

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.03.014

典型海上风电首次投运失败原因探讨

刘根根, 魏俊梅, 白伟, 石鹏斌, 王鹏飞, 肖政, 陈科技
(特变电工中发上海高压开关有限公司, 上海 201400)

摘要: 本文介绍了广西某海上风电项目和浙江某海上风场两起海上风电首次送电过程中, 开关非正常跳闸的典型案例分析, 广西某海上风电项目开关非正常跳闸的原因是由于合空载变压器产生励磁电流, 三相电流值差异较大, 造成零序电流超过预设保护值而跳闸; 浙江某海上风场是由于长海缆产生的电容与电感匹配, 合空载变压器时引起线路串联谐振, 造成电流差动保护启动而跳闸, 通过对该两起案例的深入剖析, 进而采取相应措施避免事故再次发生, 对今后海上风电项目顺利投运具有借鉴作用。

关键词: 海上风电; 投运失败; 原因探讨和措施

Discussion on First Commissioning Failure in Offshore Wind Power Station

LIU Gengen, WEI Junmei, BAI Wei, SHI Pengbin, WANG Pengfei,
XIAO Zheng, CHEN Keji

(TBEA Zongfa Shanghai High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shanghai 201400, China)

Abstract: This paper introduces two typical cases of abnormal switch tripping during the first delivery of offshore wind power stations. Through the in-depth analysis, the reason for abnormal switch tripping in Guangxi offshore wind power station is due to the closing of no-load transformer generates excitation current, three-phase current value difference is large, resulting in zero sequence current exceeds the preset value of the protection; the reason for abnormal switch tripping in Zhejiang offshore wind farm is due to the long cable capacitance, closing the no-load transformer, causing series resonance, resulting in the current differential protection start. Taking proper measures to avoid the accident from happening again. This is a reference for commissioning of future offshore wind power projects.

Keywords: offshore wind power; commissioning failure; cause discussion and measures

0 引言

近年来,海上风力发电作为绿色能源产业发展迅猛^[1-3]。海上风力发电主要有以下优势:1)风能资源丰富。海上的风能通常比陆地上更强劲、更稳定,且受地形、建筑物等因素干扰小,能持续稳定发电。2)发电量大。海上风电机组单机容量大,且可以大规模开发建设风电场,所以能产生大量电能,有效提高发电效率。3)对环境的负面影响小。海上风电场所占空间在海上,远离人口密集区域,对居民生活、景观、鸟类栖息地等的影响相对较小,噪音污染也较弱。海上风力发电通常采用长电缆将电能输送至陆上集控中心上网。由于其特殊的建造特

点和使用环境,风力发电电站投运过程中偶有故障出现,导致保护开关非正常跳闸,从而投运失败。

本文对广西某海上风电项目和浙江某海上风场两起海上电站投运失败的案例事发过程、原因分析、改进措施等进行了深入剖析和论述。

广西某海上风电项目是由于投运过程中,合空载变压器产生励磁电流,三相电流值差异较大,造成零序电流超过保护系统预设保护值而跳闸。后续通过现场调整零序电流保护启动参数,增加空合变压器差动速断等措施,保证了项目投运和送电成功。

浙江某海上风场是由于投运过程中,长输电海缆自身的电容与变压器电感匹配,合空载变压器时

收稿日期:2024-12-16

引起线路串联谐振,造成保护系统电流差动保护启动,进而引发开关跳闸。开关空合变压器时,其瞬间电抗相角幅值是随机的,是变量,谐振参数恰好匹配十分偶然。再次投运,变压器5次空冲均正常,送电成功。

通过对两起海上风电首次送电过程中,开关非正常跳闸典型案例的深入剖析,充分了解海上风力发电站投运失败的可能原因,并采取相应合适措施,避免了再次投运时事故再次发生,这对今后海

上风电项目投运具有一定参考和借鉴意义。

1 广西某海上风电项目首次送电失败案例介绍和分析

广西某海上风电示范项目装机容量700 MW,风电场内安装9 MW 风机(单台)共计78 台,由13 回66 kV 海缆送入220 kV 海上升压站。海上升压站设3 台220/69/10 kV 主变,变压后经3 串220 kV GIS 线变组,通过3 条220 kV 海缆送入陆上集控中心上网,主接线见图1。

