

巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示

易俊¹, 卜广全¹, 郭强¹, 习工伟¹, 张剑云², 屠竞哲¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192; 2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京市 100052)

摘要: 2018年3月21日, 因断路器过载保护动作后的一系列连锁反应, 巴西电网发生大面积停电事故, 北部和东北部电力系统与主网解列, 导致北部和东北部14个州大面积停电, 南部、东南部、中西部9个州也受到一定影响。文中介绍了事故前巴西电网的运行状况及事故的起因、经过、恢复等情况, 指出事故前缺乏必要的稳定性分析、安控存在缺陷、保护误动作及“第三道防线”配置不合理是造成事故的主要原因, 并结合中国电网实际, 提出了重视保护及安控装置的整定与运行维护等保障电网安全稳定运行、防止大停电事故发生的建议。

关键词: 巴西电网; 大停电; 安全稳定; 安控措施

0 引言

当地时间2018年3月21日15:48(若非特别指出, 本文中的时间均为巴西当地时间), 巴西电网发生大面积停电事故, 波及北部与东北部14个州绝大部分的地区(超过2 000个城市), 其中受影响最严重的是北里奥格兰德州、帕拉伊巴州和马拉尼昂州。此外, 巴西南部、东南部和中西部也受到一定影响, 包括圣保罗、里约在内的9个州也有停电发生。本次停电事故中, 北部和东北部电网与主网解列。最终损失负荷约21 735 MW, 相当于巴西国家互联电网(Sistema Interligado Nacional, SIN)停电前负荷的约27%, 全国约四分之一的用户断电。

事故发生后, 巴西电网公司迅速组织电力恢复, 当天15:57, 南部电网停电负荷恢复供电; 17:50, 北部电网全部恢复供电; 22:20, 所有电力供应均恢复正常。

近年来, 国外电网大停电事故时有发生, 造成了巨大的经济损失和严重的社会影响^[1-10]。考虑到巴西全国的资源与负荷也呈现逆向分布特征, 电网输电格局与中国存在类似之处, 了解巴西此次大停电事故的详细过程, 分析事故发生的原因, 总结经验和教训, 对于国内电网的规划和运行将具有一定的借鉴作用。

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-10-15。

上网日期: 2018-11-28。

国家电网公司科技项目“基于多沙堆理论的互联电网停电事故预警技术及系统研发”; 国家自然科学基金面上项目(51777195); 北京市科技新星与领军人才培养计划(Z161100004916110)。

1 巴西电网运行和管理情况

1.1 巴西电网概况^[7,9]

巴西电网按区域可分为六大电网, 分别为西北电网、北部电网、东北部电网、中西部电网、东南部电网和南部电网^[7], 如图1所示。目前, 除西北电网为独立运行电网外, 其余部分已形成了大规模区域互联电网。



图1 巴西大区电网

Fig.1 Regional power grid in Brazil

巴西电网具有如下特点。

1) 能源与负荷逆向分布, 远距离输电。受自然资源条件的影响, 巴西总发电量的70%以上来自水力发电, 而巴西可供开发的水电资源多集中在北部与西部区域, 负荷中心多集中在东南沿海区域, 整个国家的输电格局呈现“北电南送、西电东送”的局面。

巴西全国范围内 5 条 ± 600 kV 及 ± 800 kV 直流输电线路主要连接送端的伊泰普水电站、美丽山水电站以及马代拉河上游大型水电站与受端巴西东南部地区。此次受到影响的正是由北向南的交直流通道,见附录 A 图 A1。

2) 大区电网间联系薄弱。巴西国家互联电网的各大区电网间主要通过 1~3 回 500 kV 线路联网,联系较为薄弱。地区电网内仍存在电磁环网问题,电网安全稳定运行水平有待提高。如此次停电的北部、东北部地区,北部电网为明显的长链式结构,将区域内水电站串联在一起^[7,9],北部、东北部电网与南部电网的交流联络断面也较为薄弱,如附录 A 图 A1 所示。历史上,由于设备故障导致北部、东北部电网与主网解列,最终引发大停电事故的情况时有发生。

3) 电网发展不均衡。巴西电网近 80% 负荷集中分布在南部和东南部地区(包括中西部),形成了以 500 kV 为主干网架较为坚强的地区电网^[7,9]。北部和东北部地区负荷发展相对缓慢,地区 500 kV 主干网架较为薄弱。

