

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.19.008

酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析

汪宁渤, 马彦宏, 丁 坤, 周识远, 周 强

(甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃省兰州市 730050)

摘要: 酒泉风电基地大规模脱网事故频发, 对电力系统安全稳定运行造成了较大的影响, 引起了国内外广泛关注和热议。以大规模脱网事故的实测资料为基础, 针对酒泉风电基地规划、建设和管理等方面的具体情况, 详细分析了酒泉基地事故频发的直接、间接和系统原因, 从规划、管理、政策、标准和科技等方面提出了应对措施。

关键词: 风力发电; 风电机组脱网; 安全稳定; 应对措施; 电力系统

0 引言

酒泉是国家批准开工建设的第 1 个千万千瓦级风电基地, 截至 2011 年底, 甘肃全省并网运行的风电总装机容量为 5.703 GW, 占全省发电总装机容量的 20.4%, 其中, 酒泉风电基地并网风电装机容量为 5.223 GW^[1], 成为全世界集中并网规模最大的风电基地之一。在风电并网容量不断增加的同时, 酒泉风电基地也进入了事故的高发期, 截至 2011 年 5 月底, 酒泉风电基地风电场累计发生事故 53 次^[2], 明显进入了风电场事故的高发期, 除了“4·25”事故是电网事故波及风电场以外, 其他事故均是风电场事故影响到电网。其中, 风电机组脱网数量超过 100 台、影响范围较大的事故 7 次, 尤其是“2·24”事故以来发生的 3 次严重脱网事故, 分别甩风电出力 840, 1 006, 1 535 MW, 不断刷新风电机组脱网事故纪录。如此大规模风电机组集中脱网, 不仅导致电力系统电压、频率大幅度波动, 而且直接威胁到电力系统的安全稳定运行。

国家电力监管委员会专门组织开展了酒泉风电基地脱网事故调查, 发布了事故调查报告和事故情况通报; 风电企业、制造企业、电网公司组织分析原因, 寻找对策。酒泉风电脱网事故也引起了国内外广泛关注与热议。在此结合酒泉风电基地的具体情况, 从技术、管理、政策、体制和机制等不同角度, 进一步研究探索酒泉风电基地事故频发的直接、间接和系统原因, 同时提出应对措施。

1 直接原因分析

1.1 电缆头安装质量问题突出

2011 年 1 月以来, 酒泉风电基地发生的 53 次事故中, 风机馈线电缆头故障造成跳闸 27 次, 占酒泉风电基地所有故障的 51%^[2]。除此之外, 还存在虽然电缆头短路但没有造成跳闸的情况, 另外, 还有部分电缆头缺陷被及时发现而没有造成故障, 如果计及这些, 则风电场风机馈线电缆头缺陷、短路故障次数远大于 27 次。不同风电场风机馈线电缆头如此频繁地发生相同故障, 反映出风电场电缆头施工、监理、验收和建设管理普遍存在的不足。这种共性的设备缺陷是导致风电场事故频发的必然原因。

1.2 发电机组不具备低电压穿越能力

根据风电场并网技术规范的要求, 风电机组应该满足电压跌落到额定电压的 20% 时维持 625 ms 不脱网。酒泉风电基地接入系统设计批复明确提出了低电压穿越能力要求, 在酒泉风电基地的风电机组补充技术协议中进一步明确了该技术要求, 风电企业也做出具备低电压穿越能力的承诺。但 2011 年以来, 所有事故电压跌落幅度均远远低于规范的要求, 却已经造成了大量风电机组脱网事故。多次事故证明, 绝大多数风电机组根本不具备低电压穿越能力, 这是导致单个风电场事故演变为风电机组大规模脱网事故的必然原因。“2·24”桥西风电场事故过程示意图^[3]见附录 A 图 A1。

1.3 动态无功补偿设备存在缺陷

酒泉风电基地风电场均分别安装了晶闸管相控电抗器(TCR)、磁控电抗器(MCR)和静止无功发生器(SVG)型动态无功补偿设备, 但“2·24”事故时, 风电场动态无功补偿设备动态部分一半以上无法正常投运, 仅投入了电容部分(FC 滤波支路)^[3]。当部

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-05-28。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A104); 甘肃省科技计划资助项目(1002GKDA009, 1009GTGA024)。

