

新能源发电工程技术 应用与实践

华能国际电力江苏能源开发有限公司 编
华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑：丁琪 李莉

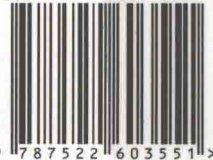
微信号：Waterpub-Pro



唯一官方微信服务平台

销售分类：能源与动力工程

ISBN 978-7-5226-0355-1

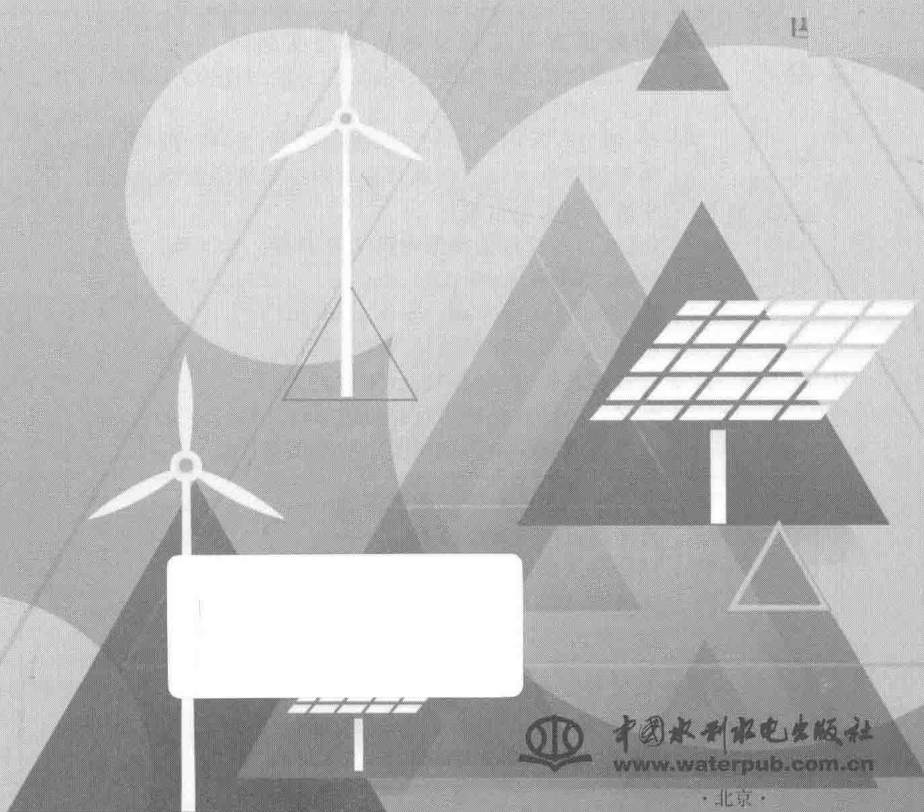


9 787522 603551 >

定价：72.00 元

新能源发电工程技术 应用与实践

华能国际电力江苏能源开发有限公司 编
华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书收集了近期新能源发电工程技术应用和实践中积累的经验和研究成果,包括电气、控制、施工、运行、机务、管理六个方面,展示了新能源发电工作者各类技术应用和实践经验,为广大新能源发电专业从业人员加强学术交流、拓宽建设与管理思路提供参考,更好地适应当前新能源行业的蓬勃发展。

本书适合于从事新能源发电行业的技术人员和管理人员参考、阅读。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电工程技术应用与实践 / 华能国际电力江苏能源开发有限公司, 华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2021. 12

ISBN 978-7-5226-0355-1

I. ①新… II. ①华… ②华… III. ①新能源—发电—文集 IV. ①TM61-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第267072号

书 名	新能源发电工程技术应用与实践 XIN NENGYUAN FADIAN GONGCHENG JISHU YINGYONG YU SHIJIAN
作 者	华能国际电力江苏能源开发有限公司 编 华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17印张 342千字
版 次	2021年12月第1版 2021年12月第1次印刷
定 价	72.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《新能源发电工程技术应用与实践》

