

巴西“11.10”大停电原因分析及 对我国南方电网的启示

陈亦平, 洪军

(中国南方电网电力调度通信中心, 广东省 广州市 510623)

Analysis on Causes of Blackout Occurred in Brazilian Power Grid on Nov. 11, 2009 and Lessons Drawn From It to China Southern Power Grid

CHEN Yi-ping, HONG Jun

(CSG Power Dispatching & Communication Centre, Guangzhou 510623, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The occurrence and propagation of blackout in Brazilian power grid on Nov. 11, 2009 are retrospected. It is pointed out that at the first stage the accident was caused by extreme-weather, and then it extended to a serious multiple-failure and finally became blackout; the major causes expending the accident to blackout were the defects of protective relayings, security and stability control, the insufficient measures in “the third defense line” and the voltage collapse at receiving system. There are a lot of similarities in operational characteristics between Brazilian power grid and China Southern power grid, so considering actual condition of China Southern power grid the lessons from the blackout occurred in Brazilian power network are summarized.

KEY WORDS: Brazilian power grid; blackout; China Southern power grid; defense plan

摘要: 介绍了巴西电网“11.10”大停电事故的发生、发展过程,指出极端天气引发的多重故障、继电保护存在的缺陷、安稳控制和第3道防线的措施不足、受端系统电压崩溃是导致此次大停电的主要原因。巴西电网在运行特性上与南方电网有诸多类似之处,结合南方电网实际,总结了此次大停电事故的经验教训。

关键词: 巴西电网; 大停电; 南方电网; 安全防线

0 引言

当地时间2009年11月10日22:13(北京时间11日8:13),巴西全国范围内发生大面积停电,损失负荷超过2400万kW。巴西全国26个州中的18个州约5000万人(巴西总人口1.9亿)受到影响,是近年来世界范围内发生的较大影响的大停电事故之一^[1-6]。

巴西电网负荷集中在东南沿海的圣保罗、里约热内卢地区。伊泰普(Itaipu)等水电站通过远距离,

大容量的交、直流通道将电力送至负荷中心。伊泰普交、直流送出通道沿途气候条件复杂,故障概率较高,严重故障下需依靠安稳措施保持系统稳定^[7-8]。巴西电网在运行特性上与南方电网有诸多类似之处^[9]。分析此次大停电中巴西电网暴露的问题,对完善南方电网安全防线设置有重要的借鉴意义。

1 巴西电网概况

巴西电网2008年总装机容量约89GW,其中分布在12个流域的100多个水电站占装机总量的87%,此外在负荷中心建有少量的核电、天然气、火电、油电。2008年最大负荷约65218MW,巴西东南部电网包括里约热内卢和圣保罗等经济中心,是全国电网的负荷中心,其负荷占全网比例超过50%。

巴西电网的骨干网架包括:由伊泰普水电站—圣保罗的送出工程;连接北部和东北部电网的Tucuruí电厂送出系统;南北电网互联系统(交流线路长约1028km)。在圣保罗和里约热内卢地区的负荷中心,形成了各种电压等级并存的复杂电磁环网。巴西电网地理接线如图1所示。

伊泰普送出系统网络概况如图2所示。伊泰普水电站作为当今世界第2大水电站,安装有20台70万kW机组,承担了巴西电网20%的电力供应。其发电机分为2组,每组10台。一组发电机以巴西电网额定频率60Hz运行,另一组发电机以巴拉圭电网额定频率50Hz运行。60Hz的一组发电机通过3回非同杆并架的750kV、900km线路输送到巴西东南部电网的圣保罗地区。50Hz的另一组发电机通过2回±600kV、785/805km直流输送6300MW