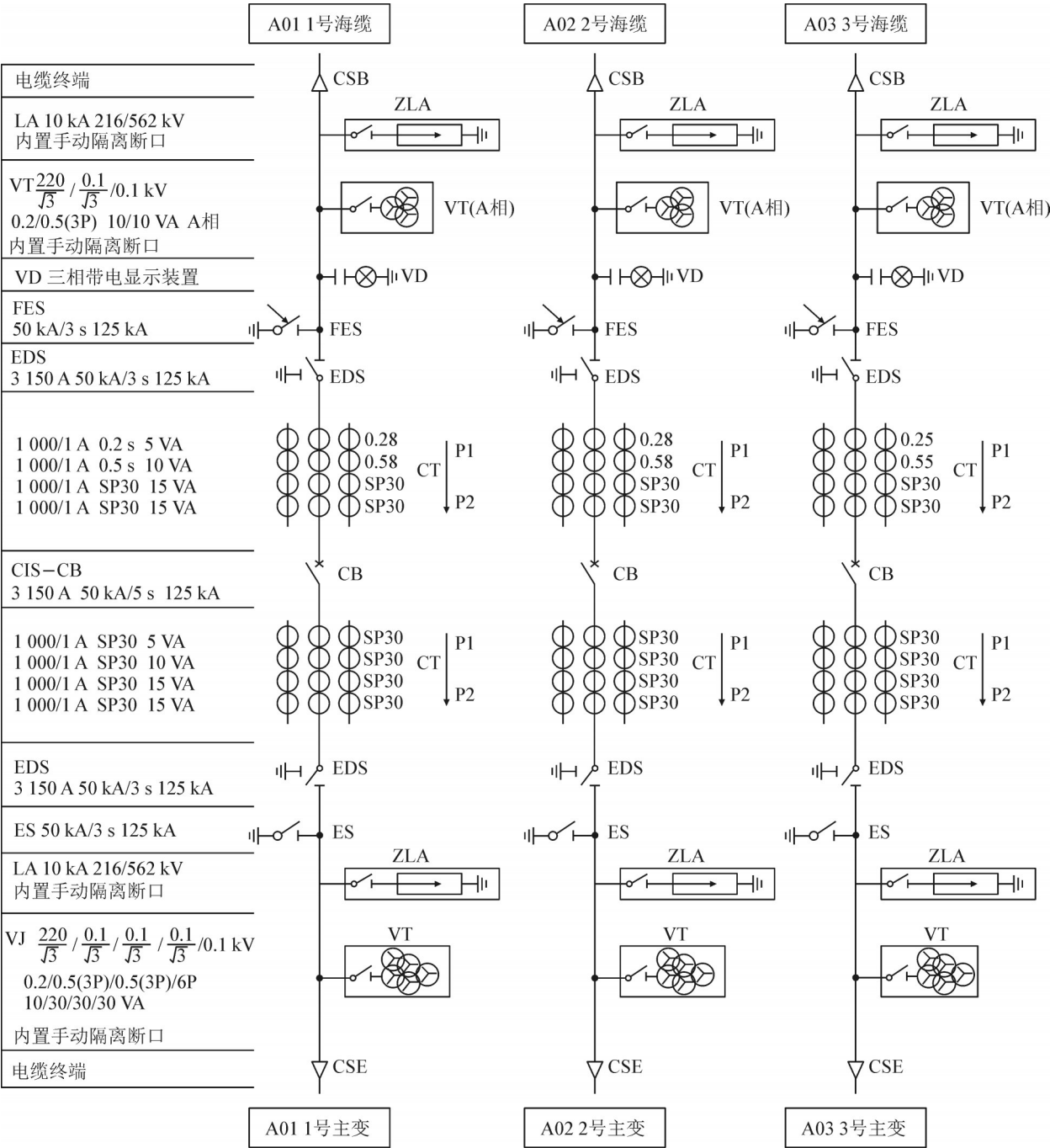


图1 广西某海上风电220 kV GIS主接线图
Fig. 1 Primary diagram of 220 kV GIS of one offshore wind power project in Guangxi