编 委 会

总 顾 问	曹庆伟	齐革军	边 防		
主 编	陈晓路	杭兆峰	钱开荣		
副 主 编	姚中原	刘溟江	管春雨	杨立华	牛晨晖
	张 宇				
编写人员	周国栋	邵斌田	严祺慧	李必辉	袁 辉
	张诗雨	彭泳江	刁新忠	周小兵	宋慧慧
	单 峻	戴 乐	吴 凯	孙小军	晏伟军
	刘立勋	陈佳志	白 亮	王玉斌	张 颖
	李 冬	姜 东	施俊佼	孙 捷	胡 皓

前 言

能源是经济社会发展的重要物质基础。2020年9月22日，习近平总书记指出“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。为实现这一目标，大力发展技术成熟并具备商业化应用价值的可再生能源是实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。

风能是目前可再生能源中发展最快、技术最为成熟，具有大规模开发和商业化前景的能源。发展风力发电可促进优化能源结构，保障能源安全，缓解能源利用造成的环境污染，是推动国家能源经济变革的重要选择。我国风能资源丰富，在“十三五”期间，海上风电发展明显提速，从2015—2020年，年平均增长速度达到60%，到2020年年底累计装机容量首次突破1000万千瓦，并网装机容量900万千瓦，提前完成“十三五”规划目标。

为促进风力发电建设更好更快发展，本书编委会结合风电场建设运维实例，从现场施工建设、运维消缺、技术改造中的实际问题入手，总结了电气、控制、施工、运行、机务、管理六个方面的宝贵经验，为广大新能源发电人员加强学术交流、拓宽建设与管理思路提供参考。

本书在编写过程中得到了中国华能集团有限公司资助，中国华能集团有限公司能源研究院、华能国际电力江苏能源开发有限公司的专家对本书给予了大力支持和帮助，华能江苏清洁能源分公司的工程、运维技术人员提供了宝贵的资料，并参加了编写工作，在此一并谨表谢意！

随着新能源发电技术的高速发展进步，本书在编写过程中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

编委会

2021年11月

目 录

前言

电 气 篇

风电场无功补偿装置 SVG 频繁故障的原因探究	赵剑剑	陈宁路	车星玮	3
华能如海风电场北区大孤岛试验总结	宋慧慧			9
华能大丰海上风电场风电机组限位开关处理	季笑			21
海缆接头制作研究	吴昶剑			26
箱式变压器远程操作改造方案研究与实践	张宇	赵剑剑	周峰峰	32
风电场 35kV 母线电压互感器柜 B 相高压熔断器异常故障处理分析	李鑫鑫			44
变速风电机组并网对系统电压稳定性的影响	周峰峰	何才炯	阮克俭	49

控 制 篇

风电机组参数优化统计分析	沈明强	贺艳红		59				
关于丘陵地带风电机组切入切出及偏航次数过多问题的分析与优化	赵剑剑	吴凯	林秀腾	孔超	张旭光	刘网海	许杰	66
风电机组主控改造前后对比分析及相关问题研究	陈正华							78
风向测量优化方案研究	张宇	彭泳江						84
变频器功率不能满发的处理方法	翟高菠	徐琪	刘博					89
风电机组控制系统改造研究	韩斯琪	季笑	廖重棋					93
单台风电机组尾流特性研究	刘博							99
展向振动对叶片升阻特性影响研究	严祺慧							109
双馈风力发电系统的建模与仿真	秦雪妮							127

施 工 篇

海上风电场无过渡段单桩基础超大直径钢管桩沉桩工艺技术研究	朱亚波	马强	宋慧慧					141
海上风电单桩基础护底砂被整体铺设工艺技术研究	朱亚波	周小兵	王玉斌					153
灌浆封隔器安装工艺优化	宋慧慧							162

运 行 篇

风电远程监控中心数据优化提升的探讨	陶 伟 陈 磊 严祺慧 秦雪妮	169
风电场变频器参数优化后评估分析	李鑫鑫 蒋 宁 王有超 陈佳志	176
拟合风电机组实际功率曲线合理化计算弃风电量	姜 东	195
基于多气象源多时间尺度风功率预测技术研究及应用	姜 锂	202