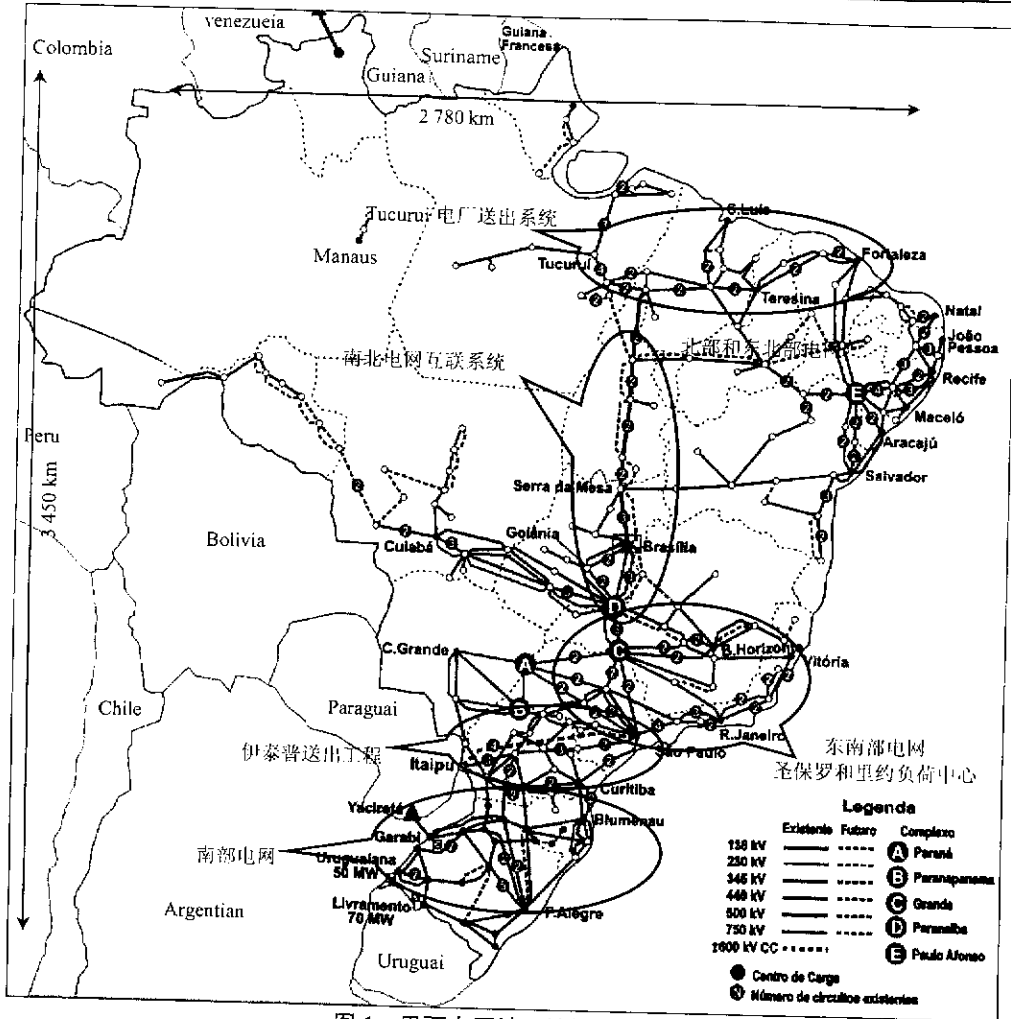


图 1 巴西电网地理接线示意图

Fig. 1 Geography connection map of Brazilian grid

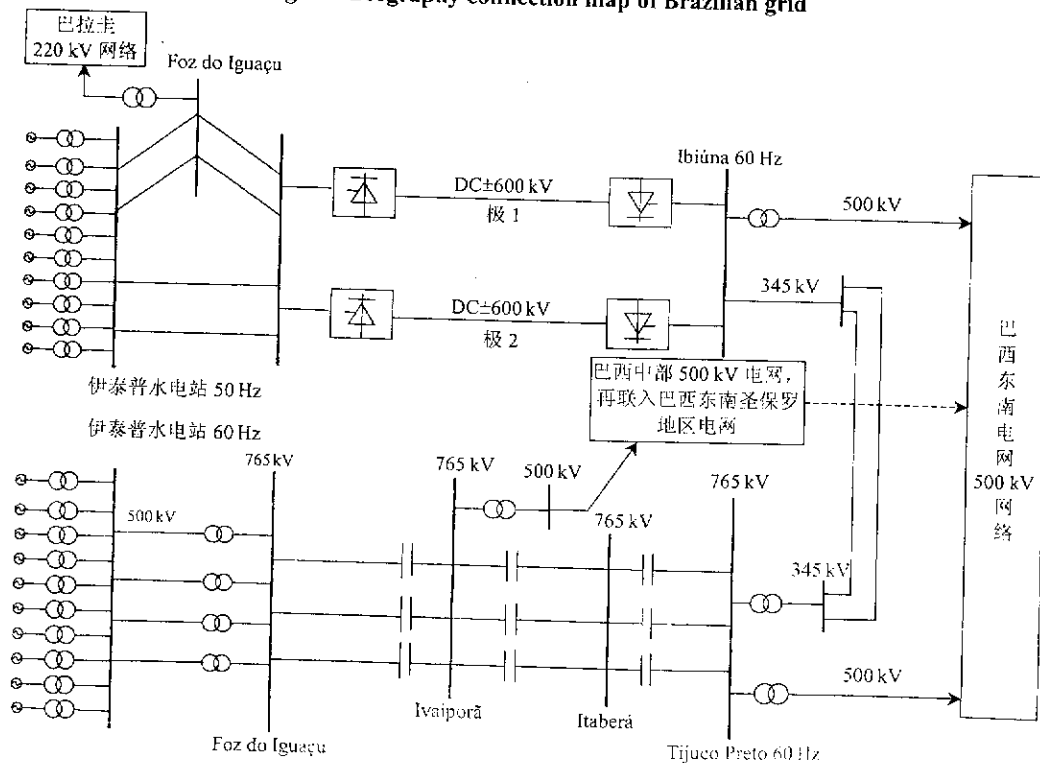


图 2 伊泰普电站送出系统网络示意图

Fig. 2 Network diagram of Itaipu power plant transmission systems

电力至圣保罗地区。同时 50 Hz 系统通过 500/220 kV 联络变降压为 220 kV 与巴拉圭电网相连。

2 事故概述及原因分析

2.1 事故发生发展过程

根据巴西电网调度中心(ONS)于 2009 年 12 月 16 日公布事故调查报告^[10-11], 此次事故的发生发展过程如下: 当地时间 2009 年 11 月 10 日 22:13, 在伊泰普 750 kV 交流送出通道上有强风、暴雨和闪电。Itaberá 变电站 Itaberá—Ivaiporã C1 线路阻波器支撑绝缘子底座 B 相对地闪络, 13.5 ms 后, Itaberá—Ivaiporã C2 线路又发生了 A 相短路故障, 3.5 ms 后, 又发生了 C 相母线故障。尽管 Itaberá—Ivaiporã C1、C2 线路保护及 Itaberá 变电站母差保护动作切除了故障, 由于整个故障时间持续 62.3 ms, 导致 Itaberá—Ivaiporã C3 线路位于 Ivaiporã 变电站的高抗中性点小电抗瞬时过流保护动作跳闸。

因伊泰普 750 kV 交流送出通道 Ivaiporã—Itaberá 的 3 条线路全部断开, 伊泰普安稳系统动作, 切除 Itaipu-60 Hz 系统的 5 台机组, 共切机 3 100 MW。此时仍有约 3 400 MW 的潮流转移至南部电网与东南部电网间的其他联络线上, 引起线路过载, 引发连锁跳闸。

