

一种新能源经柔直并网的故障穿越策略研究

肖立军¹, 黄辉², 贺曼², 赵江峰², 崔成成², 孙桂锴²

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 当交流系统发生故障时, 新能源经柔直送出系统应具备故障穿越的能力, 以便于实现新能源柔直送出系统安全可靠运行。为了解决这一问题, 提出了一种基于故障电流限幅的故障穿越控制策略。首先, 介绍新能源经柔直并网示范工程概况。其次, 详细介绍了包含无功-电压下垂控制器、有功-频率下垂控制器、限流控制器等环节的故障穿越控制策略。然后, 在 PSCAD/EMTDC 环境下, 搭建示范工程模型, 并对新能源端换流站 VSC₂ 的故障穿越策略进行仿真验证。仿真结果表明发生单相接地故障后, 站控及阀控保护均未动作, 故障对 VSC₁ 站影响较小。虽然故障期间 VSC₂ 站的传输功率急剧下降, 但在故障清除后功率、直流电压、交流电压都逐渐恢复到正常运行状态, 最后与湖北某新能源经柔直送出示范工程现场故障试验数据进行对比, 验证了本文所提出控制策略的有效性。

关键词: 柔性直流输电; 新能源; 故障穿越; 下垂控制; 示范工程

Research on Fault Ride-through Strategy of New Energy Through Flexible Direct Current Grid Connection

XIAO Lijun¹, HUANG Hui², HE Man², ZHAO Jiangfeng², CUI Chengcheng², SUN Guikai²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519000, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In case of fault in AC system, the new energy transmission system through flexible direct current shall possess the fault ride through capability so to achieve safe and reliable operation of new energy flexible direct current transmission system. For solving this problem, a kind of fault ride through control strategy based on fault current limitation is proposed. Firstly, an overview of the pilot project of new energy through flexible direct current grid connection is introduced. Then, the fault ride through control strategy including such chains as reactive power-voltage sag controller, active-frequency sag controller and current limiting controller is introduced in detail. After that, the pilot project model is set up under PSCAD/EMTDC environment and the fault ride through strategy of the new energy converter station VSC₂ is simulated and verified. The simulation result shows that after the single phase ground fault, neither the station control nor valve control protection operates and the influence of the fault on VSC₁ station is less. Although the transmission power of VSC₂ station drops dramatically during the fault period, yet after the clearance of the fault the DC voltage and AC voltage can be able to recover gradually to the normal operation condition. Finally, the effectiveness of the control strategy proposed in this paper is verified by way of comparing with the site fault test data of new energy transmission through flexible direct current in Hubei Province.

Keywords: flexible direct current transmission; new energy; fault ride-through; sag control; pilot project

0 引言

随着双碳目标的提出, 未来大力开发风电、光伏等新能源成为必然, 特别是海上风电经柔直送出

所具有的独特优势^[1-4]。而针对实际工程应用, 需要对风电通过柔性直流方式并网后系统的故障穿越能力进行研究^[5-10]。在交流系统发生单相接地等短路故障后, 电网电压会有暂态跌落过程, 从而可能

收稿日期: 2023-04-05

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20198201)。

会造成故障期间两侧系统的有功传输不平衡,继而因功率盈余等问题引起直流过电压。目前,国内外不少学者专门针对风电场经柔性直流输电送出系统的故障穿越策略开展研究^[11-20]。归纳起来,文献中所提出的设计方案主要包括3种:增大柔直流换流器的容量;增加额外耗能装置,主要目的是通过chopper等装置消耗故障期间多余的功率;各种诸如故障期间向风机下发使其迅速降低其自身输出功率的指令等控制策略。而在第一种增大柔直流换流器容量的方案中,可以通过增大直流侧电容以及网侧换流器的容量来达到故障穿越过程可以承受更大的暂态电流^[21-27]。文献[28]首先分析了系统中风机实际的运行特性,并结合电网规范要求,设计了一种单相接地故障穿越策略。但文中研究对象是基于一种九开关换流器,该拓扑结构的功率传输容量受限于器件本身及其直接串并联的均压、均流问题。文献[29]提出了一种新型的换流器拓扑结构,通过仿真表明这种拓扑可以提高系统故障穿越能力。但文中研究对象是半桥和全桥子模块构成的混合臂双极MMC,成本高,控制复杂。文献[30]提出了一种全桥MMC换流器的新型低电压穿越控制策略,文中仿真验证了其可行性。但该策略不足之处需要在送端额外增加DC chopper。文献[31]依据故障期间直流电压是否过压,提出降低风机侧的交流电压幅值的方法,从而达到减少风电场输出功率的目的,但无法避免电压在故障期间波动造成影响。文献[32]提出在故障期间网侧换流站优先控制无功电流的方法,文中在故障期间投入直流卸荷电路,将多余的能量耗散掉,同样存在需要额外附加硬件设备问题。考虑到故障期间增加交流母线处电压的支撑能力,文献[33-34]提出额外配置无功补偿装置的方法,该方法缺点无疑需要在换流站的出口处额外增加设备。文献[35]针对风电经柔直输电交、直流并列运行场景,提出了一种双馈风机与柔直系统的无功功率协调控制方法,文中仿真结果显示在交流故障恢复过程中电压幅值波动更小。综合上述文献中现有研究现状要么基于新型换流器结构而存在传输容量限制,要么需要额外增加设备而不够经济。而目前无论从容量还是经济性方面考虑,基于半桥MMC的拓扑结构是新能源经柔直并网的主流拓扑。因此,本文在不增加额外设备并且保证传输容量前提下从控制策略入手解决故障穿越问题就具备综合优势。