机 务 篇

海上风电机组大直径单桩竖向承载力试验成果分析	马 强 朱亚波 周小兵	211
海上单桩风电机组桩内防毒防腐探讨与应用	刁新忠	216
海上风电钢结构腐蚀检测方法与实践	陶 伟	222
风电机组齿轮箱油温高问题分析及应对措施	陆界屹	231

管 理 篇

规范用海管理对海上风电项目影响与对策初探	邵斌田	237
风力发电的运维一体化分析	黄宁波	242
陆上风电场工程安全文明施工标准化管理	唐 程	248

电气篇



风电场无功补偿装置 SVG 频繁故障的原因探究

赵剑剑 陈宁路 车星玮

(华能盐城大丰新能源发电有限责任公司, 江苏 盐城 224100)

【摘要】 本文主要以华能盐城大丰新能源发电有限责任公司在运的静止型无功补偿装置 SVG 为例, 分析了 SVG 模块故障, 研究了 IGBT 内部短路的原因, 探讨 IGBT 可能受应力的来源, 对 SVG 故障处理及保障 SVG 正常运行提供一定的参考价值。

【关键词】 风力发电; SVG; IGBT; 应力

由于受到设备、技术等因素的影响, 风力发电过程中有着一定的波动性、间歇性, 并且在风电并网运行环节中的系统稳定性较差, 发电质量得不到有效保障。SVG 静止无功发生器采用可关断电力电子器件 (IGBT) 组成自换相桥式电路, 经过电抗器并联在电网上, 适当地调节桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位, 或者直接控制其交流侧电流, 即 SVG 可以迅速吸收或者发出所需的无功功率, 实现快速动态调节无功的目的。作为有源型补偿装置, SVG 不仅可以跟踪冲击型负载的冲击电流, 而且可以对谐波电流也进行跟踪补偿, 有效地提高风力发电质量。对此, 笔者根据华能大丰海上风电场 SVG 的故障情况, 研究分析了相关的故障处理及隐患预防措施。

1 引言

华能大丰海上风电场位于江苏省盐城市大丰区东侧毛竹沙海域, 场区形状呈不规则四边形, 中心离岸距离约 55km, 海域面积约 127km², 海底表层以粉土、粉砂为主, 属滨海相沉积地貌单元。风电场配套建设一座 220kV 陆上开关站和一座 220kV 海上升压站, 陆上开关站位于江苏盐城大丰港区竹港新闸北 100m, 海上升压站及风电机组位于大丰市海域的毛竹沙。陆上开关站配套有 3 台思源清能 QNSVG-38/35-W 型 SVG, 为直挂 35kV 型水冷 SVG 设备, 额定补偿容量为 38Mvar。华能大丰海上风电场 SVG 设备如图 1 所示。

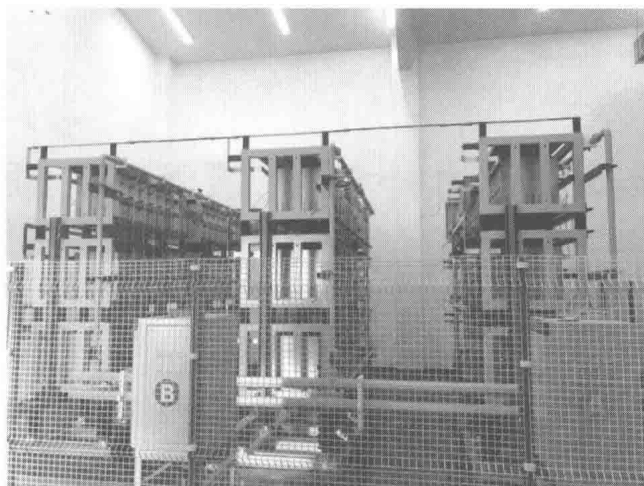


图1 华能大丰海上风电场 SVG 设备

2 问题描述

华能大丰海上风电场自 2018 年 12 月送电以来,至 2020 年 3 月, #1SVG 共发生故障 12 次,其中有 10 次是模块链接故障,但每次故障模块不同,严重影响了风电场的安全产生。运维人员为保证设备稳定运行,对 #1SVG 故障进行了全面细致的分析,并开展了多次维修改造。

