1.2倍额定磁通作为饱和磁通考虑,则

$$\phi_m + \frac{2\phi_m}{T_s \omega} < 1.2\phi_m \quad (12)$$

影响储能变流器输出电压建立时间 T_s 的合理选择是抑制变压器励磁涌流的关键。

2 含构网型和跟网型储能变流器的微电网带载柔性黑启动控制策略

2.1 微电网黑启动过程构网型和跟网型变流器的协同控制

传统的跟网型变流器,依靠锁相环实现并网,

$$E_{\text{ref}} = \begin{cases} \frac{2E_0}{\pi} \arctan(kt) & t \leq t_1 \\ \frac{2E_0 k}{\pi [1 + (kt_1)^2]} t + 0.44E_0 & t_1 < t \leq t_2 \\ E_0 & t > t_2 \end{cases} \quad (17)$$

不同时间系数 k 下构网型变流器在建立系统电压时的参考值 E_{ref} 与时间 t 的关系见图5。

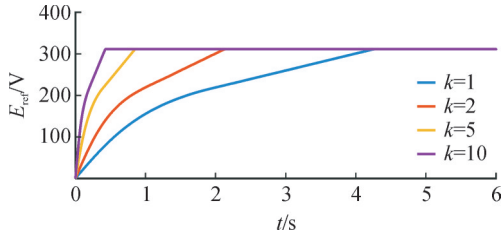


图5 时间系数 k 对输出电势幅值参考值的影响

Fig. 5 Influence of time coefficient k on reference value of output potential amplitude

2.3 含构网型和跟网型储能变流器的微电网柔性黑启动方案设计

基于构网型变流器带载柔性黑启动方案见图6, 概况如下:

- 1) 为保证重要负载优先恢复供电, 在微电网收到黑启动指令时, 闭合重要负载开关, 构网型变流器作为主电源启动, 建立系统电压。
- 2) 从电源依次并联接入, 协同工作。
- 3) 从电源完成并联后, 系统供电能力得到提升, 根据系统供电能力, 逐渐增加其他负载, 扩大系统恢复范围。

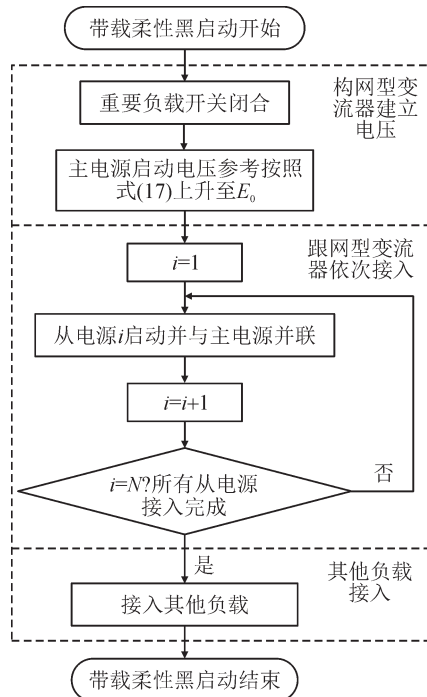


图6 带载柔性黑启动方案

Fig. 6 Flexible black-start scheme with load

3 仿真实验

为了验证所提构网型变流器支撑黑启动方案和变压器励磁涌流抑制方法的有效性, 在MATLAB/Simulink 搭建仿真模型, 含1台构网型储能变流器、2台跟网型储能变流器, 仿真参数见表1, 假定构网型变流器与跟网型变流器容量比为2:1。

表1 构网型变流器的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of grid-forming converter

主电路参数	数值	控制参数	数值
直流源电压/V	700	转动惯量	0.5
母线电压/V	311	阻尼系数	20
滤波电感/mH	2	有功给定/kW	100
滤波电容/mF	5	时间系数	5

初始时刻, 系统处于全黑状态。 $t=0.5$ s时, 启动VSG控制的主电源, 同时闭合重要负载开关。

黑启动过程励磁涌流抑制效果对比见图7。由图7(a)可知, 未加入励磁涌流抑制控制的储能变流器输出电压为阶跃信号, 系统电压过快建立从而导致变压器铁心饱和而出现励磁涌流; 由图7(b)可知, 增加了励磁涌流控制后, 逐步建立了微网电压, 变压器励磁涌流得到有效抑制。