本文针对新能源经柔直并网系统,提出一种基于故障电流限幅的故障穿越控制方法。设计了完整

故障穿越控制逻辑框图,分别包含电压下垂控制器、频率下垂控制器、限流控制器等部分。在PSCAD/EMTDC仿真平台中进行仿真验证并在示范工程现场开展现场试验。仿真和现场试验结果都表明单相接地故障发生后,VSC₁站虽然功率会有轻微波动,但整体影响较小。而VSC₂有功功率传输下降较多,但在故障清除后两侧系统功率都能逐渐顺利恢复。

1 新能源经柔直并网示范工程网架结构

1.1 示范工程概况

湖北某100%新能源经柔直送出示范工程接线见图1,换流器VSC₁与110 kV母线(图中所示4号母线)相连,换流器VSC₂与110 kV母线(1号母线)相连,实现互联母线间的柔性调控;1台2 MW直挂储能直流变换器DC/DC₁与站内储能相连,平抑新能源发电的功率波动,参与高比例可再生电网的调压、调峰,可作为电网的启动电源;2 MW直流变压器DC/DC₂产生±375 V直流母线,实现电动汽车、储能、直流用电负荷等元素的灵活接入。

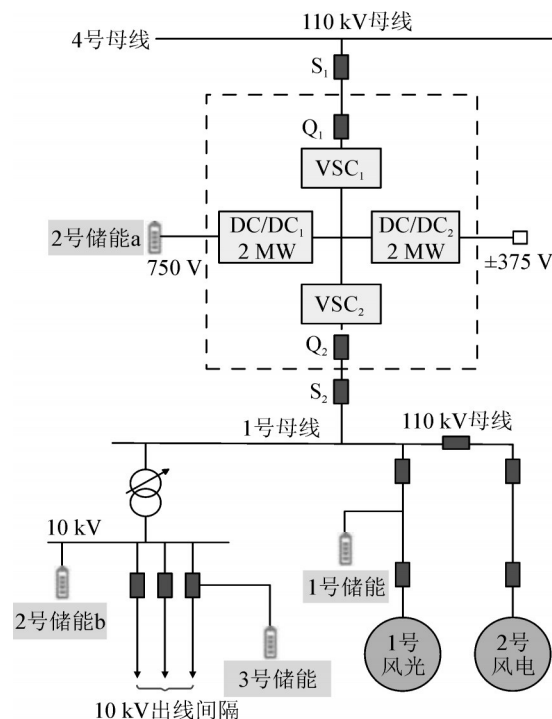


图1 新能源经柔直并网示范工程接线示意图

Fig. 1 Wiring schematic diagram of new energy system through direct current grid connection pilot project

1.2 控制策略

网侧换流器VSC₁为定直流电压控制,换流器VSC₂采用VF下垂控制。

1)定直流电压控制。如图2所示,根据直流电压参考值 u_{dc_ref} 控制注入到直流系统的有功功率,保

持直流侧电容器上的电压 u_{dc} 为额定值,图中 i_d 、 i_q 分别为有功、无功电流实际值; u_d 、 u_q 分别为有功、无功电流实际值,带“*”分别为各电气量的参考值; ω 、 L 分别为角频率、电感。

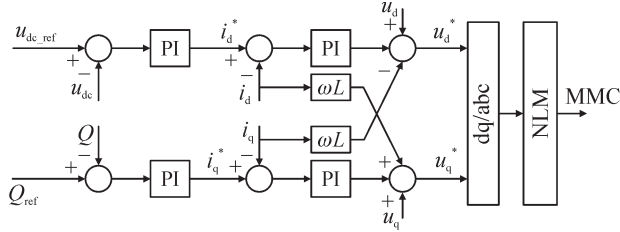


图2 定直流电压控制框图

Fig. 2 Constant DC voltage control block diagram

2)VF下垂控制。通过换流器与风机各自的有功功率-频率下垂系数的比值,实现有功功率按比例分配。通过换流器与风机各自的无功功率-电压下垂系数的比值,实现无功功率按比例分配。VF下垂控制框图见图3,图3中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率、无功功率参考值; K_p 、 K_q 分别为常系数; u_{sdref} 、 u_{sqref} 分别为 d 、 q 轴电压参考值; f_{sqref} 为频率参考值,取值 50 Hz。