例如,某次 #1 SVG 302 开关故障后,运维人员到达现场检查后发现确认 302 开关已跳闸,水冷系统停运。#1 SVG 控制柜显示跳闸首出为“A3 连接故障”,如图 2 和图 3 所示。



图2 故障信息

电压		各种管电压 (V)												运行禁闭		
SVG	828	823	870	828	823	823	823	823	823	823	823	823	823	823	运行禁闭	运行禁闭
	823	823	828	828	823	833	828	828	828	828	828	828	828	828	数据显	数据显
	833	828	833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	状态显	状态显
B相	808	813	808	808	808	808	808	808	808	808	808	808	808	808	参数设置	参数设置
	802	802	802	808	802	802	802	802	802	802	802	802	802	802	主控操作	主控操作
	808	802	802	808	802	802	802	802	802	802	802	802	802	802	事件记录	事件记录
C相	751	756	756	756	751	751	751	751	751	751	751	751	751	751	用户管理	用户管理
	751	751	751	751	751	751	745	751	751	751	751	751	751	751		
	751	751	751	756	756	756	756	756	751	751	751	756	751	756		

图3 链节直流电容电压

3 技术分析

针对 #1SVG 出现多次模块链接故障,从模块内部器件、控制柜、通信光纤、

冷却系统等各方面综合分析考虑，判断可能有以下两种故障原因。

3.1 模块内部 IGBT 内部短路

对现场的故障模块进行了检测，同时随机抽取两个从未发生过故障的模块，进行检测对比分析。

根据现场的“直流欠压”“直流过压”等故障信息，结合模块内部器件检查结果，初步判定为 IGBT 出现过流短路故障，导致直流电压升高，IGBT 损坏。

运维站对随机抽取的 A15 正常模块进行 IGBT “双脉冲测试”。在测试时发现 A15 模块第二次关断时，门极有一个突变电压，约 5V（正常时应为 3V 左右），如图 4 所示。

