

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.02.011

海上风电经柔直送出分接开关控制保护策略研究

杨伟涛, 张尧, 郭晓, 钟建荣

(南京国电南自电网自动化有限公司, 南京 211100)

摘要: 针对大容量海上风电经柔性直流送出系统, 陆上换流站采用并联联结变压器的系统方案, 提出了并联联结变压器分接开关控制保护策略。首先, 明确了柔性直流系统不同运行阶段有载分接开关调节档位的需求, 提出联结变压器有载分接开关调节档位控制策略, 其次, 针对并联联结变压器运行特性, 提出了分接开关同步控制技术和异步保护策略, 并设计了启动判据及实施流程。最后, 通过搭建的海上风电柔性直流送出仿真平台, 充分验证并联联结变压器有载分接开关核心控制保护策略的正确性。

关键词: 海上风电; 柔性直流; 联结变压器; 分接开关; 控制保护策略; 实时仿真

Research on Control and Protection Strategy for Tap Changers in Offshore Wind Power Transmission Via MMC-HVDC

YANG Weitao, ZHANG Rao, GUO Xiao, ZHONG Jianrong

(Nanjing Guodian Nanzi Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: For the system scheme where the onshore converter station adopts parallel-connected transformers in a large-capacity offshore wind power transmission system via VSC-HVDC, a control and protection strategy for the on-load tap changer of the parallel-connected transformer is proposed. Firstly, the requirements for adjusting the on-load tap changer of VSC-HVDC at different operating stages have been clarified and the control strategy of adjusting the on-load tap changer of the parallel connected transformer is proposed. Then, in response to the operational characteristics of parallel connected transformer, the synchronous control technology and asynchronous protection strategy for on-load tap changers are proposed, and the start-up criteria and implementation processes are designed. Finally, the correctness of the control and protection strategy for the on-load tap changer of the parallel connected transformer is fully verified through the construction of the offshore wind power MMC-HVDC transmission simulation platform.

Keywords: offshore wind power; MMC-HVDC; connecting transformers; tap changer; control and protection strategy; real-time simulation (RTDS)

0 引言

海上风电的大规模开发是支撑“双碳”战略目标实现的重要举措之一。预计 2030 年我国范围内海上风电年新增装机规模将达到 30 GW 左右^[1-15]。国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》中提出, 要积极推进东部沿海地区海上风电集群化开发, 打造五大海上风电基地集群。随着我国海上风电产业链的不断完善, 海上风

电行业迎来快速发展热潮。

深远海上风电的送出技术路线主要有基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电系统(high voltage direct current, HVDC)送出(MMC-HVDC)、基于二极管不控整流器(diode rectifier, DR)高压直流输电送出(DR-HVDC)和基于低频交流输电送出(low frequency AC transmission system, LFAC) 3 种方案^[16-20]。目前已投运的海上风电送出工程主要采用 MMC-HVDC 技术

收稿日期: 2025-12-17; 修回日期: 2026-01-05

基金项目: 国家重点研发计划(2024YF4206900)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2024YF4206900)。

路线。柔性直流输电拓扑包括对称单极(伪双极)和对称双极(真双极)2种拓扑,一般适用200 km以上输送距离,对称单极柔性直流输电为目前大规模中远海风电送出最成熟的拓扑,具有丰富的运行经验和良好的经济性^[21-23],国外已投运工程和国内已建工程多采用该拓扑。为提高沿海地区输电走廊利用率,采用海陆一体协同直流输电技术是未来大规模远海风电并网的高效经济方案之一^[24-30],国内的广东三山岛、辽宁丹东柔直工程和欧洲 BalWin、LanWin 均采用该技术路线,当前单回±500 kV 直流海缆输送容量可达2 000 MW,为提供系统的可靠性和降低装置制造难度,陆上联结变压器多采用两台并联运行模式。

联结变压器是柔性直流输电的核心装备之一,主要用于平抑交流系统电压波动的影响、调节直流系统功率升降、调整直流系统运行在合理工作区间。有载分接开关是联结变的关键部件^[31],数次严重故障均发生在有载分接开关挡位调节过程中,一旦出现故障轻则造成直流停运,重则引起联结变压器等重要设备损毁,造成巨大的经济损失和严重的社会影响,文献[32-33]针对特高压直流系统有载分接开关控制策略进行了研究,但特高压直流系统采用常规直流输电系统其分接开关控制与柔性直流输电系统有载分接开关控制目标存在明显差异性。

本文针对并联联结变压器运行的特性和有载分接开关异步异常工况提出了自同步控制策略和保护策略,并基于紧凑型国产化控制保护主机,搭建RTDS控制保护物理仿真平台,对联结变压器有载分接开关在稳态运行以及故障工况进行了仿真验证。

1 有载分接开关控制保护策略研究

1.1 有载分接开关控制策略

本文柔性直流送出方案采用的对称单极柔性直流送出方式如图1所示(图中仅标注关键装置)。海上风电场群汇集为多个66 kV间隔分别接入3台并联联结变压器汇集后接入海上换流站,陆上换流站通过2台并联联结变压器送出,最终接入陆上负荷中心交流电网。