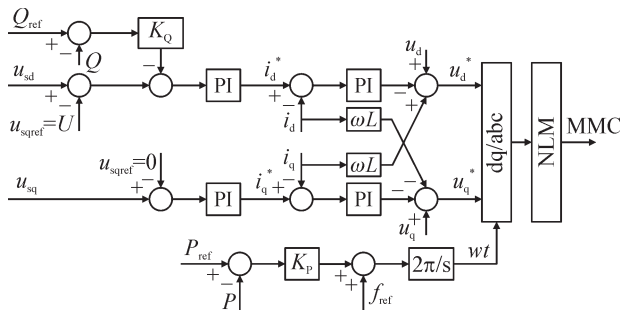


图3 VF下垂控制框图

Fig. 3 VF sag control block diagram

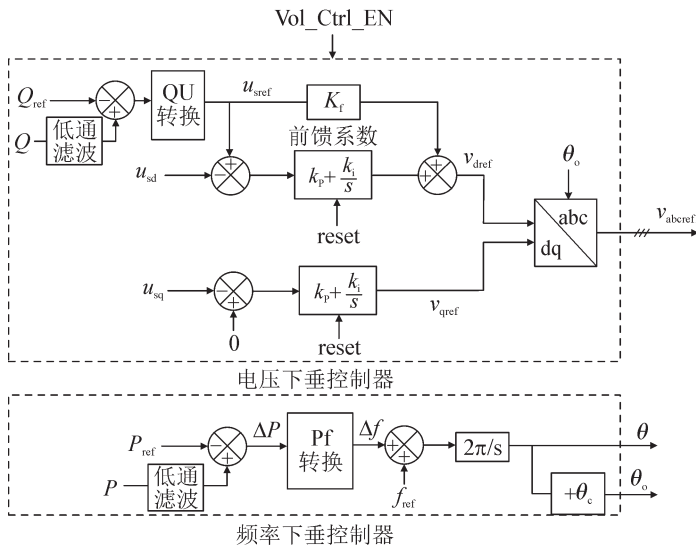


图5 VSC₂故障穿越控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of VSC₂ fault ride control strategy

3)储能变压器电流控制模式。Buck-boost 电路通过改变开关器件占空比,可以改变其输入电流的大小。当占空比较大时,其等效输出电压较小,高压侧母线电容会放电,电流从高压侧流出,相当于能量由低压侧向高压侧传递;当占空比较小时,其等效输出电压大小,高压侧母线电容会充电,电流从高压侧流入,相当于能量自高压侧流向低压侧。功率模块输入电流大小与占空比具有正相关性,因此可以通过 PI 控制器进行闭环控制。控制算法见图4。图中 I_{dc_ref} 、 I_{dc_fbl} 分别表示电流参考值和实际值。

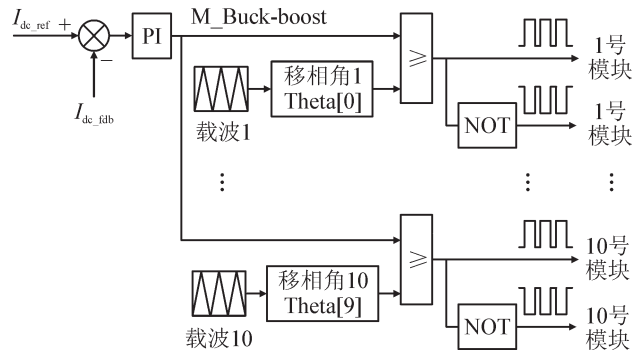
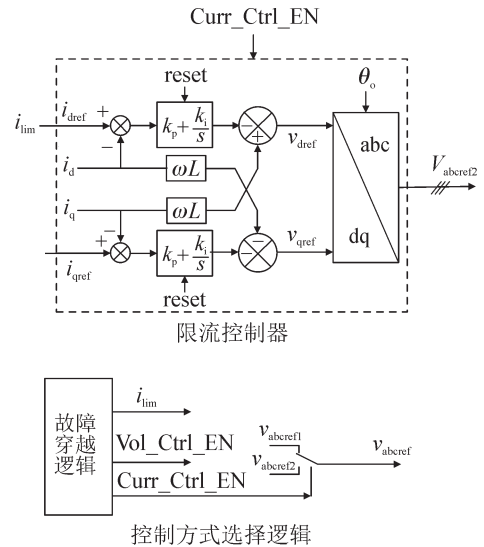


图4 DC/DC 电流控制算法

Fig. 4 Control algorithm of DC/DC current

2 故障穿越控制策略

VSC₂ 故障穿越整体控制策略逻辑框图见图5,包含无功-电压下垂控制器、有功-频率下垂控制器、限流控制器、控制方式选择等部分。图中: Vol_Ctrl_EN、Curr_Ctrl_EN 分别为电压下垂控制器使能、限流控制器使能; K_f 、 K_p 为常系数, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为 d 、 q 轴电压实际值; P 、 P_{ref} 、 Q 、 Q_{ref} 分别为有功功率、无功功率实际值及其各自的参考值; i_{lim} 为电流限流幅值指令; v_{dref} 、 v_{qref} 为 d 、 q 轴电压参考值; θ 、 θ_0 为相角; u_{sref} 为无功-电压下垂控制生成参考电压。