分风电机组因为低电压脱网时,该部分风电场无功补偿设备与风电汇集线路同时向系统注入大量容性无功功率,导致电力系统电压大幅度升高。当系统电压超过额定电压的 110% 时,低电压时未脱网的部分风电机组几乎同时脱网,风电场动态无功补偿设备不完善是导致脱网事故扩大的主要原因^[3]。发生事故时恰好无功补偿设备投入不足,虽具有偶然性,但无功补偿设备缺陷较多又具有一定的必然性。桥西风电场 330 kV 升压站电压变化曲线^[3]见附录 A 图 A2。

1.4 其他直接原因

另外,风电场投产初期通常也是事故的高发期,酒泉风电基地大多数风电场都经历了故障频发到逐步稳定的过程,但以前风电总规模较小且分期投入运行,尽管也发生过一些问题,但没有造成大的影响。2011 年以来,酒泉风电基地风电场集中投产,短时期内 2 000 多台风电机组几乎同时并网投产,并且大部分风电机组集中在 750 kV 敦煌变电所的 330 kV 母线一个并网点,在风电事故高发的同时风电场又相互影响,导致不仅事故频发而且脱网机组数众多。750 kV 敦煌变电所 330 kV 母线电压变化曲线^[3]见附录 A 图 A3。

1.5 小结

风电场普遍存在的馈线电缆头安装质量问题,电缆头频繁爆炸和馈线小电流选线保护功能配置问题,必然导致风电场事故频发;由于风电机组普遍不具备低电压穿越能力,个别风电场发生故障引起电压跌落导致附近风电机组大批同时脱网,是集中脱网事故频发的直接原因;风电场动态无功补偿设备仅投入容性部分或未投入,使得电力系统电压大幅度升高,导致大量风电机组高电压脱网,是事故扩大化的主要原因。

2 间接原因分析

2.1 技术标准缺失

2005 年依据当时国内小规模、分散式的风电发展状况,颁布了中国第 1 个风电场接入电网的技术规定——GB/Z 19963—2005。伴随着《中华人民共和国可再生能源法》的颁布实施,中国风电连续 6 年高速发展,到 2011 年底,中国风电的总装机容量已经成为世界第一,达到 62.733 GW^[4],GB/Z 19963—2005 已经根本无法满足大规模集中开发的风电发展技术需求,中国风电在高速发展的同时不得不面临着技术标准缺失的尴尬局面。2011 年底,修改后的国家标准 GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》才正式颁布,并已于 2012 年

6 月开始执行,有助于缓解技术标准和管理规范缺失的矛盾。

2.2 风电基础管理薄弱

尽管酒泉风电基地的风电规模已经达到常规电源的水平,但风电场的基础管理水平与常规电源之间存在着明显差距,多数风电场的运行管理规程、规范和技术标准不完善。在风电连续 6 年高速增长的背景下,人才队伍建设无法适应风电快速发展需要的问题凸显,并且大部分新建风电场运行、建设技术管理人员缺乏经验,对大批刚参加工作的新员工的培训严重不足,人员素质制约了风电场建设、运行管理水平的提高。同时,风电场设备技术监督、检测手段和检验验收能力也存在明显不足,致使风电场设备缺陷难以及时发现,造成风电场设备故障频发。

2.3 设备制造企业创新能力不足

酒泉风电基地主要安装了华锐、金风和东汽三大风电制造企业的机组,而近期发生脱网事故的机组绝大部分也是由这三大风电制造企业生产的机组。风电机组的低电压穿越能力等方面的技术问题欧美国家已经解决,之所以在中国成为风电发展的技术瓶颈,首先是国内自主研发能力不足,过分依赖国外的技术,最先进的风电机组制造技术国外不愿意转让;其次是当时在引进制造技术时,过分注重价格因素,导致风电机组关键技术引进不完整。尽管目前国内主流风电机组制造企业已经通过了低电压穿越能力检测,但其风电机组在实际运行时仍然存在技术性能不稳定的问题。

2.4 风电并网管理规范不健全

常规电源形成了一整套并网管理的程序、制度和规范,例如,火电机组必须经过安装、调试、启动验收试验、168 h 试运行、消缺到并网商业运行完整的程序考验,通常保证了投产的火电机组基本具备良好的技术性能。风电场不仅缺乏全国统一完整的启动验收管理规范,而且由于风电场机组台数众多,在启动验收时通常只有少数机组具备并网条件,难以开展所有风电机组的启动验收试验,因此,尽管完成风电场启动验收试验、试运行等程序,仍然无法全面检验风电场的真实技术性能。另外,低电压穿越能力等关键检测项目受到试验条件的限制难以及时开展,使得风电场存在的许多问题在投产以后才陆续暴露。