在事故后 0.7 s, 500 kV Bateias—Ibiúna C1 和 C2 线路因过负荷跳闸, 巴西南部电网对东南部电网功率失稳。

在事故后 1~2 s 的时间内, 振荡中心所处区域线路因距离保护动作相继跳闸。此时只剩下 525 kV Londrina—Assis—Araraquara 的线路因振荡闭锁, 逻辑正确闭锁保护而未跳闸, 保持南部电网和东南部电网联网运行。在振荡过程中, 南部电网频率最高达 63.5 Hz, 东南部电网最低频率降至 58.3 Hz, 如图 3 所示。

在南部电网中, 在事故后 1 s, Gov.Ney Braga

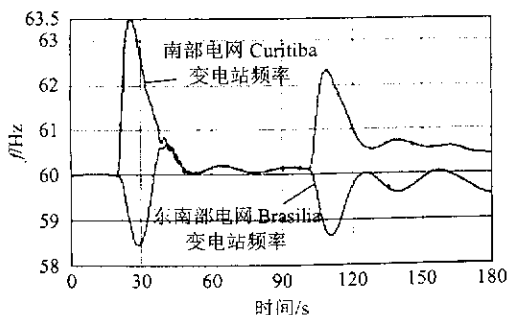


图3 巴西南部电网和东南部电网频率变化波形
Fig. 3 The frequency waveform in southern and south-east Bazillion grid

水电厂 2 台机组高周切机跳闸; 事故后 2 s, Itaipu-60 Hz 安稳装置判系统高周, 切除了 Foz do Iguaçu—Ivaiporã 的 3 回 750 kV 线路, Itaipu-60 Hz 系统机组全停; 在事故后 2.4 s, Gov.Bento Munhoz 水电厂 3 台机组高周切机跳闸。

在东南部电网中, 在事故后 2~2.3 s 间, 圣保罗地区 440 kV 系统因潮流减轻出现了过电压, 部分线路过压保护动作跳闸。

在事故后 2.7~4.5 s 间, 圣保罗、里约地区负荷中心地区失去电压支撑, 部分线路因电压崩溃跳闸。

在事故后 2.5~8.5 s, 由于 345 kV Ibiúna 变电站母线电压快速下降, 伊泰普 2 回直流送出系统的 4 个极相继因低电压保护动作跳闸。

至此, 伊泰普水电站送东南部的 3 回交流线路和 2 回直流线路全部跳闸。东南部电网电压崩溃, Sao Paulo、Rio de Janeiro、Espírito Santo 和 Mato Grosso 4 个州全停。

此时南部电网和北部、东北部电网仍通过 500 kV 系统联网, 在事故发生 20 s 后重新拉回同步。

在事故后 80 s, 500 kV Assis—Araraquara 线路因过载跳闸, 南部电网与北部、东北部电网解列, 北部电网低周减载动作 2 轮后保持了稳定。

2.2 事故原因及可借鉴的经验

系统大停电通常是由一系列因素相互影响、发展及扩大导致的^[12], 分析此次大停电的演变过程, 可以了解“11.10”巴西大停电的原因、巴西电网在安全防线设置中暴露的问题及可以借鉴的经验:

1) 事后巴西能源部长 Edison Lobao 说: “发生在星期二夜里的长达几小时的停电是暴风雨导致的。”伴随着大雨, 闪电和大风的极端恶劣天气使伊泰普 750 kV 交流送出通道的 3 条重要联络线同时跳闸, 超出了电力系统安全稳定设防标准, 是导致此次大停电的起因。

2) 继电保护的配置缺陷是事故扩大的重要原因。此次事故中, Itaberá—Ivaiporã C3 线路的高抗中性点小电抗瞬时过流保护未能躲过区外多重故障短路电流而误动跳闸, 造成第 3 条重要的联络线跳闸, 使事故范围迅速扩大。

3) 安稳控制和第 3 道防线的措施不足。事故发生时, 安稳装置按照策略正确动作, 系统仍然失去稳定, 说明安稳装置在严重故障情况下切机量不足。系统振荡后应依靠必要的振荡解列或者其它解