1.1 事故经过

2024年1月26日该风电场安装调试完成,准备正式送电。按送电操作规程,在风机正式发电前,先由陆上集控中心往海上设备倒送电,并对主变进行空载冲击(后面简称为空冲)5次。其中1号和2号线变组顺利完成主变空冲,进而使风机带电,风叶转动发电。但对3号线变组进行主变空冲时,第1次冲击保持25分钟无异常,当第2次冲击时,线变组中断路器零序差动保护启动跳闸,上端海缆依然带电。跳闸瞬间故障动作报告见图2,故障瞬间电压电流录波见图3,故障瞬间电流录波放大图见图4。



图2 故障瞬间动作报告
Fig. 2 Operation report at instant of fault

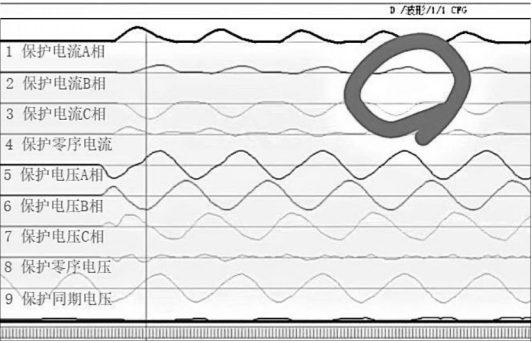


图3 故障瞬间电压电流录波图
Fig. 3 Voltage and current recording diagram at instant of fault

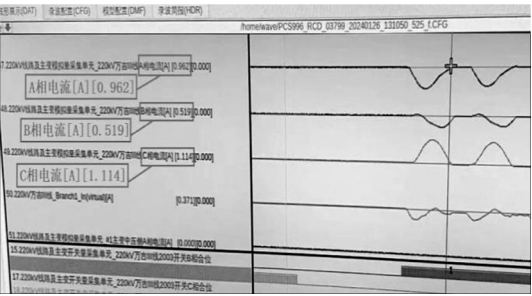


图4 故障瞬间电流录波放大图
Fig. 4 Current recording amplification diagram at instant of fault

1.2 事故分析

通过仔细查看故障录波图和故障动作报告,

专家们经过讨论分析,提出如下看法:

1)空变冲击时断路器差动跳闸,但海缆依然带电,说明从陆上集控中心直到海上升压站断路器侧所有设备无问题;

2)从图2看,确定故障相是B相,但B相电压59.83V,电压正常(电压互感器二次侧电压 $100\text{ V}/3=58\text{ V}$);

3)从图3看,B相励磁电流明显偏小,从图4放大图可读出二次侧A相励磁电流0.962A,B相励磁电流0.519A,C相励磁电流1.114A。从图1主接线电流互感器变比1000/1可知,A/B/C三相励磁电流分别为962A,519A和1114A,三相电流幅值不平衡程度最大达到47%;

4)空变冲击时三相励磁电流差异太大,造成三相电流不平衡,产生零序电流偏大,引发保护系统线路零序保护启动,断路器跳闸停电;

5)从图3和图4可见电压围绕零线,是正常正弦波波形,而三相电流波形均已偏至零线一侧,是非正常交流正弦波,同时存在励磁谐波,见图5,这是典型的空变励磁电流波形。

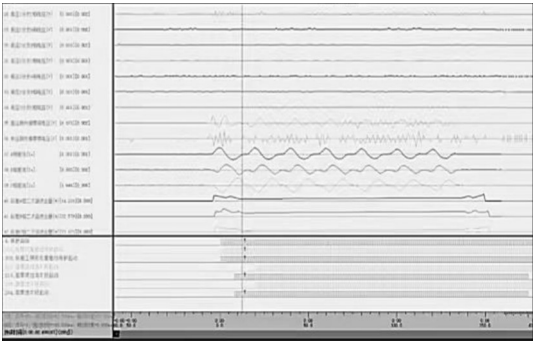


图5 励磁谐波波形
Fig. 5 Excitation current waveform

1.3 事故产生原因及措施

找出跳闸故障原因后,进一步分析合空变时产生三相励磁电流不平衡的原因。

因变压器铁磁涌流是由变压器铁心剩磁产生的,其剩磁幅值大小和相位是由上一次带电分闸后保留在铁心中,也与空合瞬间相位角有关,因此三相涌流大小是随机的^[4-8]。本次空冲1号变和2号变均无问题,而首次空冲3号变时也无问题,而第2次空冲时,B相铁心剩磁偏小,或者合闸瞬间线路电流相位正好与剩磁相位相反,幅值抵消,造成B相电流偏低,从而使得三相空载电流严重不平衡,引起零序电流偏大,超过整定值,造成零序差动保护启动^[9-10],引起断路器跳闸,送电失败。