2.5 其他间接原因

由于酒泉风电基地必须依靠河西 750 kV 输变电工程送出,该工程在 2010 年 11 月建成投产以后,为了在年底前完成机组的吊装任务,各个风电开发企业建设进度明显加快。大部分风电场正是在寒冷

的冬季完成了电缆头安装等工作,施工条件恶劣埋下了安全隐患。2010 年底几乎所有风电场均已完成风电机组吊装,但个别风电场受到升压站的建设进度影响,至 2011 年第 4 季度才并网投产,风电场建设施工组织明显不合理。另外,由于风电场边建设、边运行,尤其是近期基建、运行、技改和检修作业交叉重叠,风电场现场管理难度进一步加大。

2.6 小结

大规模风电基地建设过程中技术标准和管理规范的缺失使得风电并网技术管理矛盾突出,成为大规模风电机组脱网事故频发的重要影响因素;在风电连续多年翻番的超常规快速发展背景下,人才队伍、技术管理、内部制度、技术监督等基础管理长期积累的矛盾逐步显现,成为大规模风电机组脱网事故频发的重要因素之一;国内风电设备制造企业自主创新能力与大规模风电基地的技术需求存在较大差距,产品质量检测和并网检测能力不足,是大规模风电机组脱网的重要因素;风电场启动验收试验和试运行等程序不完善、风电场低电压穿越等关键试验项目难以及时开展、风电场并网验收管理规范不健全也是影响因素之一。

3 系统原因

3.1 风电发展模式

欧美风电发展采取以市场需求为导向的发展模式,以靠近用电负荷中心、小规模、多业主、高度分散的风电发展形式为主。风电场普遍靠近负荷中心,低电压接入配电系统并就地消纳。欧美国家陆上风电场超过 45 MW 的十分罕见,例如:全世界风电比例最高的丹麦 2008 年全国 90% 的风电场规模小于 45 MW,绝大部分陆上风电场(机组)接入低压配电网就地消纳;丹麦全国只有 2 个规模较大的海上风电场通过 132 kV(或 150 kV)电压等级并网,但海上风电距离负荷中心的距离也不超过 100 km,且建设规模以电网的接受能力为控制条件^[5]。这种分散接入、就地平衡后送出的接入模式对电网的影响也不大。

欧美国家风电设备制造技术、检测认证技术和质量保证水平较高,风电场运行管理经验丰富,风电场并网规程、规范、管理办法较齐全,因此,欧美风电场事故发生的概率相对较小。欧美国家风电发展较快的地区大多位于电网结构较坚强、吸纳风电能力强的地区,因此,即使风电场发生事故,对于电力系统的影响也相对较小。

中国选择了以资源开发为主导的风电发展模式,以远离负荷中心、大规模、少业主、高度集中的风

电发展形式为主。中国风电场绝大部分在 45 MW 以上,大多采用高电压接入、远距离集中送出^[6]。国家规划的大规模风电基地普遍位于电网末端,当地电网结构普遍比较薄弱,并且大多采用大规模集中开发、远距离送出的发展模式,需要集中送出的风电总装机容量规模越来越大,接入电力系统的电压等级越来越高,电力电量送出的距离越来越远,风电场事故对于电网的影响较大。

中国风电发展较快的地区大多集中在电网结构薄弱的地区,风电机组普遍不具备低电压穿越能力^[7],单个风电场事故通常导致附近风电机组大量脱网,因此,风电场发生事故对于电力系统的影响也相对较大。尤其是百万千瓦、千万千瓦级风电基地大多位于电网末端,风电场事故对于电网安全稳定的影响更大。

3.2 酒泉风电基地的特殊性

酒泉风电基地位于甘肃河西走廊的西端,一期工程主要集中在玉门、瓜州 2 个区域内,当地用电量非常少,绝大部分风电电量需要输送到 1 000 km 以外的兰州负荷中心消纳^[8];同时,由于远离负荷中心,电网结构相对薄弱,只能采用高电压集中并网的接入系统方式。甘肃酒泉风电基地一期工程采用 330 kV 电压等级汇集、750 kV 送出,是全世界集中并网规模最大、送出距离最远、汇集和送出电压等级最高的风电基地。酒泉风电基地风电汇集及送出工程示意图^[9]见附录 A 图 A4。