海上换流站为无源电网,交流电网电压由海上换流站控制^[12-15],国内外柔性直流输电工程海上联结变压器均未设计有载分接开关,故海上换流站无需开展有载分接开关控制保护策略研究。

陆上换流站为有源电网,需通过调节联结变压器有载分接开关以维持换流阀侧电压在合理的范围内,有载分接开关控制调节属于慢速调节,其调节速

度为秒级^[10-11]。柔性直流输电系统带电运行阶段可划分为2个阶段即联结变压器和换流阀充电阶段、换流阀解锁运行阶段,联结变压器有载分接开关基于以上2个阶段的特性设计相应的控制保护策略。

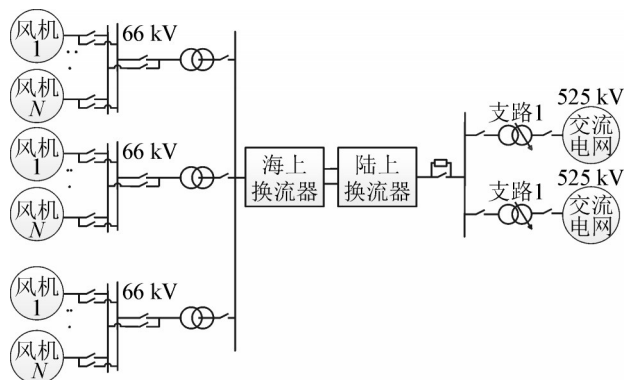


图1 系统拓扑方案
Fig. 1 Topological scheme of system

1.1.1 充电阶段有载分接开关控制策略

柔性直流系统由停运阶段转充电阶段时有载分接开关控制以维持联结变压器换流阀侧交流电压在额度值为控制目标^[34-35],根据联结变压器有载分接开关调节电压的基本原理,联结变压器阀侧交流电压计算见式(1)。基于此有载分接开关控制包含2种控制思路。

$$U_v = \frac{U_{ac}}{N_{nom}(1 + m(N_{tap} - N_{nom}))} \times k \quad (1)$$

式中: U_v 为联结变压器换流阀侧交流电压; U_{ac} 为交流电网系统交流电压; N_{nom} 为联结变压器额度电压对应的有载分接开关额度挡位; N_{tap} 为联结变压器当前有载分接开关实际挡位; m 为联结变压器有载分接开关调一档阀侧交流电压的级差(一般为1.25%); k 为联结变高低压变比。

柔性直流联结变压器充电阶段励磁涌流可达数千安,存在造成联结变压器保护误动的风险。为降低联结变压器充电时励磁涌流峰值,柔性直流系统停运阶段将联结变压器调节至最低挡位,当联结变压器完成充电后再进行有载分接开关调节。由式(1)可知,通过调节联结变压器有载分接开关可实现对联结变压器阀侧交流电压的控制,联结变压器充电后有载分接开关从最低挡位调至理想阀侧电压。此控制策略如图2所示。当阀侧交流电压偏低时增加有载分接开关挡位,阀侧交流电压偏高时降低分接开关挡位。

此方案中需要在有载分接开关在有载状态下进行有载分接开关调挡,增加了有载分接开关在有载状态下的使用次数,降低了有载分接开关使用年

限,同时存在有载分接开关挡位调节过程中故障需解列联结变压器的风险。

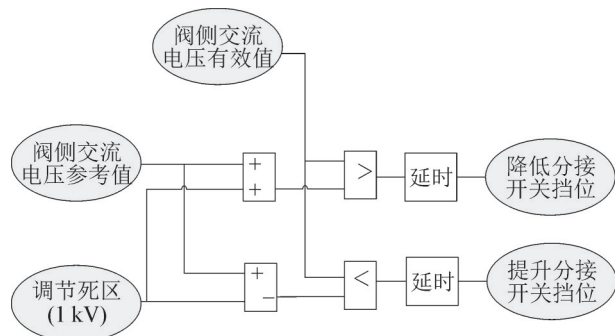


图2 有载分接开关控制原理
Fig. 2 Control principle of on-load tap changer

为降低有载分接开关带载调节次数,可采用在交流断路器合闸前,通过交流系统电压计算出理想的有载分接开关挡位,将有载分接开关调整在合适挡位,再对联结变压器和换流阀进行充电,有效的降低了联结变压器分接开关有载调节次数,但此方案需通过选项合闸装置在理想的交流电压角度进行合闸以降低励磁涌流。

以上2种控制方案均基于联结变压器阀侧交流电压进行控制,其本质区别仅在于联结变压器交流断路器合闸联锁条件和联结变压器充电自动顺序控制步骤差异。

1.1.2 解锁阶段有载分接开关控制策略

为实现控制系统有功功率(直流电压)和无功功率精准控制,需保障柔性换流阀始终运行在线性调制区,将调制比维持在0.9左右,调制比计算公式为

$$\begin{cases} m = \frac{U_{ref}}{U_{dc} \times 0.5} \\ P = (U_{ac} \times U_{vsc} / X) \times \sin \delta \\ Q = (U_{ac} / X) \times (U_{vsc} \cos \delta - U_{ac}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为调制比; U_{ref} 为调制波幅值; U_{dc} 为直流电压额度值; P 为有功功率; Q 为无功功率; U_{ac} 为交流电压; U_{vsc} 为换流阀输出交流电压; X 系统电抗; δ 为换流阀输出交流电压和交流系统交流电压相位角差。