空合变压器因变压器铁心剩磁而产生励磁涌

流,这是一种自然现象^[11-12]。本案例中,因三相励磁电流严重不平衡,进而造成零序电流保护启动是极罕见的,但却客观存在。一般要杜绝此类事故发生,较有效手段可采用断路器合闸选相装置^[13-15],但考虑成本,加之发生概率极小,工程上极少采用。

在本工程中,为了防止再次投运此类事故再次发生,进一步汇总跳闸瞬间各项数据进行分析。零序电流最大值 0.44 A,最小值 0.21 A,励流涌流持续约 100 ms;大于零序电流设定的启动保护电流 0.2 A,大于保护取值时间 50 ms。现场调整了零序保护启动参数;同时避免参数调整后造成短路差动不灵敏,保护系统增加了空合变压器差动速断功能^[16-17]。再次投运,顺利完成了 3 号主变 5 次空冲试验,项目送电成功。

2 浙江某海风电场主变开关跳闸事故介绍和分析

浙江某海上风电场项目装机容量 306 MW,安装 36 台 8.5 MW 风机,建造一座 220 kV 海上升压站,其中 GIS 为一串线变组接线,主接线见图 6。

2.1 事故经过

2024 年 3 月 20 日晚上 21 点 59 分,在对升压站主变进行空载冲击时,联络 1 线纵联差动保护动作,联络 1 线陆上侧开关、海上侧开关一起跳闸。

跳闸事件发生后,各部门积极响应,及时安排海上调试人员配合排查,进行 SF₆ 气体成分检测及其它排查,均无问题。专家组仔细研究了现场跳闸期间波形记录,根据其典型的电压和电流谐振波形图,并参考其它站所发生案例,基本确认这是一起典型的电容与电感的串联谐振案例。

2.2 原因分析

开关跳闸瞬间电压电流录波图见图 7,分析如下:

1) 首先确认该次跳闸事故并非绝缘失效引起的接地故障,三相电压均在 86 V~87 V(见图中△标记所指峰值),可以排除相间绝缘故障或对地绝缘故障,因为无论何种接地绝缘故障或相间绝缘故障,电压瞬间均降为 0。

2) 电压互感器二次电压应为 $100\text{ V}/\sqrt{3}=58\text{ V}$,现为 86~87 V, $87\div58=1.5$ (1.5 倍),电压升高。PT 在 1.5 倍电压下运行,按相关标准只能工作 30 s。好在保护系统快速跳闸断开,未造成电压互感器烧毁。

3) 图 8 是将图 7 电流波形放大,由图 8 可知,A 相、B 相电流已不是正弦波,C 相是高频,不是正常

20 ms,而是 10 ms 一个全波(对照上面时标 40 ms 和 80 ms)。

4) 线路谐振期间电压会升高,谐振期间电流会畸变,可能高频也可能低频,甚至波形偏一则,电流幅值也会变化,总之已非正弦波。以上特征从图 7 和图 8 中看一目了然。