列措施,防止系统崩溃、避免造成长时间大面积停电和重要用户灾害性停电,使负荷损失尽可能减少到最小。从事故发展来看,系统振荡后并没有在关键点解列,说明第3道防线措施不完善。

4) 线路保护振荡闭锁逻辑存在严重缺陷。在系统振荡中,多回线路距离保护无序跳闸,说明了继电保护振荡闭锁功能不完善。唯有 525 kV Londrina—Assis—Araraquara 的线路因配置振荡闭锁逻辑并正确闭锁保护而未跳闸,为系统再次拉回同步创造了条件,但仍因网架严重削弱,此线路在以后过载跳闸,最终南北电网解列,失去了缩小影响范围的机会。

5) 受端系统动态无功补偿不足。在连锁跳闸的初始阶段,500 kV Bateias—Ibiúna C1 和 C2 线路由于无功补偿不足,电压下降,线路电流增加以致过负荷保护动作跳闸,随后引发一系列的连锁跳闸。之后也是因为受端系统动态无功补偿不足电压下降严重,才导致伊泰普直流系统低电压保护动作跳闸,引起负荷中心地区电压崩溃。

6) 预防性控制措施未能有效发挥作用。在事故当日 14:00 左右,巴西电网调度机构根据雷电监测系统的预警,降低了伊泰普交流送出系统的潮流,但在 20:00 左右恢复了送电计划。事后分析此次事故是因雷电暴雨闪络导致的多重故障,气象预警系统在 22:00 前后未能有效发挥作用,失去了避免大停电发生的机会。

7) 大区电网的失步再同步现象值得深入研究。此次事故中,一个值得注意的现象是在系统失去同步后,在送端系统高周切机、受端系统电压崩溃损失大量负荷的共同作用下,系统自动再次拉回同步。对于担负着大负荷送电任务的联络线,如何将“再同步”控制措施与“失步解列”相配合,降低极端故障导致系统失去同步后的影响范围和负荷损失,是值得深入研究的问题^[13]。

3 本次事故对南方电网的启示

3.1 相似点

南方电网与巴西电网有许多相似之处:1) 巴西电网特高压交直流、大容量、远距离送电的电网结构与南网相似;2) 圣保罗和里约热内卢地区是负荷中心,存在复杂的电磁环网,与广东电网有类似之处;3) 伊泰普送出 750 kV Ivaiporã 站有 500 kV 出线接入东南部电网,存在电磁环网,与广西电网

有类似之处;4) 巴西电网和南方电网的安全稳定运行均高度依赖安全稳定控制措施。

3.2 强化高风险区域线路运行维护和事故预想

从巴西电网和南方电网的运行经验可以发现,线路跳闸往往在极端天气下于特定区域集中出现。巴西电网历史上发生的许多停电事故都与伊泰普 750 kV 送出工程故障有关,该送出通道气候环境恶劣,多次引发大停电事故。

南方电网中西电东送主通道线路走廊相对集中,沿途地理环境恶劣,气候条件复杂,局部电网位于大面积雷暴、污闪多发和冰灾频发区域,多次出现区域性多重故障相继发生的情况。对于此类多重连续故障,如果控制措施不当或不及时,极易导致事故扩大乃至引发稳定破坏、系统崩溃事故。在日常工作中,必须结合局部电网运行特性制定事故预案,加强线路的清扫和维护,强化风险预警,避免事故扩大。研究极端天气与电网故障发生的关联关系^[14],建设电网气象监测及预警系统。

3.3 深入研究电磁环网解环、电网分区运行和直流送端孤岛运行方案

高低压电磁环网和交直流并联运行的系统结构极易导致功率转移。当高压线路或者直流线路故障跳闸后,较大功率会转移到低压线路或者交流线路,引起系统振荡或者线路过载。对巴西及世界范围历次大停电原因分析可以看出,由于存在电磁环网导致事故过程中潮流转移引发多回线路连锁无序跳闸是其中的主要原因。