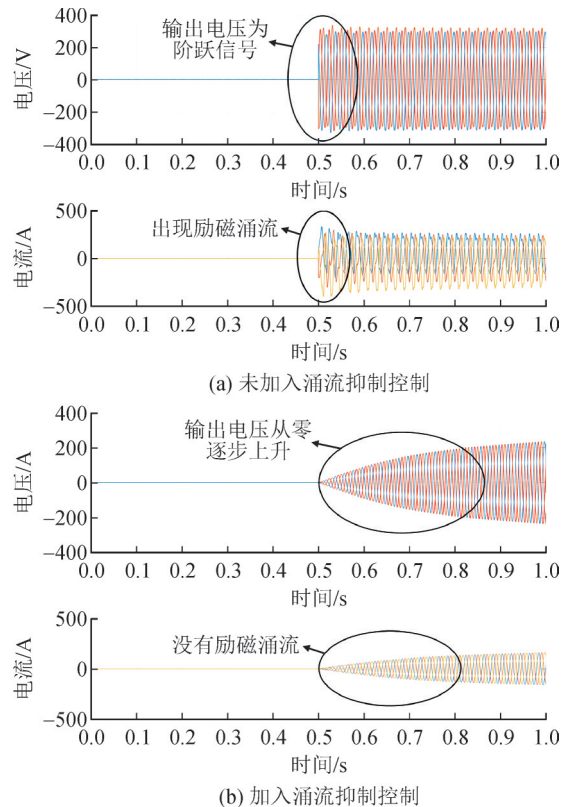


图7 黑启动过程励磁涌流抑制效果对比

Fig. 7 Excitation inrush current suppression effect comparison during black start

$t=3\text{ s}$ 和 $t=3.5\text{ s}$ 时投入从电源; $t=4\text{ s}$ 时投入其他负载。黑启动过程的交流母线电压电流波形及主从电源有功输出见图8、9。

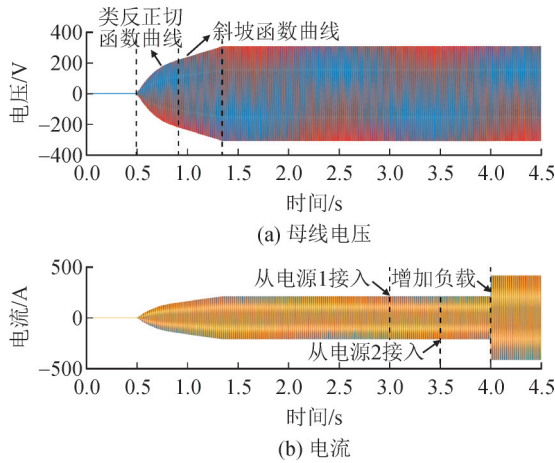


图8 黑启动过程的交流母线电压和电流波形

Fig. 8 AC bus voltage and current waveform of the black start process

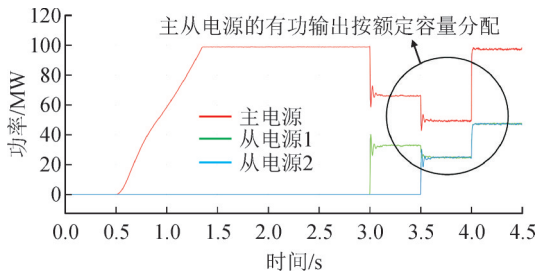


图9 黑启动过程主从电源的有功输出

Fig. 9 Active power output of master and slave power during black start

由图7-9可知,文中提出的采用构网型储能变流器支撑柔性黑启动的控制策略,在黑启动过程中微网能够快速有效建立稳定电压,当跟网型变流器接入后可以实现功率稳定运行。

4 结语

文中针对含构网型和跟网型变流器的微电网黑启动问题开展研究。首先,分析了以新能源为主的典型微电网系统的黑启动过程电压支撑问题及变压器励磁涌流产生机理,得到电压建立时间的整定范围;其次提出了一种加入涌流抑制控制算法的改进VSG控制策略,并设计了基于构网型储能变流器的串行恢复的带载柔性黑启动方案;最后,开展了仿真分析,结果证明了所提策略的有效性。

参考文献:

[1] 许洁翊,刘威,刘树,等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594.

XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.

[2] 王华昕,刘美娜,褚启迪. 计及长线路参数扰动的新能源黑启动工程分析[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 99-107.

WANG Huaxin, LIU Meina, CHU Qidi. Analysis of new energy black start-up engineering considering parameter perturbation of long line[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 99-107.

[3] 周杰,皇金锋,黄红杰,等. T型三电平储能变流器直流母线电压改进自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 81-91.

ZHOU Jie, HUANG Jinfeng, HUANG Hongjie, et al. DC bus voltage improved active disturbance rejection control of a T-type three-level energy storage converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 81-91.

[4] 陈祺炜,吴熙,李海峰,等. 孤网全黑状态的恢复网架和分区优化算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 74-78.

CHEN Qiwei, WU Xi, LI Haifeng, et al. Recovery network and partition optimization algorithm of isolated networks under the full black state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 74-78.

[5] 朱凌燕,潘再平,许国东. 采用改进虚拟同步控制的双馈型风电场黑启动方案[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 162-167.

ZHU Lingyan, PAN Zaiping, XU Guodong. Black start scheme of dfig-based wind farm adopting improved virtual synchronous control[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(4): 162-167.

[6] 付华,刘公权,齐晨飞,等. 计及微电网黑启动的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 59-68.

FU Hua, LIU Gongquan, QI Chenfei, et al. Frequency regulation strategy of a virtual synchronous generator-based microgrid considering the black start process[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 59-68.