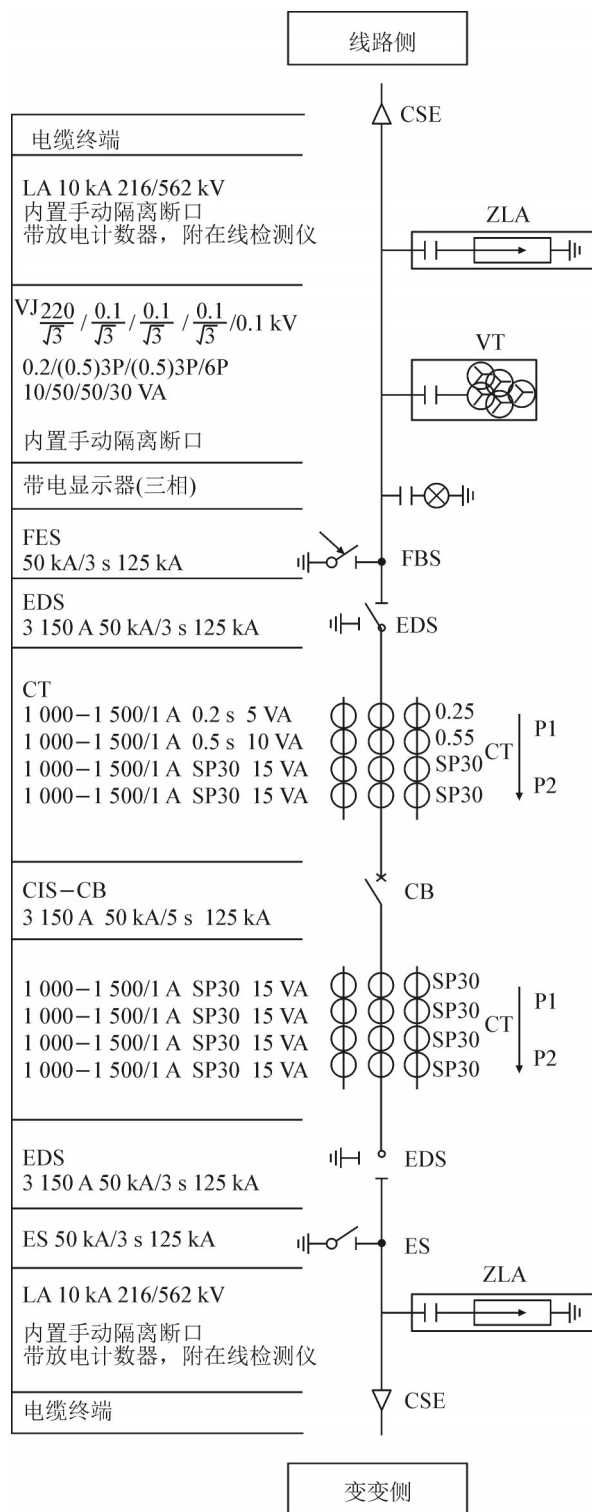


图 6 浙江某海上风电 220 kV GIS 主接线图
Fig. 6 Primary wiring diagram of 220 kV GIS of one offshore wind power project in Zhejiang

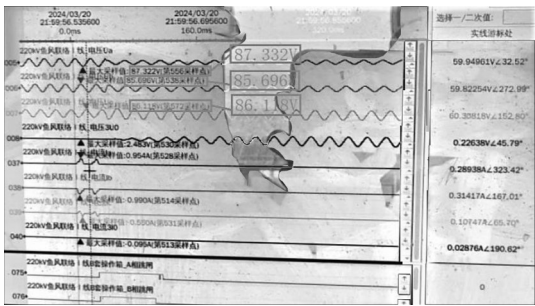


图7 开关跳闸瞬间录波图

Fig. 7 Waveform recording diagram at instant of switch tripping

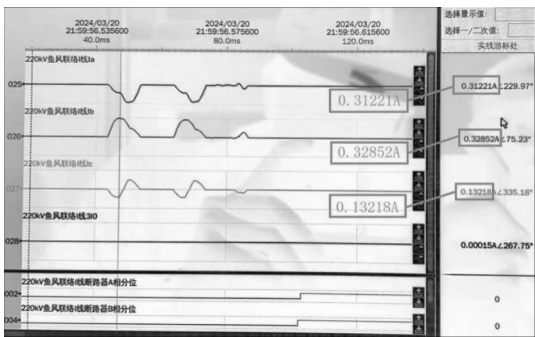


图8 放大的电流录波图

Fig. 8 Amplified current recording diagram

5) 从图8看,A相电流0.31A,B相电流0.33A,C相电流0.13A,从图6主接线可知电流互感器变比是1000/1,跳闸瞬间三相电流分别是A相312A,B相329A,C相132A,B、C相差值比例为 $329/132=2.5$ 倍。造成电流差动保护启动,开关跳闸。

6)引起串联谐振^[18-25]条件主要有2方面,一是空载或轻载时(即无电阻或极小),电容与电感参数匹配(由于线路已投运,已无法精确检测具体数值),该工程倒送电符合空载,长电缆等效电路模型是电容,电压互感器和变压器等效电路模型是电感。二是线路需扰动,断路器合闸就是典型扰动。另外,电缆电容是定值,电压互感器电感基本也是定值,但开关空合变压器时,其瞬间电抗相角幅值是随机的,是变量^[21-25],谐振参数恰好匹配十分偶然,这就是为何第2轮5次空冲均正常的原因。