换流阀解锁运行后,有载分接开关控制目标从换流阀侧交流电压切换为调制比控制,以调制比为控制目标有载分接开关控制流程如图3所示。

从式(2)可以看出,海上风电送出有功功率的升降或交流电压的波动均会引起有载分接开关挡位的变化。海上风电在升功率或升电流的过程中,受端等效直流电源电压有上升的趋势,为了控制直流电压,调制波幅值相应降低,调制比必然会变化,当调制比越限时通过调节有载分接开关挡位维持系统稳定,海上风电降功率过程依然。交流电网电

压波动时柔性直流输出交流电压未及时变化,柔性直流系统直流电压会产生波动,造成调制比波动,当调制比越限时,通过调节有载分接开关以维持有功功率和无功功率平衡。

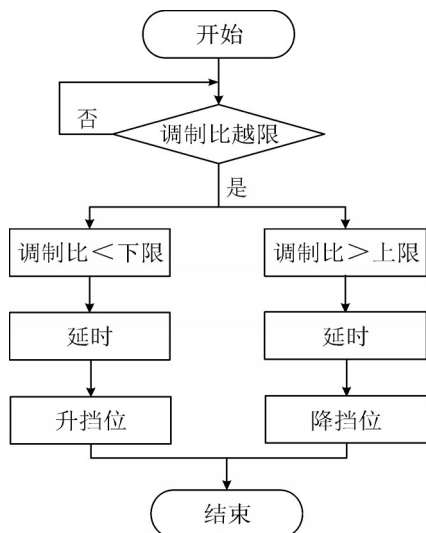


图3 有载分接开关调节流程
Fig. 3 Adjustment process of on-load tap changer

1.2 并联联结变分接开关控制策略

陆上换流站采用并联联结变压器设计,但为减少联结变压器同步投入对交流电网的扰动,采用并联联结变压器顺序投入的策略。

先接入柔性直流系统的联结变压器,该联结变压器有载分接开关挡位已将联结变压器交流电压和柔性直流调制比调节至合理范围内。后接入柔性直流系统的联结变压器,该联结变压器通过检测阀侧交流电压(阀侧交流电压配置在阀侧母线时)或调制比并不能实现联结变压器有载分接开关升降挡位的调节。为此需设计后接入柔性直流系统并联变压器有载分接开关控制策略。本文考虑到先接入柔性直流系统的联结变压器有载分接开关已在理想挡位,后接入柔性直流系统的联结变压器可以采用跟随策略以实现并联联结变压器挡位一致。

先接入柔性直流系统联结变压器有载分接开关挡位充电阶段以交流阀侧电压为控制目标,柔性直流系统解锁运行阶段以调制比为控制模版进行升降挡位调节。后并联接入柔性直流系统的联结变压器跟随先投入的联结变压器有载分接开关挡位,直到将有载分接开关挡位调至一致,控制流程如图4所示。

当并联联结变压器调至挡位一致后,在充电阶段为避免由于阀侧交流采样误差导致计算的并联联结变压器有载分接开关挡位不一致,造成挡位偏

差,需继续采用跟随控制策略。当换流阀解锁运行时不存在采样误差的问题可继续采用跟随控制策略,也可采用基于调制比同步控制并联联结变压器有载分接开关挡位。

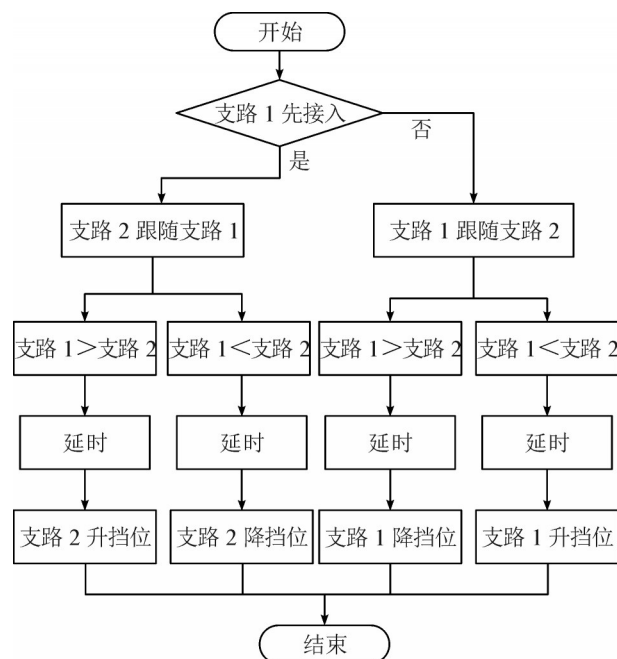


图4 并联分接开关同步控制

Fig. 4 Synchronous control of parallel tap changer

1.3 有载分接开关异步保护策略

联结变压器有载分接开关调节过程中难免会出现调档失败的问题,即使控制系统通过多次同步控制也不能避免无法将并联联结变压器挡位调至一致。并联联结变压器挡位产生挡位差后在并联联结变压器间会产生一定的环流,并联联结变压器环流的等效电路如图5所示。