2.1 电压下垂控制器

图 5 中所示电压下垂控制器框图中有功、无功低通滤波采用一阶滤波,一阶滤波 $(1 - e^{-T/\tau})$ 的离散公式为

$$y(n) = x(n) \frac{T_s}{T_s + \tau} + y(n-1) \frac{\tau}{T_s + \tau} \tag{1}$$

式中: $y(n)$ 、 $y(n-1)$ 分别为输出当前时刻和前一刻的输出; $x(n)$ 为当前时刻的输入; T_s 为采样周期; τ 为惯性时间常数。

框图中 QU 转换部分曲线见图 6, K_{QU} 为常数:

- 1)当功率偏差 ΔQ 在 $(-Q_d, Q_d)$ 范围时, ΔU 为 0,电压恒定在交流电压参考值;
- 2)当功率偏差 ΔQ 大于 Q_d 时, $\Delta U = K_{QU}^*(\Delta Q - Q_d)$;
- 3)当功率偏差 ΔQ 小于 $-Q_d$ 时, $\Delta U = K_{QU}^*(\Delta Q + Q_d)$ 。

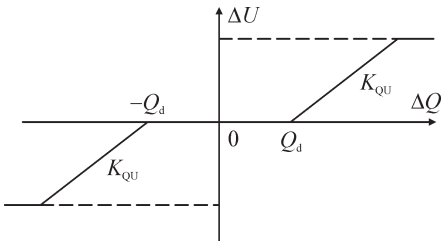


图 6 QU 转换框图
Fig. 6 QU conversion block diagram

2.2 频率下垂控制器

图 5 中频率下垂控制器的 Pf 转换部分曲线见图 7, K_{pf} 为常数。

- 1)当功率偏差 ΔP 在 $(-P_d, P_d)$ 范围时, Δf 为 0,频率恒定在 50 Hz;

- 2)当功率偏差 ΔP 大于 P_d 时, $\Delta f = K_{pf}^*(\Delta P - P_d)$;
- 3)当功率偏差 ΔP 小于 $-P_d$ 时, $\Delta f = K_{pf}^*(\Delta P + P_d)$ 。

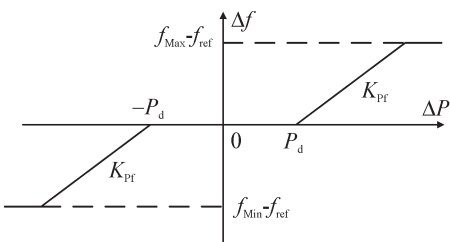


图 7 Pf 转换框图
Fig. 7 Pf conversion block diagram

2.3 故障穿越和控制方式选择逻辑

图 5 中故障穿越和控制方式选择逻辑如下:

- 1)两端 VSC 换流站解锁 1 s 后(即电压稳定后)启动交流低电压故障判断。
- 2)低电压故障判据及处理逻辑如下:

①启动判据: $0.2 \text{ p.u.} < E_s < 0.5 \text{ p.u.}$, 连判 1 ms, E_s 为交流电压瞬时幅值;

②恢复判据: $E_s > 0.7 \text{ p.u.}$, 连判 10 ms;

③电流限幅指令: $i_{lim} = 0.8 \text{ p.u.}$ 。
- 3)低电压故障下,通过 Curr_Ctrl_EN 使能限流控制器,取消电压下垂控制器使能 Vol_Ctrl_EN,其它情况下使能电压下垂控制器,取消限流控制器使能。

3 PSCAD 仿真验证

为了验证本文所提出控制策略的有效性,在 PSCAD/EMTDC 软件平台搭建示范工程模型,开展换流站 VSC₂故障穿越仿真验证。工程参数列表见表 1。

表 1 VSC₁/VSC₂换流器主要技术参数与性能指标
Table 1 Main technical parameters and performance data of VSC₁/VSC₂

参数	指标	参数	指标
主接线	对称单极系统	直流极对地电压/kV	±20
拓扑结构	半桥 MMC	交流系统额定线电压/kV	20
冷却方式	闭式循环水-风冷却	额定桥臂电流/A	DC:517+AC:953
额定频率/Hz	50	子模块数量/个	28
额定有功功率/MW	60	子模块电容/mF	10
无功功率范围/Mvar	-20~20	子模块电压/kV	1.6

VSC₂ 额定有功功率 60 MW,无功功率 0 Mvar, VSC₂ 侧另接入 5 MW 的无源负荷。VSC₁ 采用定直流电压控制,VSC₂ 在正常运行状态采用 VF 下垂控制,故障状态采用图 5 所示控制策略。在 $t = 1.5 \text{ s}$ 时刻 VSC₂ 交流侧施加单相接地故障,故障持续时间 100 ms。