7)电力线路谐振需要电容与电感匹配,一般电站线路电容量偏小,不足以与电压互感器和变压器电抗参数匹配,但海上风电有几十公里海缆连接海上升压站与陆上集控中心,本工程海缆长度近30公里,海缆所带电容量远超陆上站。

今后,只要线路有负荷(即电阻),合上开关,绝不可能产生谐振,因为即使电阻会消耗线路中电容或电感能量,也不会形成电容与电感来回无损耗振荡。电力线路谐振在35kV及以下中性点不接地系

统中经常发生,这是一种自然现象,一般在电压互感器副边侧加装消谐器解决^[23-26]。但在220kV电压等级中性点接地系统,发生线路串联谐振少之又少,也不采取加装消谐器措施,因为他会带来测量误差等弊端。其他如投运前避免增加变压器剩磁的不必要试验。同样有效手段可采用断路器合闸选相装置,但考虑成本,加之发生概率极小,工程上极少采用。

3 结语

在海上风电投运过程中,需从陆上集控中心往海上风机倒送电,启动风机转动,同时对变压器空冲试验,在这过程中要防止因变压器三相铁心剩磁差异,造成三相空载电流严重不平衡,从而产生较大零序电流,使得零序保护启动开关跳闸。同时倒送电过程中,由于海缆长达数十公里,较高的电容电流极易与变压器,电抗器及电压互感器电感参数匹配,从而产生线路谐振。本文通过介绍和分析两起海上风电发电项目首次投运失败的案例,告知人们在海上风电发电的特殊环境下,存在一些有异于陆上电站运行的特殊状况,应引起从事该行业相关人员重视。一旦在投运中遇到类似情况,可以快速准确判断原因,进而采取相应合适措施。

参考文献

[1] 李金帅,姜卫星,夏伟,等.海洋资源开发与生态环境保护存在的问题及建议[J].价值工程,2024,43(34):145-147.
LI Jinshuai,JIANG Weixing,XIA Wei,et al. Problems and suggestions in marine resources development and ecological environment protection [J]. Value Engineering, 2024,43 (34): 145-147.
[2] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao,ZHAO Yong,ZHAO Liang,et al. Study on low Carbon energy transition path toward Carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (5): 1663-1672.
[3] 李芷晴,王学梅,冯俊杰,等.海上风电并网系统中高频阻抗建模与谐振特性分析[J/OL].电网技术,1-16[2024-12-09].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1492.
LI Zhiqing,WANG Xuemei,FENG Junjie,et al. Mid- and high-frequency impedance modeling and resonance characteristics analysis of offshore wind farm [J/OL]. Power System Technology, 1-16 [2024-12-09]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1492.
[4] 吴明,余振,郭强,等.一种串联限流电阻的变压器励磁