1.2 美丽山(Belo Monte)水电站送出系统

本次事故起始于巴西东北部地区美丽山水电站送出系统的欣古(Xingu)换流站。该水电站设计装机容量为 11 230 MW,预计 2020 年全部建成,是继三峡水电站和伊泰普水电站之后的世界第三大水电站。美丽山水电站送出系统规划建设两条 ± 800 kV 直流线路与若干条 500 kV 交流线路,其中直流送端为东北部电网的欣古换流站,受端为南部电网的伊斯坦雷都(Estreito,一期)和瑞典(Terminal Rio,二期)换流站。直流建成后将与东北部电网、北部-南部联络线等构成大范围交直流并联运行系统。目前,工程一期 4 000 MW 电力通过 ± 800 kV 美丽山直流 I 送出至巴西南部,已于 2017 年年底正式投产,见附录 A 图 A1 和图 A2。

1.3 电网的管理及调度机制

巴西电力管理最高部门是国家能源政策委员会,下设能源矿产部,领导电力机构监管委员会和能源规划署。巴西电力管理机制如附录 A 图 A3 所示。

1996 年 12 月,巴西成立了独立的电力监管机构,负责电力市场技术和经济方面的监管工作,颁发电力企业经营许可证,规范电力市场价格。1998 年 8 月,成立了独立的电力市场运行和管理机构,管理巴西电能批发市场,负责电力市场参与者之间的电力交易和结算。1998 年 10 月,巴西成立了独立的国家电力调度中心(ONS),并于次年 3 月由电力监管机构授权后正式运作,运行国家互联电网,管理国

家输电网络,对巴西电力系统进行统一调度,设有四个区域电力调度中心。

巴西国家互联电网的四大电网公司分别主管六大区域电网:西北电网为独立运行电网,与北部电网同属北部电网公司主管;东北部电网由东北部电网公司主管;中西部电网和东南部电网同属东南部电网公司主管;南部电网由南部电网公司主管。大区电网之间主要通过 500 kV 线路联系。目前巴西国家互联电网已实现与周边阿根廷、乌拉圭、委内瑞拉等国的互联,进行电力交换。

1.4 巴西近年来发生的大停电事故

由于一些深层次的原因,巴西一直是一个大停电多发的国家,2000 年后,巴西发生大停电事故十几次,几乎每年都有大停电发生。21 世纪巴西发生的部分大停电事故见附录 A 表 A1。

由附录 A 表 A1 可知,在此次事故发生的北部、东北部区域,类似的停电事故多次发生,如 2011 年 2 月 4 日的大停电事故、2012 年 10 月 26 日的大停电事故、2013 年 8 月 28 日的大停电事故,主要停电区域都在北部和/或东北部区域。且上述三次事故过程中,东北部电网均与主网解列(其中 2012 年 10 月 26 日停电事故北部、东北部电网与主网解列)。

2 “3·21”事故概括

2.1 事故前系统运行状态

本次事故起源于美丽山水电站送出系统。事故发生前,美丽山水电站 7 台机组运行,总出力 4 029 MW,美丽山送出直流 I 期工程正常运行,输送功率 4 000 MW,如图 2 所示。

由于工程进度的原因,欣古换流站采用单母线临时运行方式,如图 3 所示,500 kV A 母线带分段断路器(9522)运行,B 母线停运,直流接入其中的 A2 段。

事故前,巴西电网总发电出力 79 355 MW,北部电网电力大规模外送 7 375 MW,东北部电网受入 3 608 MW,东南/中西部电网受入 3 767 MW。具体的发电、负荷需求、各区域电网的功率交换见附录 A 图 A4。

2.2 事故经过

事故的详细过程如下(如图 4 所示,图中三条曲线为大区电网间的联络断面)。

1) 15:48:03.245(故障后 0 ms),欣古站 500 kV 分段断路器(9522)过流保护动作跳闸(该过流保护的定值为 4 000 A,开断前流经分段断路器的电流达到 4 400 A),造成美丽山直流系统接入的 A2 段