[7] 朱利锋,吴彬锋,宋恩亮,等. 主从结构下储能变流器并联运行建模与附加控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 54-63.

ZHU Lifeng, WU Binfeng, SONG Enliang, et al. Modelling and additional control for parallel operation of power converters in ESS under master-slave scheme[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(7): 54-63.

[8] PEÑA ASENSIO A, ARNALTES GÓMEZ S, RODRIGUEZ-AMENEDO J L. Black-start capability of PV power plants through a grid-forming control based on reactive power synchronization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(146): 108730.

[9] KONG Fei, LI Jie, LIAO Mengjun, et al. Research on transformer saturation mechanism and restraining measures in VSC-HVDC black start process[C]//2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Guangzhou: IEEE, 2022: 267-270.

[10] 黄景光,赵娇娇,林湘宁,等. 基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 210-215.

HUANG Jingguang, ZHAO Jiaojiao, LIN Xiangning, et al. Research on inrush current suppression technology of transformer based on SPWM[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 210-215.

- [11] 王伟, 魏菊芳, 方琼, 等. 变压器3种励磁涌流抑制措施效果比较[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 101-107.
WANG Wei, WEI Jufang, FANG Qiong, et al. Comparison of three kinds of magnetizing inrush current suppression measures for transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 101-107.
- [12] 刘涛, 颜廷武, 卜新良, 等. 基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 109-114.
LIU Tao, YAN Tingwu, BU Xinliang, et al. Research on phase-controlled technology of inrush current based on closing resistance [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 109-114.
- [13] 崔红芬, 王德顺, 杨波, 等. 支撑电网黑启动的风光储新能源电站协调控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 50-57.
CUI Hongfen, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Coordinated control strategy of wind-solar-storage power station supporting black start of power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 50-57.
- [14] 杨荣, 赵兴勇, 赵钰彬, 等. 一种适用于微电网黑启动的改进微源电压控制策略[J]. 可再生能源, 2019, 37(10): 1504-1510.
YANG Rong, ZHAO Xingyong, ZHAO Yubin, et al. An improved micro-source voltage control strategy for the micro-grid black-start [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(10): 1504-1510.
- [15] 陈星宇. 基于最小二乘矩阵束的励磁涌流识别方案[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 44-49.
CHEN Xingyu. Identification method for inrush current based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 44-49.
- [16] 夏家辉, 方园, 刘卜瑞, 等. 基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 184-190.
XIA Jiahui, FANG Yuan, LIU Burui, et al. The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 184-190.
- [17] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [18] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(s1): 83-92.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, WANG Haixin, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind farm-storage system based on virtual synchronous generator technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(s1): 83-92.
- [19] 王浩, 郝正航, 陈卓, 等. 基于虚拟同步发电机的储能逆变器控制策略及无缝切换技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3594-3600.
WANG Hao, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Control strategy and seamless switching technology of energy storage inverter based on virtual synchronous generator[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3594-3600.
- [20] ELLIOTT F, ABHISHEK B, ULRICH M, et al. Investigating multi-microgrid black start methods using grid-forming inverters[Z]. USA: IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies North America, 2023.
- [21] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟同步发电机的孤立微网黑启动方案研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2857-2864.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Research of black-start schemes of isolated microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2857-2864.
- [22] 贾本岩, 白兆玉, 井永腾, 等. 计及励磁涌流累积下变压器绕组受力分析[J]. 变压器, 2025, 62(4): 33-40.
JIA Benyan, BAI Zhaoyu, JING Yongteng, et al. Force analysis of transformer windings considering the accumulation of excitation inrush current [J]. Transformer, 2025, 62(4): 33-40.
- [23] 黄晨宏, 付斌, 郑真, 等. 基于数据-模型驱动的主动配电网预想故障筛选排序方法[J]. 变压器, 2025, 62(7): 26-36.
HUANG Chenhong, FU Bin, ZHENG Zhen, et al. Active distribution network expected fault screening and ranking based on data-model driven [J]. Transformer, 2025, 62(7): 26-36.
- [24] 孙静, 李福旺, 陈健, 等. 基于智能算法的构网型储能与VSG控制结合的电压无功协调控制系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33(22): 20-24.
SUN Jing, LI Fawang, CHEN Jian, et al. Voltage reactive power coordinated control system based on intelligent algorithm for grid type energy storage combined with VSG control[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(22): 20-24.
- [25] 朱煜昆, 贾轩, 潘霄汉, 等. 计及多区域直驱风场经VSG控制的MMC送出系统小信号稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 11-23.
ZHU Yukun, JIA Xuan, PAN Xiaohan, et al. Small signal stability analysis of multi-region direct-drive wind farms connected via a VSG-controlled MMC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 11-23.

张亮(1982—), 男, 教授, 研究方向为电力储能、电能质量、交流混合配电网和海上风电场直流汇聚等(E-mail: zhldream@126.com)。

方舟(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制等(通信作者)(E-mail: fz843067334@126.com)。