- 涌流抑制技术[J]. 宁夏电力, 2024(5): 43-48.
- WU Ming, YU Zhen, GUO Qiang, et al. A transformer excitation inrush current suppression technique using series current-limiting resistors[J]. Ningxia Electric Power, 2024(5): 43-48.
- [5] 宋军. 变压器励磁涌流机理及抑制策略研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
- [6] 李珂, 刘之畅, 屈建宇, 等. 基于环流相似度的变压器零模涌流识别与零序保护方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 54-64.
- LI Ke, LIU Zhichang, QU Jianyu, et al. A zero-mode inrush current identification and zero-sequence protection method for transformers based on circulation similarity[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(4): 54-64.
- [7] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
- CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [8] 宋曦, 王蔚, 张明栋, 等. 基于简化模型的变压器励磁涌流计算方法[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2024, 25(2): 274-280.
- SONG Xi, WANG Wei, ZHANG Mingdong, et al. Calculation method of transformer inrush current based on simplified model[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2024, 25(2): 274-280.
- [9] 吴嘉琪, 李晓华, 陈忠, 等. 考虑磁滞特性变压器PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真建模方法及励磁差异性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1543-1551.
- WU Jiaqi, LI Xiaohua, CHEN Zhong, et al. A transformer model with hysteresis characteristics for electromagnetic transients based on PSCAD/EMTDC and excitation difference analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1543-1551.
- [10] 翁汉琨, 刘华, 林湘宁, 等. 基于Hausdorff距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483.
- WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.
- [11] 焦在滨, 马涛, 屈亚军, 等. 基于励磁电感参数识别的快速变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2014(10): 1658-1666.
- JIAO Zaibin, MA Tao, QU Yajun, et al. A novel excitation inductance-based power transformer protection scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(10): 1658-1666.
- [12] 肖湃, 张海龙, 杜志叶, 等. 特高压换流变压器励磁涌流选相合闸抑制方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 146-153.
- XIAO Pai, ZHANG Hailong, DU Zhiye, et al. Research on phase selection closing suppression method of exciting inrush current of UHV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 146-153.
- [13] 马云龙, 李秀广, 周秀, 等. 基于高压真空快速断路器的变压器励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 136-142.
- MA Yunlong, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Research on excitation inrush current suppression technology of transformer based on high voltage vacuum fast circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 136-142.
- [14] 李海涛, 董辉波, 邓劲东, 等. 断路器选相投切系统在换流站中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(9): 121-126.
- LI Haitao, DONG Huibo, DENG Jindong, et al. Research on application of circuit breaker controlled switching system in converter station[J]. Process Automation Instrumentation, 2024, 45(9): 121-126.
- [15] 倪辉, 窦俊廷, 于家英, 等. 断路器选相合闸技术应用综述与展望[J]. 宁夏电力, 2024(3): 28-34.
- NI Hui, DOU Junting, YU Jiaying, et al. Overview and prospects of controlled closing technology in circuit breakers: a comprehensive review and future outlook[J]. Ningxia Electric Power, 2024(3): 28-34.
- [16] 宋军. 变压器励磁涌流机理及抑制策略研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
- [17] 王业, 陆于平, 蔡超, 等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014(4): 702-711.
- WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(4): 702-711.
- [18] 陈根, 赖武. 500 kV主变异常跳闸的原因分析及处理[J]. 电工技术, 2024(16): 200-202.
- CHEN Gen, LAI Wu. Cause analysis and handling of abnormal tripping of 500 kV main transformer[J]. Electric Engineering, 2024(16): 200-202.
- [19] 刘根根, 李英, 张向阳, 等. 几起典型电力系统谐振案例分析[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 282-292.
- LIU Gengen, LI Ying, ZHANG Xiangyang, et al. Analysis of several typical resonance cases in power system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 282-292.
- [20] 胡智敏, 胡海涛, 李朝阳, 等. 基于自适应步长的电力系统谐波谐振快速分析方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 165-173.

- HU Zhimin, HU Haitao, LI Chaoyang, et al. Fast analysis method for power system harmonic resonance based on adaptive step sizes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 165-173.
- [21] 吴九福. 35 kV 电力系统铁磁谐振治理研究及应用 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31 (4): 7-8.
- WU Jiufu. Research and application of ferromagnetic resonance mitigation in 35 kV power system [J]. Instrumentation Users, 2024, 31 (4): 7-8.
- [22] 邵冰冰, 向念文, 王书来, 等. 电力系统广义模式谐振分类及研究现状 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (19): 7515-7531.
- SHAO Bingbing, XIANG Nianwen, WANG Shulai, et al. Classification and research status of power system generalized modal [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (19): 7515-7531.
- [23] 江道灼, 毛航银, 敖志香, 等. 串联谐振式限流器的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 153-158.
- JIANG Daozhuo, MAO Hangyin, AO Zhixiang, et al. Simulation study of series resonance type fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 153-158.
- [24] SHAWN H, THOMAS B. Improvement of power quality by means of fault current limitation [C] // Proceedings of the Thirty-sixth Southeastern Symposium Atlanta, USA: IEEE, 2004, 280-284.
- [25] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 99-106.
- WANG Huaxin, XI Hexun, TANG Guangfu, et al. Application research of fault current limiter on the EHV grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 99-106.
- [26] 娄杰, 李庆民, 肖茂友, 等. 基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 80-83.
- LOU Jie, LI Qingmin, XIAO Maoyou, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83.
- 作者简介:**
- 刘根根(1947—), 男, 高级工程师, 主要从事高压开关设计工作。E-mail: liugengen50@163.com。
- 魏俊梅(1973—), 女, 正高级工程师, 主要从事高压 GIS 研发及仿真。
- 白伟(1989—), 男, 助理工程师, 主要从事 GIS 一次设计工作。