

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 昌平 100085)

摘要: 大规模风电、光伏等新能源经柔直并网是实现双碳的关键途径。为实现新能源柔直送出系统安全可靠运行, 在交流电网故障时应具备故障穿越能力。文章针对新能源经柔直并网系统提出了一种基于故障电流限幅的故障穿越控制方法。首先, 介绍新能源经柔直并网示范工程概况, 并设计了定电压控制、VF下垂控制、直流变压器电流控制算法的控制策略。其次, 详细设计了包含无功-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新能源端换流站VSC2的故障穿越策略仿真验证。最后, 在示范工程现场开展验证试验。仿真和现场试验结果表明单相接地故障发生后, 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。

关键词: 柔性直流输电; 新能源; 故障穿越; 下垂控制; 示范工程

中图分类号: TM764

Research on a Fault Ride Through Strategy for New Energy Grid Connection through Flexible Direct Current Transmission

XIAO Lijun¹, HUANG Hui^{2*}, 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 Changping 100085, China)

Abstract: The large-scale integration of wind power, photovoltaic and other new energy through flexible and direct grid connection is an important measure to achieve the dual carbon goal. In order to achieve the safety and reliability of the new energy flexible direct transmission system, it should have the ability to pass through faults in the AC power grid. This article proposes a fault traversal control method based on fault current limiting for a new energy grid connected system through flexible direct transmission. Firstly, an overview of the demonstration project of new energy through flexible and direct grid connection is introduced, and control strategies for constant voltage control, VF droop control, and DC/DC control are designed. Secondly, a complete fault traversal control strategy was designed in detail, including voltage droop controller, frequency droop controller, current limiting controller, and voltage and current command selection. Then, a new energy grid connected demonstration project model was built on the PSCAD/EMTDC simulation platform, and fault traversal strategy simulation research was conducted the converter stations VSC2. Finally, validation experiments of this strategy were conducted on the demonstration project site. The simulation and on-site test results show that after a single-phase grounding fault occurs, the station control and valve control protection do not act. After the fault is cleared, it returns to normal operating state.

Keywords: voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC); new energy; fault ride through; droop control; demonstration 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

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM 20198201)。

收稿日期: 2023-08-21

所具有的独特优势^[1-9]。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。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^[1-3]。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^[4-9]。文献[10]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。文献[11]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。文献[12]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。文献[13]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。文献[14]提出在故障期间网侧换流站优先控制无功电流的方法,如此便可以为电网补充足够的无功功率,起到故障瞬间对故障点交流电压支撑的作用。考虑到故障期间增加交流母线处电压的支撑能力,文献[15-16]提出额外配置无功补偿装置的方法,该方法缺点是需要换流站的出口处额外增加设备。文献[17]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。

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

如图1所示,换流器VSC1与110 kV母线(图中所示#4母线)相连,换流器VSC2与110 kV母线(#1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。

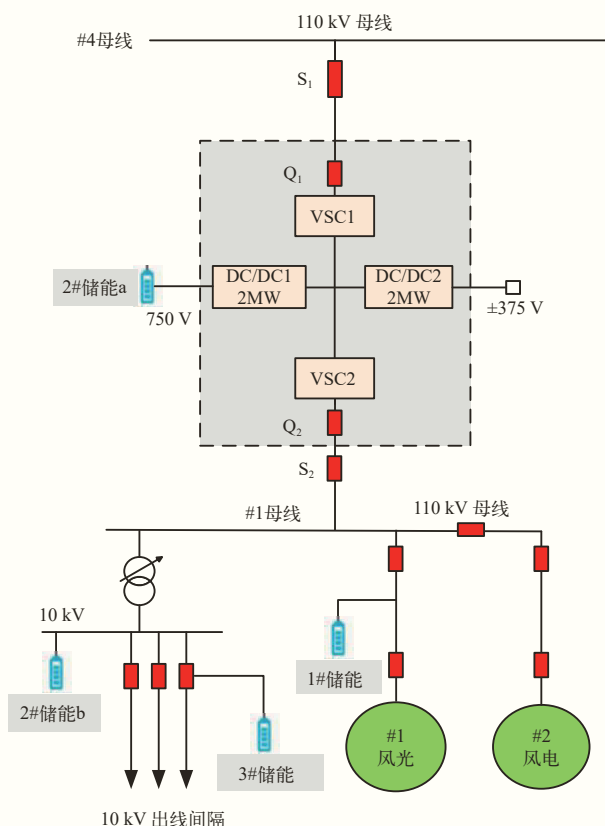


图1 新能源经柔直并网示范工程接线示意图

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。

1.2.1 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、无功电压实际值,带“*”的为各电气量的参考值。 ω 、 L 分别为角频率、电感。

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 $(1 - e^{-t/\tau})$ 的离散形式为：

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

式中： $y(n)$ 、 $y(n-1)$ 分别为当前时刻和前一时刻的输出； $x(n)$ 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转换部分曲线如图6所示， K_{QU} 为常数：