- 1)VSC₁ 和 VSC₂ 跳闸闭锁状态

VSC₁ 和 VSC₂ 跳闸闭锁状态见图 8。图中 Trip_Self、Trip_other、Trip_VBC、Trip_PCR、分别为本站、对站、VBC、本站站控保护的跳闸情况。由 VSC₁ 和 VSC₂ 跳闸闭锁状态可以看出,单相接地故障工况下 VSC₁ 和 VSC₂ 均无跳闸,故障顺利穿越。

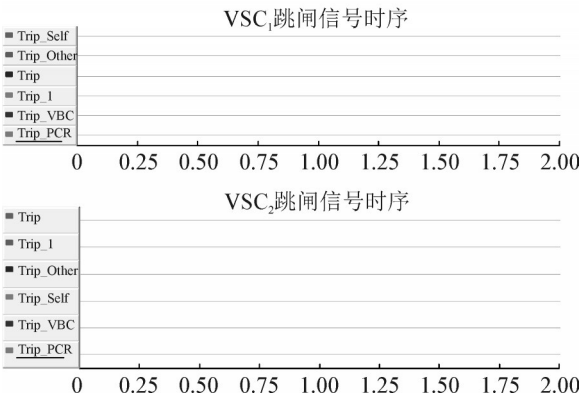


图 8 VSC₁和 VSC₂跳闸闭锁状态
Fig. 8 Trip lock status of VSC₁ and VSC₂

2)换流站 VSC₁ 相关波形3)换流站 VSC₂ 相关波形

VSC₁ 波形见图 9。由 VSC₁ 站波形图 9(a)~(d) 可以看出, $t=1.5\text{ s}$ 时刻 VSC₂ 站交流网侧发生单相接地短路故障后, VSC₁ 站的网侧电压、阀侧电压都无明显变化, 而网侧电流、阀侧电流有稍微增加, 在故障切除后, 又恢复到故障前状态。从图 9(e) 有功功率曲线看出, 故障期间虽然有有功功率会有波动, 但随着故障清除, 功率恢复正常。

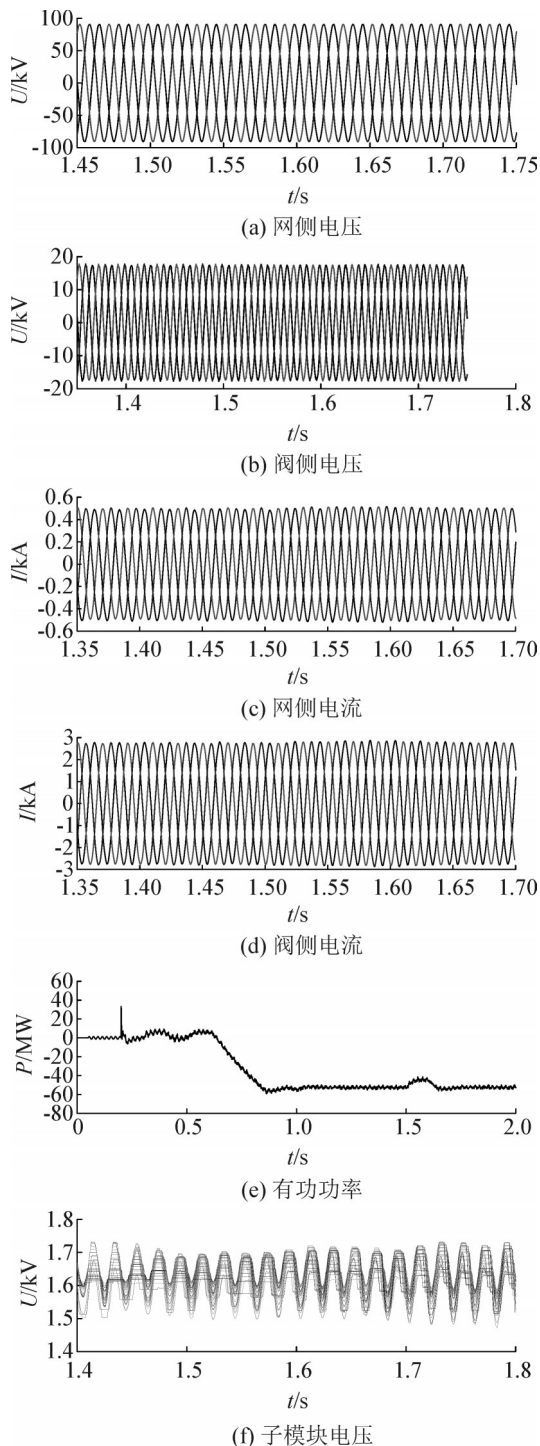


图9 VSC₁ 波形
Fig. 9 VSC₁ waveform

VSC₂ 波形见图 10。由 VSC₂ 站波形图 10(a)~(b) 可以看出, 在 VSC₂ 站发生单相接地短路故障后, 网侧电压、阀侧电压明显不再对称, 图 10(c) 中故障相的电流 (图中 i_a 所示 A 相电流) 被限制较低水平, 未出现过流。而图 10(e) 中有功功率因电压和电流的变化而出现较大幅值的下降, 虽然在故障期间传输能力下降, 但随着故障的清除, 功率传输逐渐恢复正常。