酒泉风电基地不仅与欧美风电发展模式不同,而且与国内风电发展模式也存在较大差异,在正常运行方式下,风电随机性、波动性已经造成电网无功电压的控制困难等问题;受到风电机组不具备低电压穿越能力的影响,个别风电场的电压跌落直接导致在敦煌变电所并网的其他风电场机组大量脱网,风电场事故的相互影响问题更加突出;由于风电送出的 750 kV 双回线路长达近 1 000 km,属于典型的大电源、长线路、弱电网结构,风电机组的大规模脱网导致系统电压、频率的大幅度波动,直接威胁电力系统的安全稳定运行。如果脱网风电容量更大,甚至可能导致电网解裂或电压崩溃的恶性事故。

甘肃酒泉风电基地一期工程 5.8 GW 风电通过 7 座 330 kV 升压站和 2 座 330 kV 变电所汇集到 750 kV 电网送出,其中 6 座 330 kV 升压站和 1 座 330 kV 变电所风电汇集到敦煌 750 kV 变电所的 330 kV 母线^[9-10],敦煌变电所集中接入的风电总容量超过 4 500 MW(近 3 000 台风电机组),使其成为全世界集中并网规模最大的单个变电所。受到技术经济条件的限制,如此大规模风电不得不集中在同

一变电所并网,其中任何风电场或风电机组发生电压跌落,难免对其他风电场及风电机组造成影响,个别风电场内部故障演变为系统事故的概率明显增加。

尽管单台风电机组的容量很小,单个风电场的规模也不太大,但酒泉风电基地风电总容量已经达到全省总装机容量的18.5%,其中,750 kV 敦煌变电所集中并网的风电占全省总装机容量的16%,远远超过省内任何一个火电厂的规模。尽管酒泉风电基地已经达到主力电源规模,但风电场却不具备承担与其规模相适应的责任的能力,风电场及风电机组仍然只能作为依附性电源,正常情况下运行控制能力不足,在事故状态下更是缺乏暂态支撑能力,因此,大规模风电基地安全稳定的系统风险大幅度增加。

3.3 小结

与欧美国家不同,中国风电大规模集中开发、远距离送出的发展模式导致风电场事故相互影响的问题突出;作为集中并网规模最大、输送距离最长的风电基地,酒泉风电基地的大电源、长线路、弱电网特点突出,脱网事故对于电力系统安全稳定的影响更加明显;受到接入条件的限制,酒泉风电基地超大规模地集中于一点并网,风电场事故相互影响的系统风险大幅度增加;风电作为依附性电源,不具备承担与其建设规模相适应的责任的能力,大规模风电基地存在着安全稳定的系统风险。

4 应对措施

4.1 完善风电发展策略

在关注风电发展速度的同时,应重点提高风电发展的质量,大规模风电基地应该承担与其规模相适应的责任,风电场的技术性能应该满足电力系统安全稳定控制的需要;在规划建设千万千瓦级风电基地的同时,应引导用电负荷发展,实现部分风电的就近消纳,缓解大规模风电集中外送的压力;应适度引导小规模、分散式风电的发展,实现风电与用电市场的协调发展,在丰富中国风电发展模式的同时,缓解风电送出与消纳的矛盾。

4.2 强化统一规划职能,促进电源与电网协调发展

坚持电源与电网统一规划的电力发展基本原则,以用电市场需求为导向,确定电源整体建设规模,在统一电源规划的框架下,合理制定风电发展规划;坚持电源与电网协调、同步发展的规划原则,按照电网规划控制风电发展规划的总规模,通过风电发展规划的送出需求合理调整电网规划,形成风电规划与电网规划互动的协同机制,确保风电整体开发规模与电网接纳能力相适应。超前审批风电汇集

及送出工程,确保配套电网工程与风电同步建成投产。

4.3 完善技术标准和管理规范,促进风电规范发展

在距离负荷中心1 000 km以外的电网末端建设千万千瓦级风电基地,风电以主力电源的身份登上历史舞台,需要借鉴丹麦的风电成功发展经验,根据风电场接入电力系统的电压等级不同制定不同的技术标准^[5];制定与大规模风电基地建设规模、系统地位相适应的接入系统技术规定,提高电力系统稳定水平,缓解风电送出矛盾。

借鉴中国常规电源的成功经验,逐步建立风电规划、前期调研、建设、调试、试运行、启动验收、运行和调度全过程管理规范。千万千瓦级风电基地作为主力电源,应该遵守电力系统相关的管理规范。