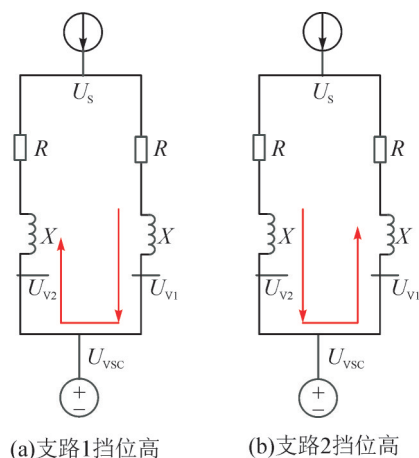


图5 并联联结变压器等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of parallel connected transformer

当联结变压器挡位不一致时,并联联结变压器阀侧 U_{v1} 和并联联结变压器阀侧 U_{v2} 不一致形成环

流,其环流计算公式为

$$\begin{cases} I = \frac{U_{v1} - U_{v2}}{Z} \\ Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I 为并联联结变压器环流; U_{v1} 和 U_{v2} 联结变压器阀侧电压; R 为系统等效电阻; X_L 为系统等效电感; Z 为系统总阻抗。

当阀侧交流电压 U_{v1} 大于阀侧 U_{v2} , 并联联结变压器交流环流如图5(a)所示,当阀侧交流电压 U_{v1} 小于阀侧 U_{v2} , 并联联结变压器交流环流如图5(b)所示。

为避免并联联结变压器出现较大的环流,不允许并联联结变压器存在较大的挡位差值,当并联联结变压器存在较大环流(允许的环流大小需基于联结变压器设备确定)应启动相应的保护策略。通过式(1)和式(2)计算出合理的有载分接开关挡位,进而分辨出有载分接开关挡位异常的联结变压器设备,将挡位异常的联结变压器阀侧交流断路器和网侧交流进线断路器分闸后,将异常联结变压器从柔性直流系统中解列。由于联结变压器为自然均流,当异常联结变压器解列时,系统有功功率和无功率继续通过运行的联结变压器向交流电网输送。

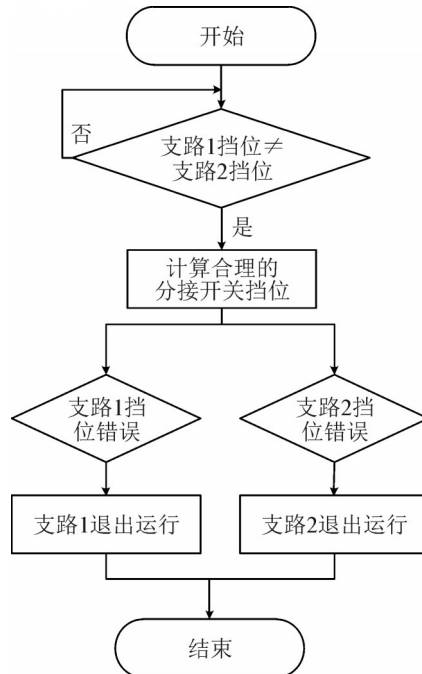


图6 并联联结变压器退出运行

Fig. 6 Out-of-operation of parallel connected transformer

2 仿真实验

在 RTDS 中搭建海上风电柔性直流送出系统,拓扑如图1所示,该拓扑结构采用对称单极拓扑结构,主设备参数见表1。仿真模型的波形参数,如表2所示。

表1 设备技术参数
Table 1 Technical parameters of equipment

项目	海上站	陆上站
额定功率/MW	2 000	2 000
直流电压/kV	±500	±500
直流电流/A	2	2
联接变容量/MVA	1 050×2	700×3
网侧交流母线电压/kV	525	66
阀侧额定交流电压/kV	515	520
IGBT额定电流/A	2 000	2 000
IGBT额定运行电压/kV	2.2	2.2
子模块数量	460	460
有载分接开关	-3~3/0.125%	—

表2 波形参数
Table 2 Waveform parameters

项目	描述
E_{ac1}	支路1网侧电压/kV
E_{ac2}	支路2网侧电压/kV
E_{v1}	支路1阀侧电压/kV
E_{v2}	支路2阀侧电压/kV
P	有功功率/MW
U_{dc}	直流极间电压/kV
TCC ₁	联结变压器A分接开关挡位
TCC ₂	联结变压器B分接开关挡位
m	调制比
TCC ₁ _NOLA	联结变压器A空载模式
TCC ₂ _NOLA	联结变压器B空载模式
TCC ₁ _F_TCC2	联结变压器A跟踪联结变B
TCC ₃ _F_TCC1	联结变压器B跟踪联结变A
QF ₁ _C	联结变压器A网侧交流断路器合闸状态
QF ₂ _C	联结变压器A阀侧交流断路器合闸状态
QF ₃ _C	联结变压器B网侧交流断路器合闸状态
QF ₄ _C	联结变压器B阀侧交流断路器合闸状态