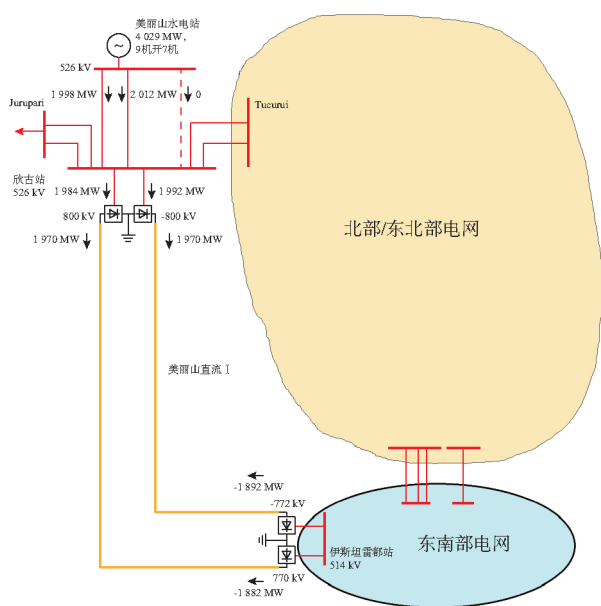


图2 事故前电网运行状态
Fig.2 Operation status of Brazilian power grid before blackout

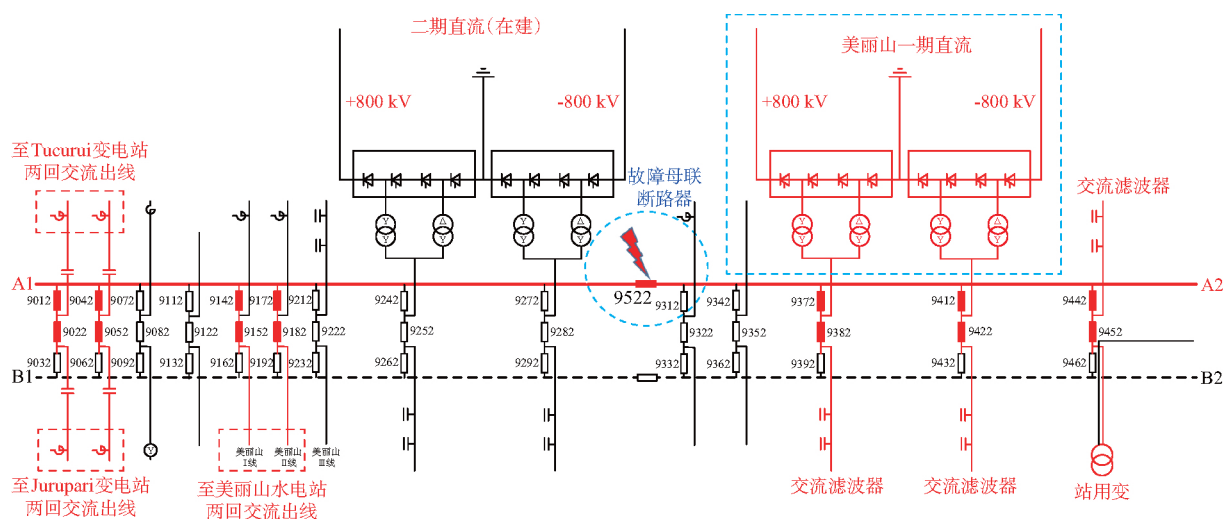


图3 欣古站电气接线图
Fig.3 Electrical wiring diagram in Xingu Station

4)图4中 断面④: 500 kV Colinas-Ribeiro Gonçalves C1和500 kV Colinas-Ribeiro Gonçalves C2线路由于距离保护误动作断开线路。

5)在故障后约1134 ms,230 kV Teresina-Coelho Neto-Peritoró线路由于距离保护Ⅲ段动作断开,此时北部地区形成孤网(注:断面⑤为低电压等级线路,未在图4中绘出)。

6)图4中 断面⑥:最后,500 kV Igaporã III-Bom Jesus da Lapa II线路和230 kV Bom Jesus da Lapa II-Igaporã II线路因距离保护误动作断开,东北地区成孤网。

交流母线失压,直流双极停运;此时安控装置(SEP)没有发出切机信号,美丽山水电站发电机组继续运行。潮流转移导致系统出现振荡。

2)图4中 断面②:在故障发生后大约738 ms,由安装在Serra da Mesa 2侧的失步保护动作,解列了500 kV Serra da Mesa 2-Peixe线路;74 ms后,由于功率振荡,Gurupi侧的距离保护Ⅰ段动作断开了500 kV Gurupi-Serra da Mesa C2;76 ms后,由于Serra da Mesa侧的过电流(POTT)导致距离保护Ⅱ段动作断开了500 kV Gurupi-Serra da Mesa C1线路。此时,北部电网与东南部电网解列。