4.4 加强管理,促进大规模风电健康发展

加大大规模风电基地现有风电机组低电压穿越能力改造的进度,加强风电场内部包括无功补偿设备在内的设备管理,及时发现并消除存在的设备质量隐患^[11];加快风电场建设运行管理规程、规范和标准体系的制定,完善风电场内部管理制度,提高风电运行管理水平;加强风电场保护、无功补偿等涉网关键设备调度运行管理,加快风电场信息采集与上传实施进度,提高风电场调度管理水平。

加强新投产风电场并网及启动验收管理,规范风电场启动验收管理和试验验收程序,加强风电场及风电机组低电压穿越能力等方面检测管理^[12],切实提高新投产风电场技术管理水平。

4.5 加强研究开发,促进风电科学发展

酒泉风电基地大规模风电集中开发的发展模式,面临着许多技术难题和挑战^[8],加快“风电场、光伏电站集群控制系统研究与开发”^[13-14]“电网友好型新能源发电关键技术研究与应用”^[15]等国家“863计划”课题的研发进度,提高大规模风电基地可测、可调、可控和暂态支撑能力,在促进大规模风电科学发展的同时,提高在新能源领域的竞争力。加快智能电网技术的研究与应用,提高电网整体装备水平,进一步提高风电管理控制能力。

5 结语

酒泉千万千瓦级风电基地距离负荷中心超过1 000 km,该基地的建设突破了现有的风电发展理论,需要总结经验 and 破解难题。通过对酒泉风电基地大规模风电机组脱网事故直接、间接和系统原因的深入分析,从规划、管理、政策、标准和科技等方面提出了应对措施,探索促进大规模风电基地健康发展的道路。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 甘肃省电力公司. 甘肃电网 2012 年度运行方式报告[R]. 兰州: 甘肃省电力公司调度通信中心, 2012.
- [2] 甘肃省电力公司. 甘肃电网风电运行情况报告[R]. 兰州: 甘肃省电力公司调度通信中心, 2010.
- [3] 甘肃省电力公司. “2·24”桥西升压站事故调查分析报告[R]. 兰州: 甘肃省电力公司调度通信中心, 2011.
- [4] 世界风能协会. 世界风能报告 2011[R]. 波恩, 德国: 世界风能协会, 2012.
- [5] 沈又幸, 郭玲丽, 曾鸣. 丹麦风电发展经验及对我国的借鉴[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 153-157.
SHEN Youxing, GUO Lingli, ZENG Ming. Wind power development experience of Denmark and its reference to China [J]. East China Electric Power, 2008, 36(11): 153-157.
- [6] 世界风能协会. 世界风能报告 2008[R]. 波恩, 德国: 世界风能协会, 2009.
- [7] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.
YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A primary on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 36(8): 11-17.
- [8] 汪宁渤, 马彦宏, 夏懿. 甘肃酒泉 10 GW 风电基地面临的巨大挑战[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 101-104.
WANG Ningbo, MA Yanhong, XIA Yi. Enormous challenges for Gansu Jiuquan 10 GW wind power base[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 101-104.
- [9] 中国电力工程顾问集团西北电力设计院. 甘肃酒泉风电基地输电规划——风资源特性与风电场规划[R]. 西安: 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 2008.
- [10] 中国能源建设集团甘肃省电力设计院. 酒泉风电基地风电场接入系统设计[R]. 兰州: 中国能源建设集团甘肃省电力设计院, 2009.
- [11] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines' trip-off from grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [12] 穆钢, 王健, 严干贵, 等. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
MU Gang, WANG Jian, YAN Gangui, et al. Cascading trip-off of doubly-fed induction generators from grid at near full-load condition in a wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [13] 中华人民共和国科学技术部. 国家高技术研究发展计划(863 计划): 先进能源技术领域智能电网关键技术研发(一期)重大项目申请指南[R]. 北京: 中华人民共和国科学技术部, 2010.
- [14] 薛峰, 常康, 汪宁渤. 大规模间歇式能源发电并网集群协调控制框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 45-48.
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ningbo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 45-48.
- [15] 甘肃省电力公司. 电网友好型新能源发电关键技术与示范应用[R]. 兰州: 甘肃省电力公司, 2012.