2.1 有载分接开关控制

为验证海上风电柔性直流送出系统陆上换流站联结变压器有载分接开关控制策略,在 0.05 s 时合闸联结变压器 A 网侧交流断路器 QF₁,在 0.4 s 时合闸联结变压器 A 阀侧交流断路器 QF₂,在 0.5 s 时解锁柔性直流系统,仿真结果如图 7 所示。

由图 7 分析可知,网侧交流断路器 QF₁ 合闸但柔性直流系统未解锁运行,有载分接开关基于阀侧电压进行调节,在 0.05 s 时联结变压器交流进行断路器合闸,有载分接开关从 1 挡调至额定 4 挡位,将联结变阀侧交流电压调至额度值 300 kV 范围内,检测到阀侧电压到额度范围后,将阀侧交流断路器 QF₂ 合闸向换流阀进行充电,换流阀充电至阀侧交流线电压峰值直流电压维持在 0.7 p.u.完成充电,0.5 s 时柔直换流阀解锁,解锁运行后联结变压器有

载分接开关仅基于调制比进行调挡,有载分接开关将调制比 m 维持在额度值范围内。

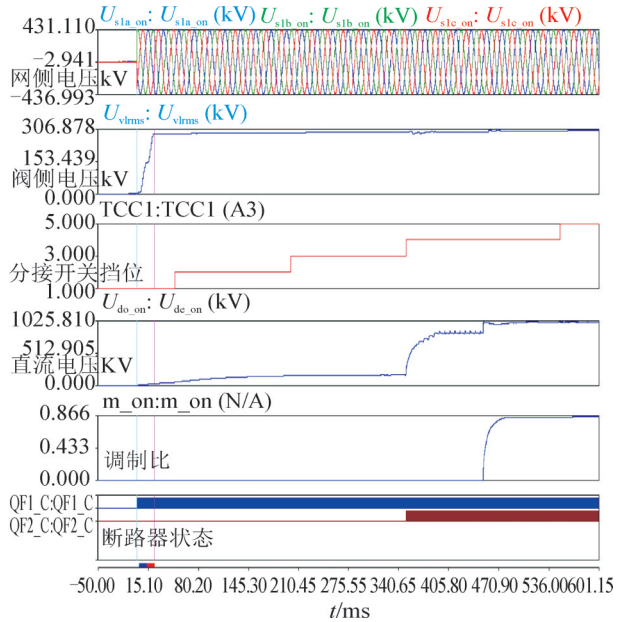


图7 分接开关控制
Fig. 7 Control of tap changer

2.2 并联有载分接开关同步控制

为验证海上风电柔性直流送出系统陆上换流站并联联结变压器有载分接开关同步控制策略,在 0.05 s 时合闸联结变压器 A 网侧交流断路器 QF₁,在 0.1 s 时合闸联结变压器 B 网侧交流断路器 QF₃,在 0.4 s 时合闸联结变压器 A 阀侧交流断路器 QF₂,在 0.45 s 时合闸联结变压器 A 阀侧交流断路器 QF₄,仿真结果如图 8 所示。

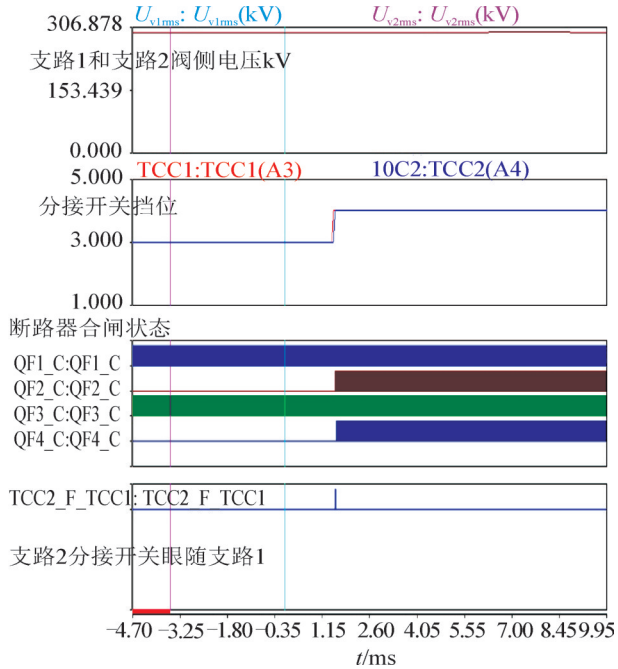


图8 分接开关同步控制
Fig. 8 Synchronous control of tap changer

由图8分析可知,联结变压器支路1在0.05 s时先充电,在0.4 s时联结变变压器支路1有载分接开关在4挡时,联结变压器阀侧交流电压达到额定值范围内阀侧交流断路器 QF_2 合闸,此时联结变压器支路2检测到联结变压器支路阀侧断路器合闸时,将分接开关由基于阀侧电压控制切换为跟随控制,联结变压器2分接开关挡位与联结变压器A挡位一致时合闸联结变压器2阀侧交流断路器 QF_4 ,联结变变压器支路1和联结变变压器支路2的阀侧断路器均合闸。