3)图4中 断面③:在故障发生后大约984 ms,安装在500 kV President Dutra SE站内的失步解列装置动作,断开了北部与东北部电网的联络线500 kV President Dutra-Teresina II C1,500 kV President Dutra-Boa Esperança和500 kV President Dutra-Teresina II C2三回线。

至此,巴西电网解列成三片。其中,北部电网孤立后,由于严重的功率盈余,频率大幅升高至70 Hz,部分线路过电压跳闸,高频切机动作切除部分机组后发生振荡,85 s后电网基本全停,损失了93%的负荷。东北部电网出现严重功率缺额,低频减载动作5轮后,频率恢复至60 Hz左右,随后Paulo Afonso水电站两台机组因自身保护不恰当动作跳闸,电网频率再次下降至57.3 Hz,随后引发一系列的设备保护动作,最终东北部电网基本全停,损失99%的负荷。南部电网因功率缺额,频率低至58.44 Hz,低频减载装置动作切除约5%共计3665 MW负荷后,系统恢复稳定运行。

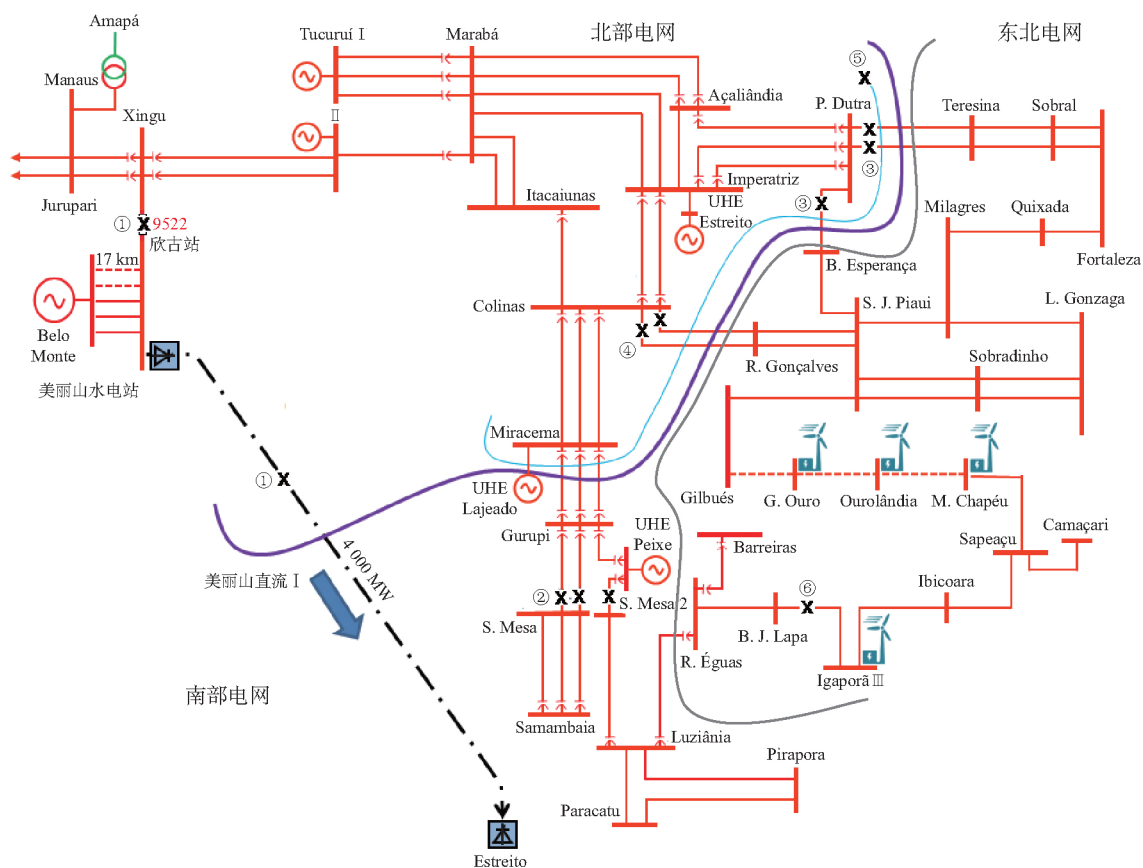


图 4 主要事件序列
Fig.4 Main event sequence

2.3 事故影响范围及事故恢复

事故发生后,巴西北部、东北部、南部、东南部/中西部都有不同程度的停电损失,其中北部损失了93%的负荷,东北部损失了99%的负荷,南部损失了7%的负荷,东南部/中西部损失了5.5%的负荷,总计21 735 MW,约占事故前总负荷的27%。事故影响区域如图5所示,图中英文为州名缩写,深红色为受到严重影响区域,浅红色为影响较轻的区域。