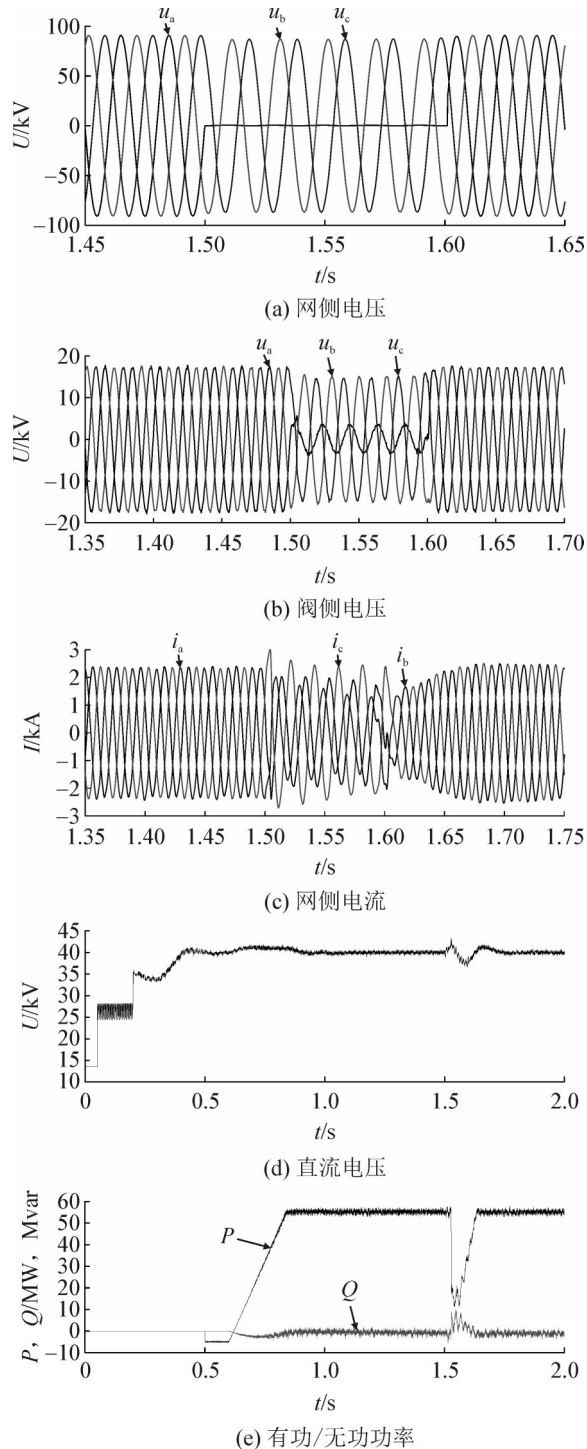


图10 VSC₂ 波形
Fig. 10 VSC₂ waveform

4 工程现场试验验证

单相接地故障现场试验波形见图 11。

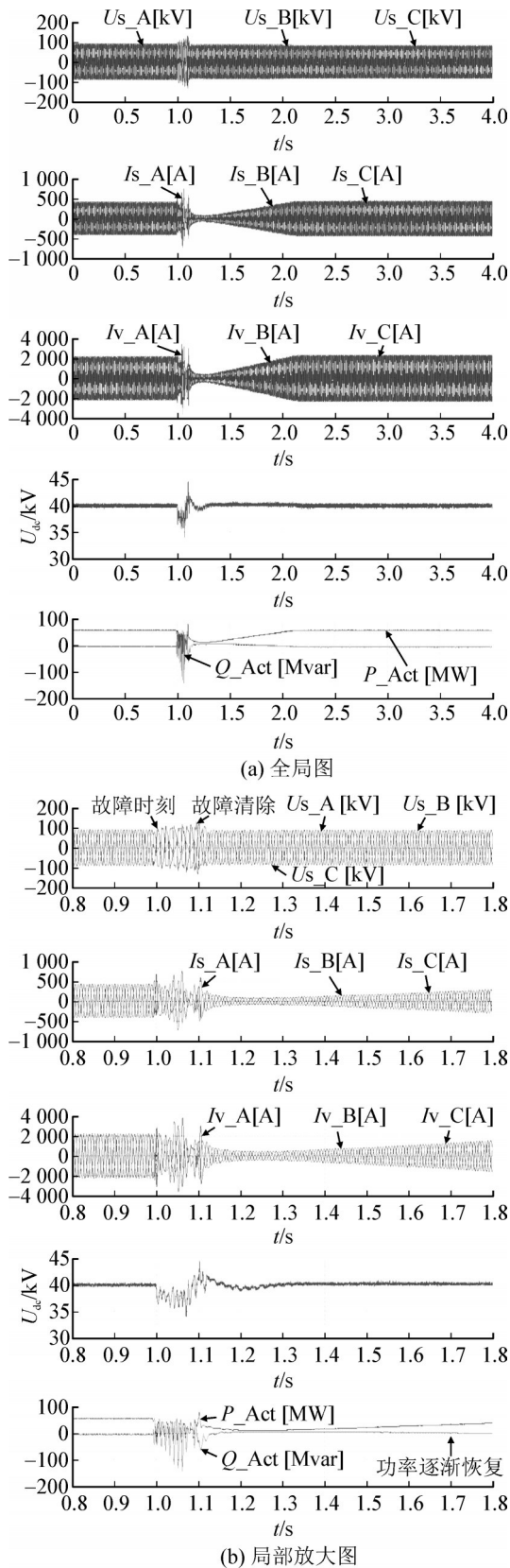


图 11 单相接地故障现场试验波形

Fig. 11 Site test waveform of single phase ground fault

上图所示为 VSC₂ 交流侧系统单相接地故障且故障持续时间 100 ms 工况下的现场试验录波波形。由功率波形 P_{Act} 和 Q_{Act} 看出,类似于前文仿真结果,故障穿越过程中虽然也存在功率波动现象,但在故障清除后功率逐渐恢复,网侧电压 U_s 、交/直流电流也都能够恢复正常。现场试验和仿真结果都验证了本文所提出控制策略的有效性。

5 结语

本文研究新能源经柔直并网系统的故障穿越控制方法。设计了包含电压下垂控制器、频率下垂控制器、限流控制器等环节的完整故障穿越控制策略。然后,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建示范工程模型并开展故障穿越策略仿真验证并在示范工程现场开展该策略的验证试验。仿真和现场试验结果表明单相接地故障发生后,两站站控及阀控保护均未动作,故障对 VSC₁ 站影响很小,虽然故障期间会造成 VSC₂ 传输功率的明显降低,但在故障清除后系统逐渐过渡恢复到正常运行状态。

参考文献

[1] 张红颖,陈宁,刘刚,等. 考虑多场景参数灵敏度的光伏有功优化方法[J]. 西安工程大学学报,2022,36(5):102-110.

ZHANG Hongying, CHEN Ning, LIU Gang, et al. Photovoltaic active power parameters optimization method considering multi-scenario and parameter sensitivity[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 102-110.

[2] 李彬,杜丁香,王兴国,等. 基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 122-129.

LI Bin, DU Dingxiang, WANG Xingguo, et al. AC submarine cable pilot protection for offshore wind power through MMC-HVDC system based on mean absolute error[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 122-129.

[3] 李娟,王鹏,李方媛,等. 改善风火打捆系统暂态稳定的限流式 SSSC 控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 118-127.

LI Juan, WANG Peng, LI Fangyuan, et al. Current-limiting SSSC control strategy for improving transient stability of wind-thermal binding system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 118-127.

[4] 罗伟,谢超,陈培龙. 柔直系统直流电压测量值偏高影响分析及对策研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 133-139.

LUO Wei, XIE Chao, CHEN Peilong. Analysis of the influence factors of high DC voltage measurement value in flexible HVDC system and their countermeasures[J]. High Volt-