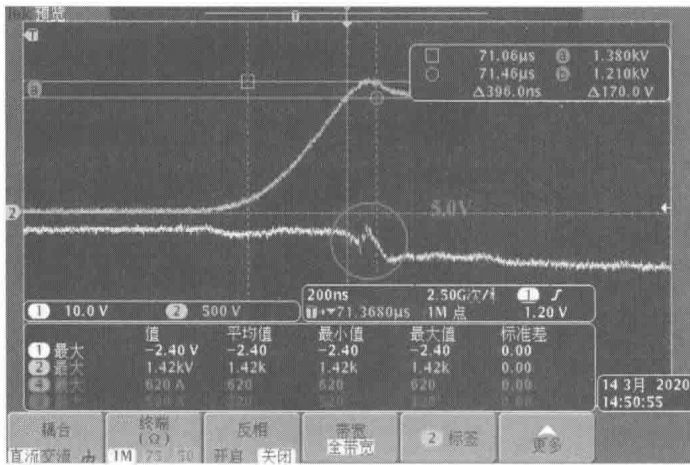


图 4 A15 模块测试结果

发现问题后又对 A15 模块进行了单脉冲测试，出现有源钳位动作，门级振荡，峰值为 30V。判断是门级探头受干扰所致，如图 5 所示。

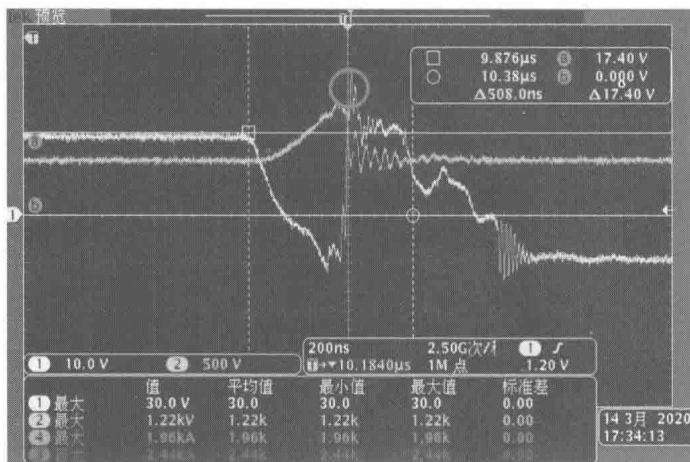


图 5 A15 模块单脉冲测试

拆开 A15 模块，对内部 IGBT 进行检查，发现左桥臂 IGBT 的门级引脚有受应力情况，如图 6 所示。

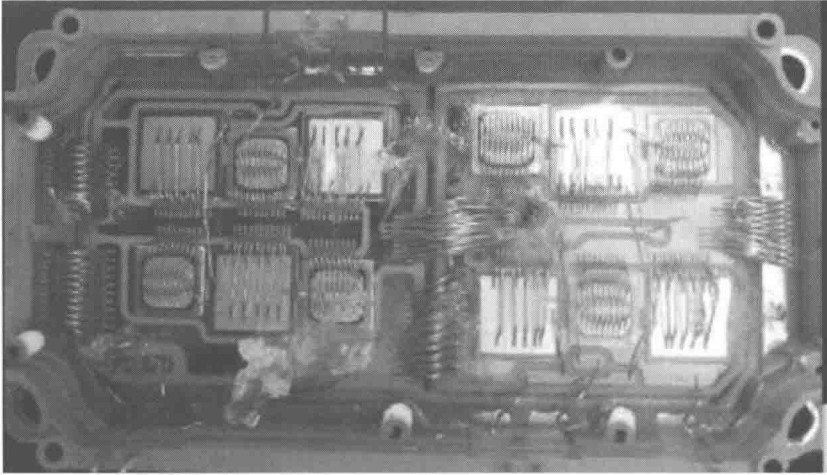


图 6 A15 模块门级引脚有明显受应力痕迹

更换 A15 左桥的 IGBT 后再重新进行测试，未出现门极异常干扰震荡情况。通过 A15 模块的检测过程，结合故障模块的故障情况，判断模块故障原因是 IGBT 受应力影响，导致 IGBT 门极存在异常干扰震荡，脉冲异常引发 IGBT 内部短路出现过电流，最终烧坏 IGBT。

应力会改变硅材料的禁带宽度和迁移率，从而导致硅半导体器件特性的变化，IGBT 结构较复杂，应力施加平面栅 IGBT 结构后的特性变化如图 7 所示。

如果表面是平整的，硅材料也可视为刚性体，器件某一点受到外力作用，将会传导到器件内部。如果器件结构复杂（如多层材料结构），材料层存在不连续性，则有可能发生应力集中。在应力集中导致材料特性发生变化的同时，器件特性也受到影 响，当应力达到一定程度后，输出电流也显著增加，如图 8 所示。

IGBT 的应力来自于芯片工艺、封装工艺、运输过程、模块安装和模块使用等多个环节。芯片工艺和封装工艺过程中产生的应力主要是由于工艺过程中导致的表面形貌不连续以及热膨胀系数的失配所致，封装成模块之后进行的一系列型式试验将检验内部的应力水平，正常情况下几乎不会出现芯片工艺和封装工艺产生的应力问题。

判断最可能发生应力变化的过程为运输、模块安装及使用过程。运输中 IGBT 放置不合理，IGBT 器件的端子受到强外力或振动，就会产生应力，造成门极引脚受应力发生变形或 IGBT 器件内部电气配线损坏。后期运行过程中的不均匀热胀冷缩可能造成引脚进一步开裂，使得使用中的输出 IGBT 电流大幅度增加，击穿门极后发生故障。IGBT 模块在使用过程中需经历频繁的开关过程，这会造成模块形状随着温度的