事故发生后,巴西电网公司迅速组织电力恢复,当天15:57,南部电网停电负荷恢复供电;17:50,北部电网全部恢复供电;22:20,东北部电网全部恢复供电。

3 造成事故的主要原因

任何一次大停电事故都不是单一原因造成的,通过对巴西此次停电事故的分析可知,多个技术、管理上的原因共同导致了大停电的发生。

3.1 事故前未能对可能出现的情况做好充分分析

事故发生前,巴西电监会(ANEEL)为了满足美丽山水电站的电力送出,提出欣古站在建设阶段采用单母线接线方式运行,过渡期分为3个阶段。其

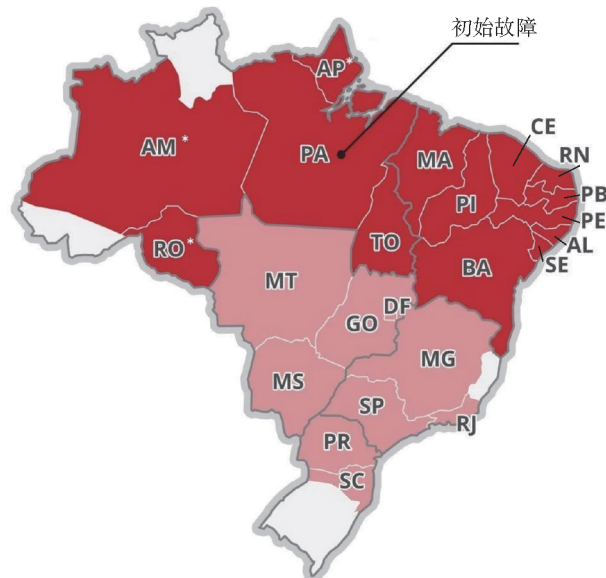


图 5 停电影响区域
Fig.5 Power outage area

中,第1阶段,500 kV B 母线不带断路器投运以保证双极的调试和投运;第2阶段,500 kV A 母线带断路器投运,停运500 kV B 母线并安装相关设备;

第3阶段:500 kV B 母线带断路器投运。ONS 批准了这一方案,并表示承受单母线运行造成双极停运的风险。但相关部门并未组织对不同过渡阶段的运行风险、保护适应性做详细分析,导致从第1阶段进入第2阶段后,未及时对分段断路器保护进行计算和整定,保护跳闸整定值仍为出厂设定值4 000 A,事故前过负载电流达到4 400 A,造成保护正常动作,引发事故发生。

3.2 安控策略存在缺陷,对过渡期可能出现的运行风险估计不足

针对美丽山一期工程,ONS 已经要求配置了相应的安稳控制措施,但没有考虑两条500 kV 交流母线同时失压的极端情况,更没有考虑单母线过渡运行时失压的情况,因此分段断路器(9522)跳闸后,直流闭锁并向安控装置发送切除6台机组的信号,安控装置接收到信号后,在母线电压信号为零的情况下,判定信号无效,未将切机信号发送至水电站机组。整个过程中,直流控保的响应正常。

3.3 保护误动作增加了停电损失

事故发展过程中,联络线解列导致东北部电网孤网运行。低频减载动作后,系统频率原本已恢复至正常水平,但随后 Paulo Afonso 水电站自身保护误动作切除两台机组,导致系统频率不可逆地下降,最终整个东北电网全部停电,停电损失大幅增加。

3.4 “第三道防线”配置不合理

巴西电网普遍配置了解列、低频/低压减载、高频切机等“第三道防线”措施,但这些措施相互之间,以及与电源侧的保护装置之间缺乏协调配合,因而在极端紧急状态下常无法有效阻止大停电事故的发生。21世纪以来,故障引发北部、东北部电网与主网解列,最终导致这两个大区电网基本全停的情况屡次发生,充分反映了巴西电网“第三道防线”措施的可靠性和有效性需要进一步提高。