- age Apparatus, 2022, 58(3): 133-139.
- [5] 江晶晶, 黄潇怡, 陈婧. 含风电场电力系统的静态电压稳定性预警系统[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 92-97.
JIANG Jingjing, HUANG Xiaoyi, CHEN Jing. Static voltage stability early warning system of the power system containing wind farms[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 92-97.
- [6] 葛维春, 张诗钊, 崔岱, 等. 海上风电送出与就地消纳技术差异综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 23-32.
GE Weichun, ZHANG Shitan, CUI Dai, et al. Summary of differences between offshore wind power transmission and local consumption technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 23-32.
- [7] 李俊杰, 石强, 胡群勇, 等. 基于EEMD-SVR模型的风电功率预测[J]. 电器与能效管理技术, 2020(11): 22-28.
LI Junjie, SHI Qiang, HU Qunyong, et al. Wind power prediction based on EEMD-SVR model[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11): 22-28.
- [8] 赵熙临, 周红玉, 付波, 等. 考虑风速随机性的风电-抽水蓄能微网一次调频方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 111-119.
ZHAO Xilin, ZHOU Hongyu, FU Bo, et al. The primary frequency regulation method of wind power and pumped storage in the microgrid considering random wind speed[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 111-119.
- [9] 蒋成成, 陆建宇, 魏云冰, 等. 基于量化风电场限功率的电力系统旋转备用优化研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 18-24.
JIANG Chengcheng, LU Jianyu, WEI Yunbing, et al. Spinning reserve optimization in power system under power-limited of the wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 18-24.
- [10] 朱建军, 孙阳, 常鹏, 等. 基于等效惯量辨识的光伏调频控制优化策略[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(5): 111-118.
ZHU Jianjun, SUN Yang, CHANG Peng, et al. Photovoltaic frequency regulation control optimization strategy based on equivalent inertia identification[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 111-118.
- [11] 牛乐乐. 大规模风电经柔直并网的送端交流故障穿越技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [12] 秦善萌. 新能源孤岛经柔直电网送出系统运行机理及参数设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [13] 杨仁炘, 张琛, 蔡旭, 等. 海上风电-柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4823-4834.
YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4823-4834.
- [14] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 111-119.
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 111-119.
- [15] 朱博, 徐攀腾, 张惠雯, 等. 柔直与风电机组协调故障穿越控制策略设计[J]. 电力电子技术, 2022, 56(4): 76-79.
ZHU Bo, XU Panteng, ZHANG Huiwen, et al. Design of fault-ride through strategy based on coordination between flexible DC and wind turbine unit[J]. Power Electronics, 2022, 56(4): 76-79.
- [16] 徐亚男. 海上风电经柔直联网系统频率支撑控制及故障穿越策略研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2023.
- [17] 袁艺嘉, 孔明, 孙宝宝, 等. 海上换流站直流侧暂态过压应力抑制策略有效性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 602-614.
YUAN Yijia, KONG Ming, SUN Baobao, et al. Analysis on the effectiveness of suppression strategies for transient overvoltage stress on the DC side of offshore converter station[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 602-614.
- [18] 王欣铎. 风电经柔直组网系统受端交流故障穿越及直流故障清除技术研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2023.
- [19] 邹欣, 李晖, 赵晟凯, 等. 直驱风电场高电压穿越控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 191-198.
ZOU Xin, LI Hui, ZHAO Shengkai, et al. Study on high voltage ride-through control strategy of direct-drive wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 191-198.
- [20] 郑晗. 降低高电压风险的双馈风电机组低电压穿越参考功率整定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 161-168.
ZHENG Han. Low voltage ride-through reference power setting for double-fed induction generator to reduce high-voltage risk[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 161-168.
- [21] 鲁晓军, 林卫星, 姚良忠, 等. 辅助经VSC-HVDC并网的海上风电场故障穿越的动态制动电阻参数设计与控制策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 19-26.
LU Xiaojun, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Design and control strategy of dynamic braking resistance parameters to assist fault crossing of offshore wind farm connected to the VSC-HVDC grid[J]. Southern Power Grid Technology, 2015, 9(5): 19-26.
- [22] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并

- 网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
- LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [23] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 80-86.
- MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 80-86.
- [24] 洪敏, 辛焕海, 徐晨博, 等. 海上风电场与柔性直流输电系统的新型协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 53-58.
- HONG Min, XIN Huanhai, XU Chenbo, et al. A novel coordinated control strategy for offshore wind farms and flexible DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 53-58.
- [25] 李娟, 王鹏, 李方媛, 等. 超级电容储能的双馈风机低电压穿越能力研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 180-187.
- LI Juan, WANG Peng, LI Fangyuan, et al. Research on low voltage ride through capability of double-fed fan based on super capacitor energy storage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 180-187.
- [26] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的VSC-HVDC系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97.
- XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97.
- [27] 张钦智. 风电经柔直送出系统的主动支撑与故障穿越技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
- [28] 邓秋玲. 电网故障下直驱永磁同步风电系统的持续运行与变流控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [29] KIRAKOSYAN A, MOURSIS M S E, KHADKIKAR V. Fault ride through and grid support topology for the VSC-HVDC connected offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1592-1604.
- [30] YU Xinyu, WEI Yingdong, JIANG Qirong, et al. A novel hybrid - arm bipolar MMC topology with DC fault Ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1404-1413.
- [31] ERLICH I, FELTES C, SHEWAREGA F. Enhanced voltage drop control by VSC - HVDC systems for improving wind farm fault ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 378-385.
- [32] 戴金水, 朱森. VSC-MTDC联网风电场的交流故障穿越控制[J]. 电气自动化, 2016, 38(1): 26-30.
- DAI Jinshui, ZHU Miao. A control strategy for AC fault ride-through of wind farm integration through VSC - MTDC[J]. Electrical Automation, 2016, 38(1): 26-30.
- [33] DU Cuiqing, BOLLEN M H J, AGNEHOLM E, et al. A new control strategy of a VSC - HVDC system for high-quality supply of industrial plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2386-2394.
- [34] DU Cuiqing, AGNEHOLM E, OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2232.
- [35] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的DFIG与VSC-HVDC协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.
- BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC - HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.

作者简介:

肖立军(1966—),男,高级工程师,主要从事柔性直流配电网关键设备现场检测运维技术工作。

黄辉(1988—),男,工程师,主要从事直流输电及电力电子控制保护、柔性直流配电技术工作。E-mail:1282770959@qq.com。

贺曼(1983—),女,工程师,主要从事柔性直流配电技术、微电网能量管理技术工作。

赵江峰(1990—),男,高级工程师,主要从事海上风电并网技术工作。

崔成成(1983—),男,高级工程师,主要从事柔性直流输电技术工作。

孙桂锴(1989—),男,工程师,主要从事模块化多电平换流器技术工作。