汪宁渤(1963—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向: 电网规划和风电并网。E-mail: wangnb@gs.sgcc.com.cn

马彦宏(1975—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化、风电预测预报。E-mail: mayh@gsepc.com

丁 坤(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 新能源并网、输送及消纳技术。E-mail: dingkun@gs.sgcc.com.cn

Analysis on Root Reasons of WTGs Nuisance Tripping in Jiuquan Wind Power Base

WANG Ningbo, MA Yanhong, DING Kun, ZHOU Shiyuan, ZHOU Qiang

(Wind Power Technology Center, Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Disconnection of wind turbines from the main grid frequently occurred in the Jiuquan wind power base, which involved a large number of wind turbines. These accidents severely threatened the secure and stable operation of power grid, attracting great attention at home and abroad. This paper studies direct, indirect, and systematic causes of these nuisance tripping accidents from the perspective of technology, management, policy, mechanism, and etc. Some countermeasures are proposed accordingly.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A104) and Science and Technology Project of Gansu Province (No. 1002GKDA009, No. 1009GTGA024).

Key words: wind power generation; trip-off of wind turbines; security and stability; countermeasures; power systems

附录 A

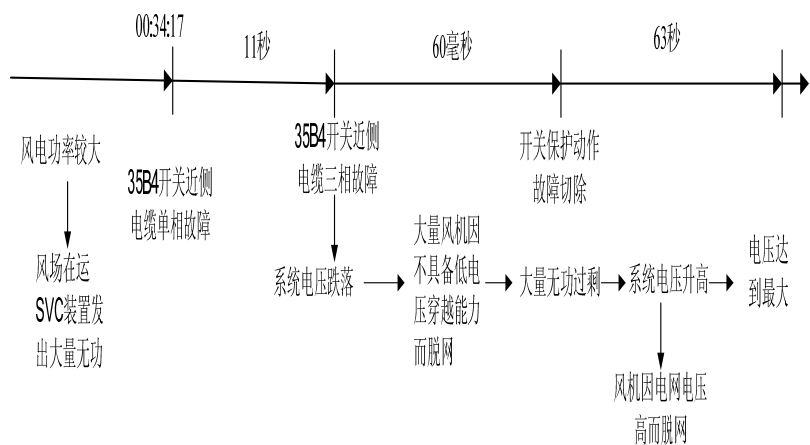


图 A1 “2·24”桥西风电场事故过程示意图
Fig.A1 Process of “2·24”failure of Qiaoxi wind farm

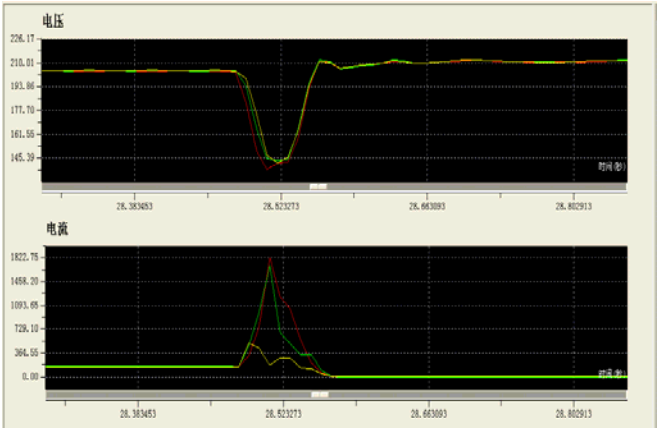


图 A2 桥西风电场 330 kV 升压站电压变化曲线
Fig.A2 Voltage curve of 330 kV booster station of Qiaoxi wind farm

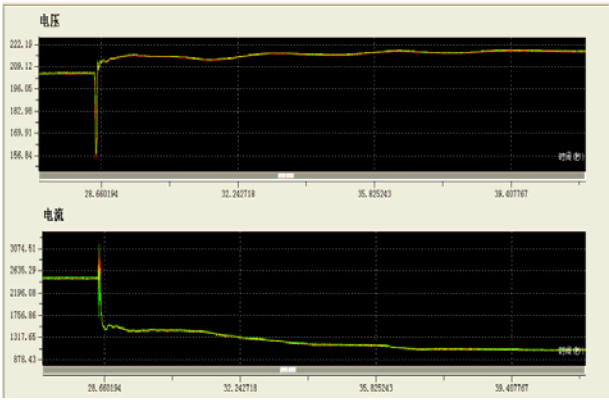


图 A3 750 kV 敦煌变电所 330 kV 母线电压变化曲线
Fig.A3 Voltage curve of 330 kV bus of 750 kV Dunhuang transformer substation



图 A4 酒泉风电基地风电汇集及送出工程示意图

Fig.A4 Illustration of convergence and delivery of Jiuquan wind power base