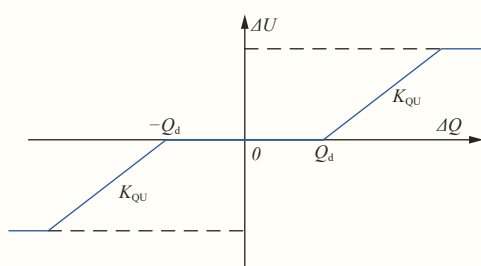


图6 QU转换框图

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；

当功率偏差 $\Delta Q > Q_d$ 时， $\Delta U = K_{QU}(\Delta Q - Q_d)$ ；

当功率偏差 $\Delta Q < -Q_d$ 时， $\Delta U = K_{QU}(\Delta Q + Q_d)$ 。

2.2 频率下垂控制器

图5中频率下垂控制器的 P_f 转换部分曲线如图7所示， K_{pf} 为常数：

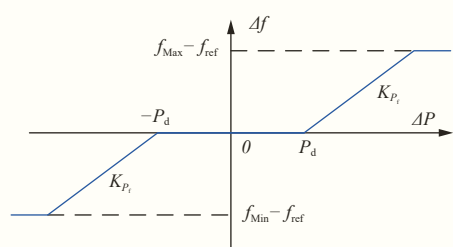


图7 P_f 转换框图

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

当功率偏差 $\Delta P > P_d$ 时， $\Delta f = K_{pf}(\Delta P - P_d)$ ；

当功率偏差 $\Delta P < -P_d$ 时， $\Delta f = K_{pf}(\Delta P + P_d)$ 。

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：

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。

低电压故障判据及处理逻辑：启动判据为 $0.2 \text{ pu} < E_s < 0.5 \text{ pu}$ ，连判1 ms， E_s 为交流电压瞬时幅值。恢复判据为 $E_s > 0.7 \text{ pu}$ ，连判10 ms。电流限幅指令为 $i_{lim} = 0.8 \text{ pu}$ 。

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，其他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。工程参数列表如表1所示。

表1 VSC1/VSC2换流器主要技术参数与性能指标

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

4 工程现场试验验证

图8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 、直流电流 I_{dp} 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。

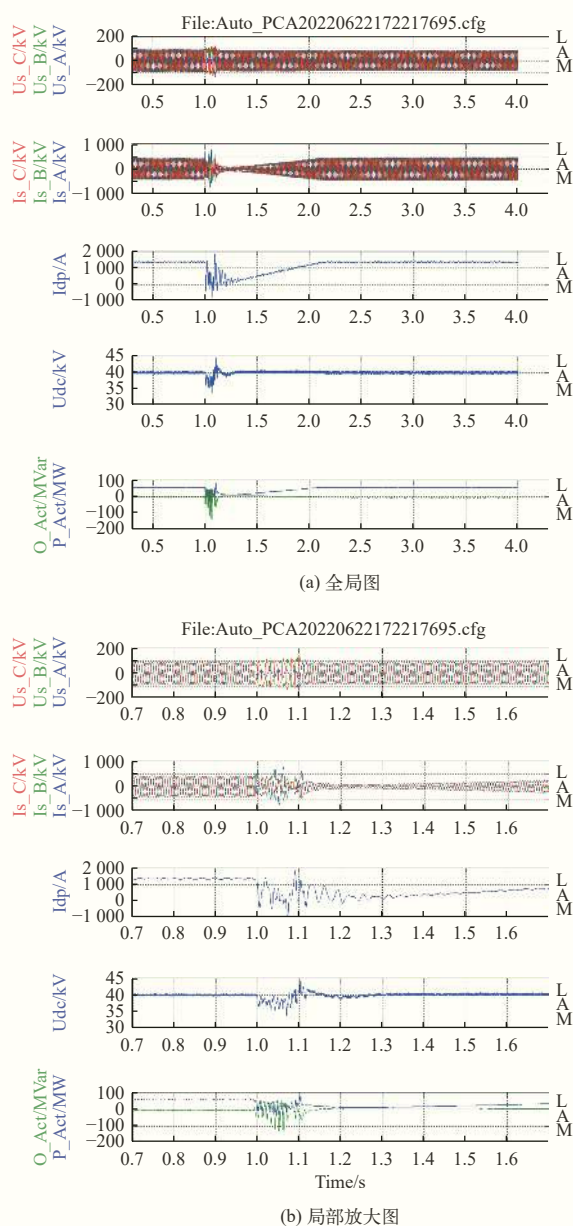


图8 单相接地故障现场试验波形

5 结束语

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] 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]. 华北电力大学, 2019.
- [2] 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]. 山东大学, 2021.
- [3] 张钦智, 王宾, 李琰. 风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 131-138.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 袁艺嘉, 孔明, 孙宝宝, 等. 海上换流站直流侧暂态过电压抑制策略有效性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 602-614.
- [8] 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, 400.
- [9] 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]. 山东理工大学, 2020.
- [10] 邓秋玲. 电网故障下直驱永磁同步风电系统的持续运行与交流控制[D]. 湖南大学, 2012.
- [11] KIRAKOSYAN A, MOURSI 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.
- [12] YU X, WEI Y, JIANG Q, 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.
- [13] ERLICH, 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.
- [14] 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.
- [15] DU C, 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.
- [16] DU C, 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.
- [17] 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.

作者简介

黄辉(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输电及电力电子控制保护、柔性直流配电技术, E-mail: 1282770959@qq.com。
(责任编辑:张峰亮)