2.3 并联有载分接开关异步保护

为验证海上风电柔性直流送出系统陆上换流站联结变压器有载分接开关异步保护策略,在1.5 s时触发联结变压器A有载分接开关调1挡,在1.8 s时触发联结变压器A有载分接开关调1挡,仿真结果如图9所示。

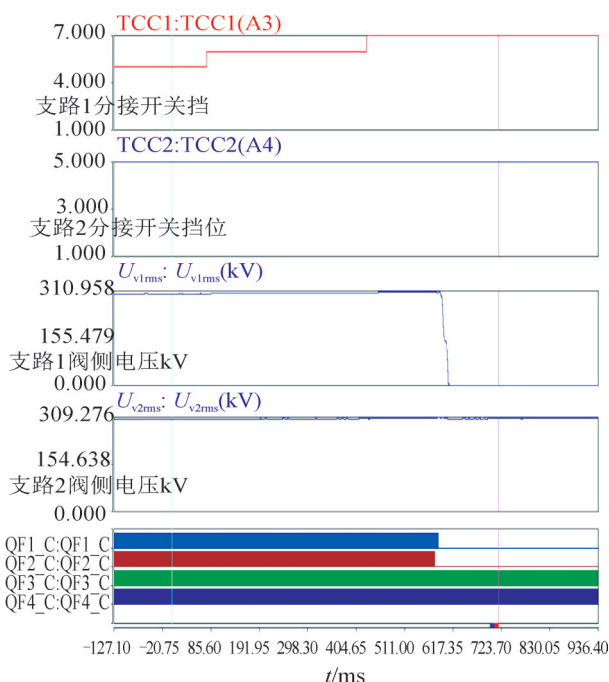


图9 分接开关异步保护策略
Fig. 9 Asynchronous protection strategy for tap changer

由图9分析可知,在1.5 s时联结变压器1有载分接开关1挡位出现异常,当联结变压器1和联结变压器2挡位差1挡时,联结变压器1和联结变压器2之间的环流较小,分接开关挡位差保护未动作。在1.8 s时联结变压器1和联结变压器2挡位差2挡时,联结变压器1和联结变压器2之间的环流已超过限制范围,分接开关挡位差保护动作。2 s时将联结变压器1阀侧断路器和网侧断路器跳开,联结变压器1的有功功率转移至联结变压器2,继续向交流电网系统输送有功功率。

3 结语

本文提出了海上风电经柔直并联联结变压器有载分接开关控制保护策略,最终通过RTDS仿真进行了验证,为海上风电经柔直送出方案的设计提供了参考。主要结论如下:

- 1)通过调节联结变压器有载分接开关使阀侧交流电压和调制比维持在合理范围内。
- 2)通过并联联结变压器同步跟随控制实现了并联联结变压器有载分接开关挡位保持一致。
- 3)当出现联结变压器有载分接开关挡位异步时,解列异常联结变压器保证设备安全,同时有功功率快速转移。

参考文献

- [1] 杨葆鑫,邢文奇,刘鹏飞,等.基于直流电压前馈的构网型光伏稳定性优化控制策略[J].高压电器,2024,60(12):213-222.
YANG Baoxin, XING Wenqi, LIU Pengfei, et al. Optimal control strategy of stability for grid-forming photovoltaic based on DC voltage feedforward[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12):213-222.
- [2] 徐政.海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J].电力系统自动化,2022,46(21):1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21):1-10.
- [3] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等.海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J].南方电网技术,2020,14(12):25-31.
LU Yuxin, ZHAO Xiaobin, LI Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12):25-31.
- [4] 吴庆范,宋延涛,刘晨,等.大规模海上风电送出控制保护技术研究及应用[J].船舶工程,2025,47(z1):102-109.
WU Qingfan, SONG Yantao, LIU Chen, et al. Research and application of control and protection technology for large-scale offshore wind transmission[J]. Ship Engineering, 2025, 47(z1):102-109.
- [5] 王博闻,周童浩,林浩凡,等.柔性低频交流输电系统220 kV变压器声振特性分析[J].变压器,2025,62(9):11-18.
WANG Bowen, ZHOU Tonghao, LIN Haofan, et al. Analysis of acoustic and vibration characteristics of transformers for flexible low-frequency AC transmission[J]. Transformer, 2025, 62(9):11-18.
- [6] 刘晨阳,高甜甜,王广宁,等.海上风电高压柔直送出多端系统故障穿越特性及关键技术综述[J].高电压技术,2025,51(10):4913-4932.