4 对中国电网安全稳定运行的启示

4.1 重视保护及安控装置的整定与运行维护

近年来国内外发生的多次大面积停电事故表明,继电保护及安控装置的误动、拒动及不恰当动作往往是引发事故的直接原因或导致事故扩大的重要因素。2003年美加大停电、2012年印度大停电中均存在保护的不恰当动作。就在本次事故的主要停电区域巴西东北部电网,2011年2月4日,两次线路保护误动及一次发电厂辅机保护误动更是直接导致了东北部电网全停的事故。回到本次事故,若欣古站500 kV 分段断路器误动后,安控装置能够正确切除6台水轮机,则大停电事故也不会发生;若 Paulo Afonso 水电站机组自身保护整定值合理,频

率恢复到60 Hz左右后不动作切除机组,则东北部电网也不会全停。这些经验表明,重视保护及安控装置的设计、整定和维护工作,在系统结构或运行方式发生变化时,及时更新动作定值和动作策略,同时注意不同保护及安控装置的协调配合,对于确保电网安全稳定运行具有重要意义。

4.2 加强“第三道防线”建设

应考虑增强电力系统应对极端情况的能力,通过加强电网在极端运行方式下的安全稳定计算分析,进一步强化和健全“第三道防线”建设。在系统发生解列、损失大量线路等极端情况下,阻止连锁反应进一步蔓延,避免系统全停,尽可能减少停电损失。本次事故中,巴西北部与主网解列后,虽然配置了高频切机措施且动作切除了部分机组,但北部电网仍然损失了93%的负荷,“第三道防线”并未起到应有的作用。

4.3 制定有效的故障应急处理与停电恢复预案^[1]

应继续坚持“安全第一,预防为主”的原则,编制程序化、规范化的事故应急处理预案,在事故蔓延和发展过程中给调度人员提供有效的指导,保证事故处理准确、迅速,减少停电损失。

此外,必须制定高效、合理的事故恢复预案,依靠电网调度统筹协调好电网、电厂、用户之间的恢复进度,避免在电网恢复过程中发生次生灾害,保障供电快速恢复。近年来,巴西电网多次发生大规模停电事故,调度部门在停电恢复方面积累了较为丰富的经验,制定了详细的恢复预案。在此次大停电事故中,巴西电网恢复供电速度较快,有效减少了停电损失。

5 结语

本文详细介绍了“3·21”大停电事故前巴西电网的运行状况及事故的起因、经过、恢复等情况,并以此为基础从管理、技术方面分析了事故发生的原因。事故的经验和教训表明,中国电网应进一步重视保护及安控装置的整定与运行维护、加强“第三道防线”建设、制定有效的故障应急与恢复措施,以降低中国发生大停电事故的风险。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 印永华,郭剑波,赵建军,等.美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power

- System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [3] 何大愚.一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J].电网技术,2004,28(21):1-5.
HE Dayu. Rethinking over “8.14” US-Canada blackout after one year[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5.
- [4] 高翔,庄侃沁,孙勇.西欧电网“11.4”大停电事故的启示[J].电网技术,2007,31(1):25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4, 2006 [J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.
- [5] 李春艳,孙元章,陈向宜,等.西欧“11.4”大停电事故的初步分析及防止我国大面积停电事故的措施[J].电网技术,2006,30(24):16-21.
LI Chunyan, SUN Yuanzhang, CHEN Xiangyi, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in Western Europe Power Grid on November 4 and measures to prevent large scale blackout in China [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 16-21.
- [6] 李春艳,陈洲,肖孟金,等.西欧“11.4”大停电分析及对华中电网的启示[J].高电压技术,2008,34(1):163-167.
LI Chunyan, CHEN Zhou, XIAO Mengjin, et al. Analysis of large scale blackout in Western Europe Power Grid on November 4 and relevant suggestion to Central China Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 163-167.
- [7] 林伟芳,孙华东,汤涌,等.巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2010,34(7):1-5.
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [8] 吴小辰,周保荣,柳勇军,等.巴西2009年11月10日大停电原因分析及对中国电网启示[J].中国电力,2010,43(11):5-9.
WU Xiaochen, ZHOU Baorong, LIU Yongjun, et al. Analysis of Brazilian blackout on November 10, 2009 and revelations to security for China's power grid [J]. Electric Power, 2010, 43(11): 5-9.
- [9] 林伟芳,汤涌,孙华东,等.巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J].电力系统自动化,2011,35(9):1-5.
LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil power grid on February 4, 2011 and inspirations for stable operation of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-5.
- [10] 汤涌,卜广全,易俊.印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J].中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [11] 何大愚.印度电力建设及其特高压交直流输电规划[J].中国电力,2008,41(2):65-68.
HE Dayu. Review on India's electric power construction and planning of UHVDC & UHVAC transmissions [J]. Electric Power, 2008, 41(2): 65-68.
- 易俊(1980—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: yjun@epri.sgcc.com.cn
- 卜广全(1962—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: bugquan@epri.sgcc.com.cn
- 郭强(1972—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统规划技术。E-mail: guoqiang@epri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Analysis on Blackout in Brazilian Power Grid on March 21, 2018 and Its Enlightenment to Power Grid in China