从电网结构上看,南方电网在分区运行上要优于巴西电网。南方电网省网间均通过 500 kV 交流线路联网运行,不存在电磁环网。在省网内部,贵州、广东电网均较好采用了分区运行的方案。目前在广西、云南及粤北、粤西地区尚存在一定数量的电磁环网,这些电磁环网通常都是该地区运行的风险点。应深入研究解环运行方案,尽快消除电磁环网运行带来的风险。但是南方电网西电东送主通道都是交直流并联运行,交流通道必须留有较大的裕度,以防止直流通道故障跳闸或闭锁后的功率转移。在规划上要研究直流送端孤岛运行的电网结构,减少功率转移的危害。

3.4 深入分析事故过程继电保护动作行为

此次事故的起因因为伊泰普电厂 750 kV 送出通道 3 条线路同时跳闸,其中包含继电保护误动的因素。随后负荷转移、系统振荡过程中引发的保护无

序跳闸导致事故迅速扩大。

南方电网 500 kV 线路高压电抗器中性点小电抗电流保护都是有延时的,在区外故障时不会先动作。高压线路距离保护振荡闭锁采用的是突变量启动短时开放原理,在振荡时不会失去闭锁功能。这一点要优于巴西电网。但是 500 kV 电网故障如果不能快速切除,可能引起系统失稳。例如 2006 年 6 月 23 日南方电网云南罗平变 5122 开关爆炸,因存在保护死区,依靠元件远后备切除故障,事故造成云南网解列,罗平变 500 kV 双母停电,马窝换流站极 1、极 2 换流变中性点零序过流保护动作,天广直流双极跳闸。事后分析表明,此次事故如发生在高峰段,可能导致系统失稳。继电保护必须贯彻逐级配合的原则和在系统振荡时不允许误动的原则。随着电网的发展,隐藏的保护缺陷可能在运行中暴露出来,必须跟踪分析事故过程中继电保护动作行为,不断提出改进措施,及时消除继电保护装置或原理上存在的缺陷。

3.5 进一步优化和协调 3 道防线间的配合

本次事故中安稳系统正确动作切机但仍然发生了系统振荡,在系统振荡过程中,没有在合适地点正确解列,振荡中线路保护无序跳闸,引起受端系统电压崩溃和伊泰普送出 2 个 ± 600 kV 直流双极闭锁导致大面积停电。第 3 道防线未能起到有效的作用。安全稳定控制系统和第 3 道防线在整体配置上存在严重缺陷。

南方电网的安全稳定运行高度依赖稳控系统和第 3 道防线。直流输送功率较大,若西电东送主通道上多回直流同时或相继闭锁,会引起较大的潮流转移。只能依靠安稳装置正确动作和 3 道防线协调配合。适当、正确地选择解列点、配置解列装置和受端低频、低压切负荷措施是防止发生超过设防的严重故障导致系统崩溃、尽可能减少负荷损失的重要措施。必须不断完善安全稳定控制策略,加强 3 道防线协调配合,提高装置动作可靠性,筑牢电网安全防线。

3.6 高度重视受端系统电压稳定问题

此次事故中圣保罗、里约负荷中心地区发生电压崩溃,导致伊泰普直流系统跳闸是事故扩大的重要原因。如能在负荷中心区配置足够动态无功储备和低压减载装置,可能会避免直流跳闸,大幅减少损失负荷,缩小故障影响范围。

在南方电网中,广东受端系统和途经广西的送

电主通道都面临着动态无功储备不足的问题,在严重故障下存在发生电压失稳的风险。特别是广东多回直流落点相距不远,严重故障时电压下降会引起多回直流同时闭锁,安全风险很大^[15]。需进一步深入研究此类问题,完善网省电压协调控制,配置足够无功补偿装置并加强运行维护,加装 SVC 等新型无功补偿装置,足额配置低频、低压减载装置,提高系统无功、电压的管理水平。