- LIU Chenyang, GAO Tiantian, WANG Guangning, et al. Review of fault ride-through strategies and key technologies for offshore wind power multi-terminal VSC-HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10):4913-4932.
- [7] 蔡希鹏, 邹常跃, 彭发喜, 等. 超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(7):2895-2901.
- CAI Xipeng, ZOU Changyue, PENG Faxi, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration[J]. Power System Technology, 2024, 48(7):2895-2901.
- [8] 肖晃天, 甘慧辰, 黄莹, 等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(6):2702-2719.
- XIAO Huangting, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6):2702-2719.
- [9] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9):164-173.
- DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9):164-173.
- [10] 李泰, 鲁庆华, 孙攀磊, 等. 基于VSG的弱同步支撑柔直系统阻尼控制策略[J]. 电力电子技术, 2025, 59(4):83-88.
- LI Tai, LU Qinghua, SUN Panlei, et al. Damping control strategy for weak synchronous support flexible straight system based on VSG[J]. Power Electronics, 2025, 59(4):83-88.
- [11] 马秀达, 卢宇, 詹长江, 等. 海上风电多端柔性直流输电系统及直流故障处理方案[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(17):81-89.
- MA Xiuda, LU Yu, ZHAN Changjiang, et al. Multi-terminal flexible DC transmission system for offshore wind power and its DC fault clearance scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(17):81-89.
- [12] 刘福锁, 丁芮, 王玉, 等. 海上风电孤岛经VSC-HVDC并网系统的故障穿越策略[J]. 电气传动, 2025, 55(10):19-29.
- LIU Fusuo, DING Rui, WANG Yu, et al. Fault ride-through strategy for offshore wind power islanding via VSC-HVDC grid-connected system[J]. Electric Drive, 2025, 55(10):19-29.
- [13] 刘金, 房博一, 黄一钊, 等. 基于高速并联开关的多端混合直流工程第三站在线投退关键特性分析[J]. 高压电器, 2025, 61(9):215-220.
- LIU Jin, FANG Boyi, HUANG Yizhao, et al. Key characteristics analysis of on-line switching on/off for the third station of multi-terminal hybrid DC project based on high-speed parallel switch[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(9):215-220.
- [14] 刘鹏程, 罗晗, 汪斌, 等. 海上风电柔性直流输电用三相分裂式联接变压器技术研究[J]. 变压器, 2025, 62(12):43-50.
- LIU Pengcheng, LUO Han, WANG Bin, et al. Research on three-phase dual-low-voltage connected transformer technology for offshore wind power VSC-HVDC[J]. Transformer, 2025, 62(12):43-50.
- [15] 王谱宇, 王松, 张静怡, 等. 含多线路直流潮流控制器的多端直流环网非瞬时断路故障特征及控制保护策略[J]. 电网技术, 2022, 46(1):90-100.
- WANG Puyu, WANG Song, ZHANG Jingyi, et al. Characteristics and control & protection strategy of a multi-line CFC integrated M2TDC grid under non-instantaneous open-circuit faults[J]. Power System Technology, 2022, 46(1):90-100.
- [16] 朱泽翔, 张建新, 付超, 等. 高压大容量多端常规直流安全稳定控制系统设计[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11):67-74.
- ZHU Zexiang, ZHANG Jianxin, FU Chao, et al. Security and stability control system design for high voltage large capacity multi-terminal LCC based DC system[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11):67-74.
- [17] 方春恩, 王渊朝, 潘麟, 等. 基于磁环的海上风电场高频重燃过电压的抑制研究[J]. 高压电器, 2026, 62(1):167-175.
- FANG Chun'en, WANG Yuanchao, PAN Lin, et al. Study on suppression of high frequency reignition overvoltage of offshore wind farm based on magnetic ring[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(1):167-175.
- [18] 张彦杰, 刘威, 刘凯, 等. 海上风电用直流六氟化硫绝缘罐式金属氧化物避雷器的研制[J]. 电瓷避雷器, 2025(4):49-58.
- ZHANG Yanjie, LIU Wei, LIU Kai, et al. Development of SF₆ gas-insulated metal oxide arrester for offshore wind power dc system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(4):49-58.
- [19] 高旭, 任军辉, 姜彦涛, 等. 海上柔直换流阀塔运行期间的疲劳特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12):223-231.
- GAO Xu, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Study on fatigue characteristics of offshore VSC-HVDC converter valve tower in operation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12):223-231.
- [20] 江守其, 徐亚男, 李国庆, 等. 提升海上风电经柔直联网