YI Jun¹, BU Guangquan¹, GUO Qiang¹, XI Gongwei¹, ZHANG Jianyun², TU Jingzhe¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China)

Abstract: On March 21, 2018, a large-area blackout occurred in Brazilian power grid because of a series of chain reactions caused by a circuit breaker overload protection. As sequence, the northern and northeastern power grids were disconnected from the main power grid in Brazil, 14 states in north and northeast area came to blackout, and 9 states in south, southeast and midwest area were also affected. The operation status of Brazilian power grid before the accident and the cause, process and recovery of the blackout are introduced. It is pointed out that the main causes of the accident are the lack of necessary stability analysis before the accident, the defects in security control, the misoperation of protection and the unreasonable configuration of the third line of defense. Combined with the actual situation of power grid in China, some recommendations are put forward to ensure the safe and stable operation of the power grid and to prevent blackouts. For example, attention should be paid to the setting and operation of protection and control devices.

This work is supported by State Grid Corporation of China, National Natural Science Foundation of China (No. 51777195), and Beijing Science and Technology Nova and Leading Person Training Program (No. Z161100004916110).

Key words: Brazilian power grid; blackout; security and stability; safety control measures

附录 A

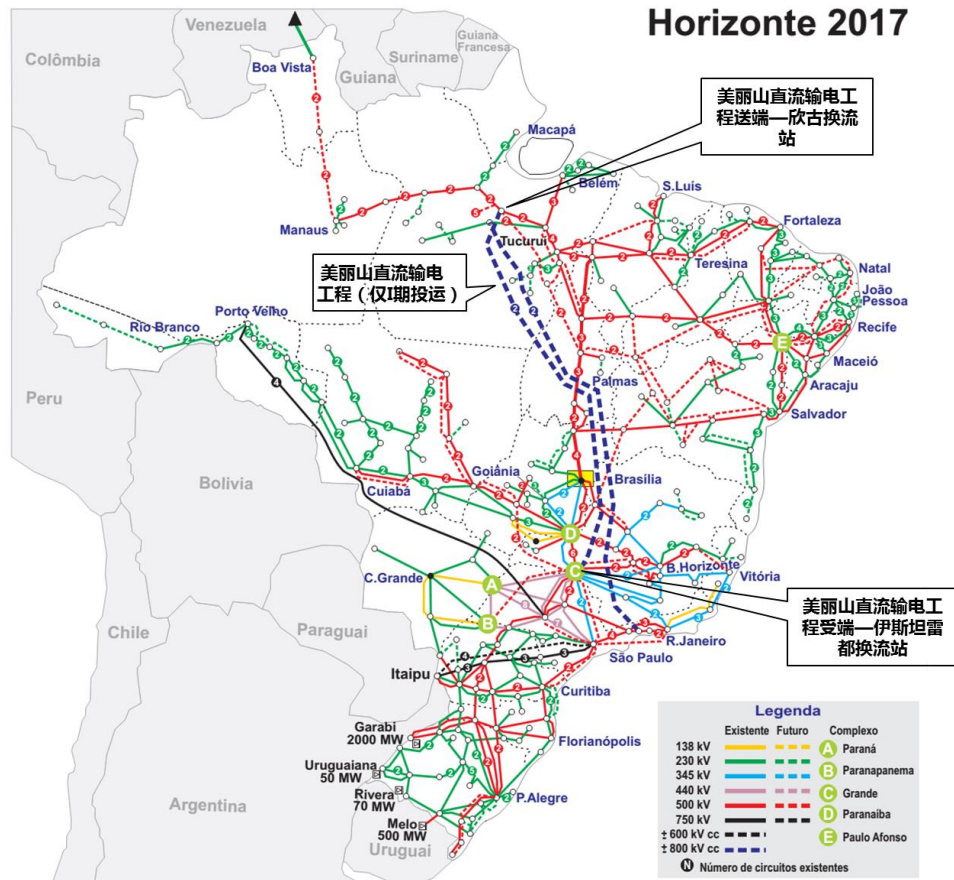


图 A1 巴西电网主网架

Fig.A1 Backbone grid structure of Brail



图 A2 美丽山水电站送出系统主网架示意图

Fig.A2 Backbone grid structure of Belo Monte transmission system

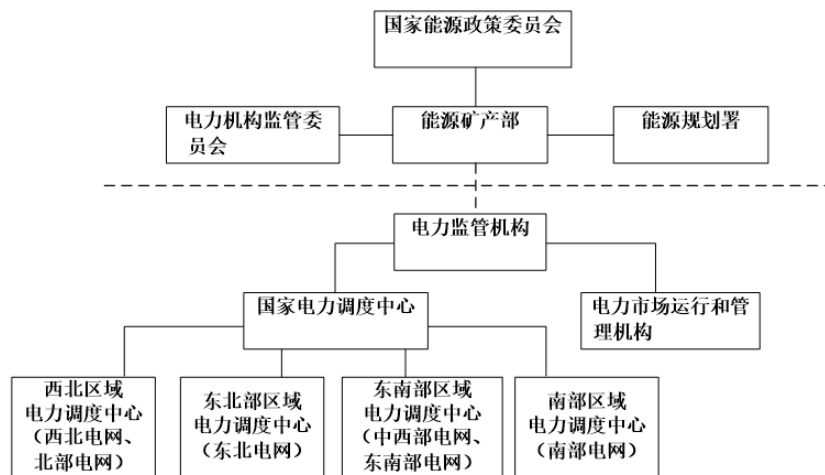


图 A3 巴西电网管理机制
Fig.A3 Dispatch mechanism in Brail

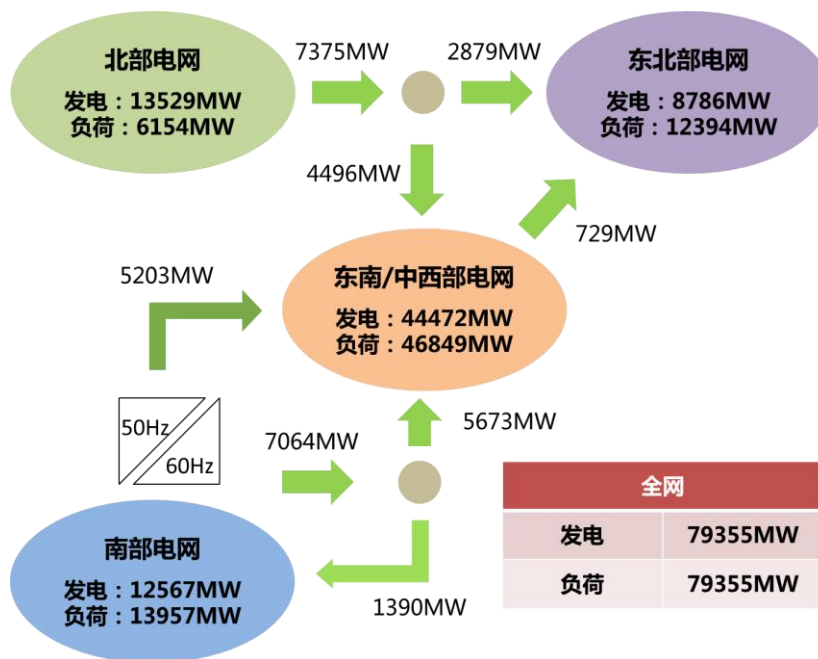


图 A4 事故前巴西电网发电、负荷需求及电力流
Fig.A4 Generation, load demand and power flow in Brail power grid prior to the blackout

表 A1 21 世纪巴西发生的部分大停电事故

Tab.A1 Some major blackouts in Brazil in twenty-first century

序号	时间	影响	事故原因
1	2009.11.10	全国 18 个州，东南部、南部最为严重，损失负荷 28830MW，6000 万人停电	伊泰普水电站送出系统交流输电线路故障
2	2011.2.4	东北部 8 个州，损失负荷 8000MW，占东北部电网总负荷的 90.1%，4000 万人停电	东北部电网一个 500kV 变电站保护误动
3	2012.10.26	北部、东北部 9 个州，损失负荷 9500MW，占东北部电网的 88%、北部电网的 77%，5300 万人停电	线路短路，保护出现故障，变电站线路全部跳开
4	2013.8.28	东北部 8 个州，损失负荷 10900MW，1600 万人停电	火灾引发输电线路跳闸