3.7 重视黑启动演练

作为电力系统安全措施的最后一条,必须制定适合本网情况的黑启动方案,确保系统全停后能够安全、快速的恢复。调度员需要积累系统全停后的事故处理经验。在现代电力系统可靠性不断提高的情况下,巴西电网在近年的几次大停电事故处理中积累了较丰富的经验。此次事故中,巴拉圭方面在事故后 15 min 逐步恢复供电;巴西圣保罗在停电 2 h 后开始恢复供电,4 h 后整个系统基本恢复供电,系统恢复速度之快是值得认真借鉴的。

南方电网中贵州电网和海南电网经历过实际黑启动的考验,有很多经验可以总结和吸取。南网总调也制定了详细的黑启动方案并逐年修编,但缺少实际的经验,应在系统允许情况下择机进行系统黑启动演练,研究开发黑启动辅助决策支持系统,同时要进一步研究学习巴西的黑启动经验^[16]。

4 结语

南方电网目前已形成“8 交 5 直”的西电东送骨干网架,无论是送电规模还是网络的复杂性均高于巴西电网。面临类似的运行风险,巴西电网自 1999 年以来因类似原因已三度出现损失负荷超过 20 GW 的大停电事故,而南方电网较好地维持了安全稳定运行,完善的 3 道防线建设和高效的调度运行体系在其中发挥了重要作用。鉴于南方电网与巴西电网在运行特性上存在较高的近似度,相关经验教训仍值得认真借鉴。

参考文献

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] 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 system grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [4] 甘德强, 胡江溢, 韩桢祥. 2003年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4.
Gan Deqiang, Hu Jiangyi, Han Zhenxiang. Thinking over several blackouts in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4(in Chinese).
- [5] 李春艳, 孙元章, 陈向宣, 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(in Chinese).
- [6] 葛睿, 董昱, 吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及其对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 1-6.
Ge Rui, Dong Yu, Lu Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 1-6(in Chinese).
- [7] Gomes P. New strategies to improve bulk power system security: lessons learned from large blackouts [C]. Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [8] Gomes P. Brazilian defense plan against extreme contingencies[C]. CIGRE/IEEE PES International Symposium, Montreal, Canada, 2003.
- [9] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1-6.
Mao Xiaoming, Wu Xiaochen. Analysis on operational problems in South China AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 1-6(in Chinese).
- [10] Report ONS RE3 252/2009. Analysis disruption of the day 10/11/2009 at the 22h13m involving the Shutdown of three circuits LT 765 kV Itaberé-Ivaiporã[R]. Brazil ONS, 2009.
- [11] 南方电网技术研究中心. 2009年11月10日巴西大停电事故分析报告[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2010.
- [12] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 34-76.
- [13] 王梅义. 失步发电机组的再同步机理[J]. 南方电网技术, 2007, 1(2): 6-12.
Wang Meiyi. Mechanism of the resynchronization of out-of-step generator sets[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(2): 6-12(in Chinese).
- [14] 苏盛, 李银红, 段献忠. 电网故障自组织临界性及其在应对极端天气中的应用[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 387-394.
Su Sheng, Li Yinhong, Duan Xianzhong. Self-organized criticality of power system faults and its application in adaptation to extreme climate[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 387-394(in Chinese).
- [15] 黎定中. 防止广东电网大停电的建议[J]. 广东电力, 2005, 18(3): 1-12.
Meng Dingzhong. Recommendations to prevent Guangdong power system cascading blackout[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(3): 1-12(in Chinese).
- [16] Gomes P. Guidelines for power system restoration in the Brazilian system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1159-1164.



陈亦平

收稿日期: 2010-01-31。

作者简介:

陈亦平(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统调度和事故分析工作, E-mail: chenyping@csg.cn;

洪军(1953—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事电力系统调度和继电保护运行工作。

(责任编辑 王晔)