- 系统频率稳定性的协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9):194-201.
- JIANG Shouqi, XU Yanan, LI Guoqing, et al. Coordinated control strategy for improving frequency stability of MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9):194-201.
- [21]王少华,李泽宇,张永,等. 输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(4):100-108.
- WANG Shaohua, LI Zeyu, ZHANG Yong, et al. Factors affecting heating caused by pollution on composite insulators in transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(4):100-108.
- [22]李金亮,杜志叶,阮江军,等. 特高压直流同塔混压输电线路耐雷性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(1):54-60.
- LI Jinliang, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Research of lightning withstand performance for double-circuit UHV DC transmission lines with dual voltage 800 kV/500 kV on the same tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1):54-60.
- [23]方超颖,郑钟楠,钱健,等. 海上升压站利用基础作为自然接地体的仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):105-110.
- FANG Chaoying, ZHENG Zhongnan, QIAN Jian, et al. Simulation study on using foundation as natural grounding electrode of offshore boost station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):105-110.
- [24]刘启建,杨美娟,行登江,等. 风电场经柔性直流孤岛送出的交流故障联合穿越策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2):132-141.
- LIU Qijian, YANG Meijuan, XING Dengjiang, et al. Coordinated AC fault ride through strategy for wind farm connected to VSC-HVDC system by island[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2):132-141.
- [25]YE Haihan, CHEN Wu, WU Heng, et al. Enhanced AC fault ride-through control for MMC-integrated system based on active PCC voltage drop[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4):1316-1330.
- [26]宫一品. 海上风电经柔直送出系统送端交流故障分析及协调控制[D]. 济南:山东大学, 2023.
- [27]陈怡静,李春华,李英彪,等. 双闭环VF控制MMC输出短路电流特性分析与计算方法[J]. 电力建设, 2024, 45(10):90-99.
- CHEN Yijing, LI Chunhua, LI Yingbiao, et al. Short-circuit current characteristics analysis and calculation methods of modular multilevel converter in double closed-loop voltage-frequency control[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10):90-99.
- [28]张钦智,王宾,李琰,等. 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.
- ZHANG Qinzhi, WANG Bin, LI Yan, et al. Research on fault crossing coordination control of a wind farm via a flexible direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):131-138.
- [29]朱继忠,高美云,肖鹏飞,等. 大规模海上风电并网与运行技术综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):2-24.
- ZHU Jizhong, GAO Meiyun, XIAO Pengfei, et al. Review of grid integration and operation technologies for large-scale offshore wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):2-24.
- [30]彭发喜,黄伟煌,李岩,等. 海上风电经双极柔直系统送出功率平衡控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8):23-30.
- PENG Faxi, HUANG Weihuang, LI Yan, et al. Power balance control strategy for offshore wind power transmission through bipolar flexible straight system[J]. Southern Power Grid Technology, 2023 17(8):23-30.
- [31]张静,高冲,许彬,等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12):4081-4090.
- ZHANG Jing, GAO Chong, XU Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12):4081-4090.
- [32]张蕙峰,李茂堂,巴秀秀,等. 换流变压器有载分接开关故障引发阀侧电流三相不平衡的诊断分析[J]. 变压器, 2025, 62(2):66-71.
- ZHANG Huifeng, LI Maotang, BA Xiuxiu, et al. Diagnosis and analysis on valve side three-phase current imbalance caused by on-load tap-changer fault of converter transformer[J]. Transformer, 2025, 62(2):66-71.
- [33]郭贤珊,李凤祁,阮思烨,等. 高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J]. 电力建设, 2021, 42(2):9-19.
- GUO Xianshan, LI Fengqi, RUAN Siye, et al. Optimization on control strategy of tap changer in HVDC converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2):9-19.
- [34]牟金善,管文杰,何倩倩. 海上风电机组变压器磁密设计影响因素探讨[J]. 变压器, 2024, 61(2):51-54.
- MU Jinshan, GUAN Wenjie, HE Qianqian. Influencing factors discussion on magnetic flux density design of transformers for offshore wind turbines[J]. Transformer, 2024, 61(2):51-54.
- [35]牟金善,何倩倩,王粉芍. 一种海上风电变压器损耗值优化计算方法[J]. 变压器, 2024, 61(3):10-13.
- MU Jinshan, HE Qianqian, WANG Fenshao. An optimization calculation method for transformers loss of offshore wind turbine[J]. Transformer, 2023, 60(3):10-13.

作者简介:

杨伟涛(1984—),男,工程师,通信作者,主要研究方向为柔性直流输电方面的控制保护策略及工程实施运维。E-mail:13683806301@163.com。

张尧(1984—),男,正高级工程师,主要研究方向为柔性直流输配电。E-mail:yao-zhang@sac-china.com。

郭晓(1982—),男,高级工程师,主要研究方向为柔性直流输配电。E-mail:xiao-guo@sac-china.com。

(上接第89页)

- Electrotechnical Society, 2023, 38(21):5682-5690.
- [34]李旭哲. 阳极饱和电抗器的振动噪声特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [35]王家俊. 特高压换流阀阳极饱和电抗器铁心损耗研究[D]. 天津:河北工业大学,2021.
- [36]张长庚,王家俊,李永建,等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁芯损耗模拟[J]. 高电压技术,2021, 47(6): 2158-2168.

ZHANG Changgeng, WANG Jiajun, LI Yongjian, et al. Dynamic core loss simulation of the anode saturable reactor of UHVDC converter valves[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6):2158-2168.

作者简介:

张宏伟(1976—),男,正高级工程师,高级技师,研究方向为超特高压电磁特性与新能源并网特性。E-mail:gs_zhanghw@163.com。