变化而变化，应力会随着变形而进一步增大，应力大的地方电流密度会更高，从而造成设备费损坏故障。

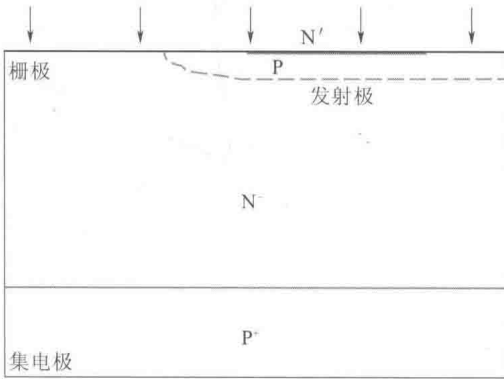


图 7 IGBT 结构以及应力施加

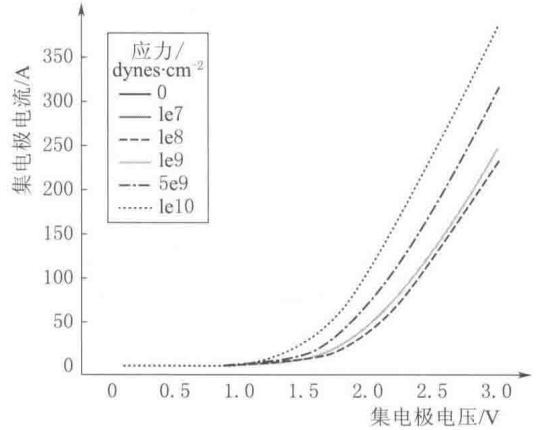


图 8 不同应力下 IGBT 的输出特性

3.2 控制器采样计算存在隐患、控制信号存在干扰或接触不良

SVG 的驱动板主要功能是接收控制屏触发单元的触发信号，对触发信号解码后控制驱动模块驱动相应 IGBT 触发，从而测量直流电容电压，检测驱动板、IGBT、直流电容运行状态，通过光纤传输到控制屏监控单元，接收控制单元的放电命令对直流电容进行放电，控制功率单元电压处于稳定状态，如图 9 所示。驱动板控制器采样计算和脉冲信号触发部分若存在隐患，控制信号及通信部分若存在干扰或接触不良，也会导致模块脉冲信号紊乱，IGBT 直流电压输出异常，导致 IGBT 模块故障。

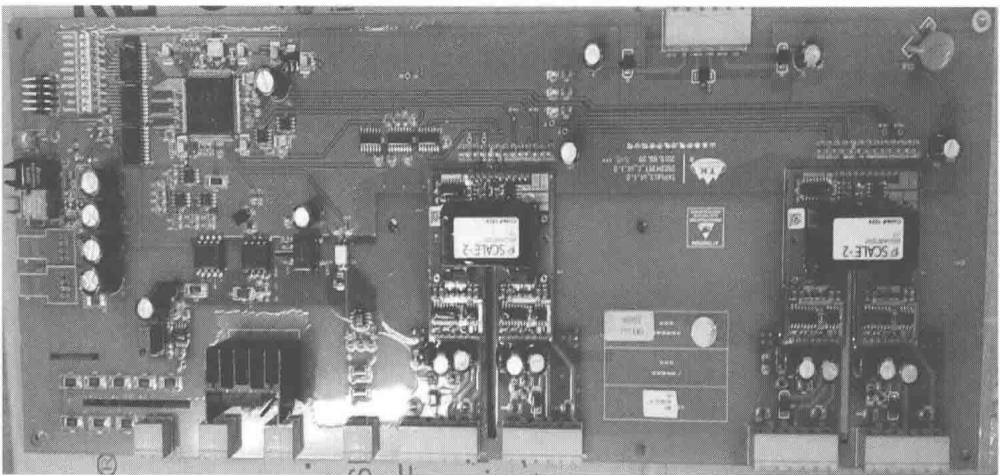


图 9 SVG 驱动板

4 处理意见及预防措施

针对华能大丰海上风电场 #1 SVG 频繁故障后的分析,现场主要的处理方式如下:

(1) 下架检测 #1 SVG 所有模块,判断是否仍有 IGBT 受应力影响的情况,并对受影响的 IGBT 进行更换。

(2) 更换 #1 SVG 主控制器。

(3) 更换 #1 SVG 主控柜至采集盒、主控柜至分相控制柜、分相控制柜至采集盒以及分相控制柜之间的通信光纤。

(4) 更换 #1 SVG 分相控制柜至模块黑色光纤 117 对。

(5) 为了更好地发挥水冷系统的散热效果,基于历史运行记录、故障情况等,将 SVG 水冷系统散热风扇电机启动温度降低 3°C 。

本案例中的 SVG 故障对华能大丰海上风电场的正常运行造成严重的不良影响,SVG 频繁跳闸使无功功率多次失去调节能力,电网调度对该风电场也多次警告要求。故而,在 SVG 该类型的故障上应做好相应的预防措施:①强化 IGBT 芯片制造、封装过程中的工艺要求;②对运输过程中,应将门极驱动用的印刷基板固定;③为防止电气配线用的正负导体间有高低差造成 IGBT 的端子处于不断承受向上拉伸应力的状态,从而导致 IGBT 内部的电气配线断线问题出现,可加入导电性的衬垫使平行导体间的高低差消失。

5 结语

本文对风电场 SVG 模块频繁故障的原因进行了分析,找到了相关的故障根源,探究了应力对 IGBT 本身可能造成的严重损害,给出了处理意见和应对的预防措施,解决了无功补偿装置 SVG 的该种特定问题,为后续新投风电场站提供了技术意见和案例经验。

参 考 文 献

- [1] 江冰松 唐龙谷. 应力对 IGBT 电性能的影响及应力来源研究 [J]. 大功率变流技术, 2015 (2): 67-70.
- [2] 陈明. 高温功率循环下绝缘栅双极型晶体管失效特征及机理分析 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (4): 119-126.

华能如海风电场北区大孤岛试验总结

宋慧慧

(华能如东八仙角海上风力发电有限责任公司, 江苏 南通 226408)

【摘要】 如果海上风电场的海缆出现故障, 将在较长一段时间内不能给风电机组供电, 很可能对风电机组内部的环境造成破坏, 对电气设备的寿命造成影响。同时, 当风电机组倒送电前或停机再启动前的调试阶段, 可采用大孤岛柴油发电机送电对风电机组进线调试维护, 避免了传统模式下用船电逐台调试启动的麻烦, 减少了风电机组调试启动的时间周期, 提高了发电效率。

【关键词】 大孤岛运行; 柴油发电机; 零起升压; 无功补偿

1 试验背景

如海风电场安装了 50 台单机容量为 4MW 风电机组和 20 台单机容量为 5MW 风电机组, 总装机容量为 300MW。风电场配套建设 2 座 110kV 海上升压站及 1 座 220kV 陆上升压站, 风电场 70 台风电机组所发电力由 12 条集电线路 (35kV 海缆) 就近汇集送至南区和北区 110kV 海上升压站 35kV 配电装置, 并经海上升压站升至 110kV 后, 北区 110kV 海上升压站经 1 回 110kV 海缆接至南区 110kV 海上升压站, 南区 110kV 海上升压站经 2 回 110kV 海缆送至陆上 220kV 升压站, 并经陆上升压站升至 220kV 后送至电网。

因考虑到北区至南区海上升压站只有一回 110kV 海缆连接, 可靠性相对较低, 如果海缆出现故障将在较长一段时间内不能给风电机组供电, 很可能对风电机组内部的环境造成破坏, 对电气设备的寿命造成一定影响。同时当风电机组倒送电前或停机再启动前的调试阶段, 可采用大孤岛柴油发电机送电对风电机组进线调试维护, 避免了传统模式下用船电逐台调试启动的麻烦, 减少了风电机组调试启动的时间周期, 提高了发电效率。故采用大孤岛运行模式更为安全和高效。因此, 在失电的情况下除了给海上升压站站内设备供电配备的小型柴油发电机 (500kW) 以外, 还给风电场北区 34 台风电机组 (6 条集电线路) 的加热除湿配备了 800kW 的大型柴油发电机作为供