

电网典型事故事件分析

(2011~2015年)

国家电网华中电力调控分中心 组编

非
外
借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网典型事故事件分析

(2011~2015年)

国家电网华中电力调控分中心 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

国家电网华中电力调控分中心根据 2011~2015 年统计的电网事故资料, 在分析并总结当前电网事故发生的规律和特点的基础上, 组织编写了本书。

全书共分十三章, 分别为电网运行基本情况及典型事件概述、国外重大电网事件、直流系统故障导致的电网事件、交流系统故障导致直流异常事件、网源不协调导致的电网事件、新能源脱网事件、设备原因导致的电网事件、自然灾害导致的电网事件、外力破坏(电网结构缺陷)导致的电网事件、人为操作导致的电网事件、继电保护及安全自动装置异常导致的电网事件、自动化系统异常导致的电网事件、通信设备异常导致的电网事件。每章中的案例都按照事件发生日期的先后顺序排列, 对每次事件的经过、影响及原因都进行了详细的分析、描述, 并认真总结了事件经验教训及启示。

本书可供电力系统安全生产及管理相关专业人员学习、借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

电网典型事故事件分析: 2011~2015 年 / 国家电网华中电力调控分中心组编. —北京:
中国电力出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5198-0987-4

I. ①电… II. ①国… III. ①电力系统—事故分析—世界—2011-2015 IV. ①TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 172599 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 苗唯时(010-63412340) 安 鸿

责任校对: 太兴华

装帧设计: 张俊霞 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 11 月第一版

印 次: 2017 年 11 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 10.75

字 数: 255 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 45.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

本书编写组

主 编 李 勇

副 主 编 吕东晓 徐友平 奚江惠

参编人员 徐遐龄 李勇_(小) 刘 阳 黄海煜

杨 超 汪 旻 姜 曼 刘志成

潘晓杰 邵德军 郭崇军 汪皓钰

汪 辰 熊 玮 谈林涛 李东昆

刘 兵 党 杰

“十二五”期间，随着电源和电网的快速发展，我国电力工业已进入了特高压、大电网、大电源的新阶段。电网结构的逐步完善和电网管理水平的不断提高，使我国电力系统的安全稳定水平大幅提升，杜绝了电力系统稳定破坏事故的发生。进入“十三五”，随着特高压直流和新能源的发展，电网特性一体化、电力电子化、故障全局化的特征日趋明显，电网安全运行面临新的风险，迫切需要各级电力系统运行和管理部門总结电网事故发生的规律和特点，从事故中发现新问题、探索新机理、制定新措施，认真吸取事故教训，加强和规范电网安全管理工作，提高大电网本质安全的水平。

本书归纳整理了“十二五”期间电网运行出现的具有一定代表性的典型事件，包括交、直流系统故障电源与电网不协调、继电保护及安全自动装置、二次控制系统、自然灾害、设备缺陷和外力破坏等导致的电网故障或异常，并对国外发生的具有较大影响的停电事故进行了分析，以此为鉴，希望能对电力系统运行及管理人员有所助益，防微杜渐。

本书共精选了典型电网事故 50 余起，除了按一次/二次设备原因、自然灾害原因、外力破坏原因等常规类型分类外，还结合电网发展的新形势，增加了按直流系统故障导致的电网事件、交流系统故障导致直流异常事件、网源不协调导致的电网事件及新能源脱网等新的类型事故共十三个部分分类阐述，分析了对事故的经过、影响及原因，总结了事故的经验教训和启示。

本书在编写过程中得到了公司领导的大力支持，并对参与本书编写以及提供资料的相关同事表示衷心的感谢。

由于水平和编写时间有限，书中仍有疏漏与不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2017 年 7 月

前言

第一章 电网运行基本情况及典型事件概述

一、“十二五”电网结构变化及主要特点	1
二、“十二五”电网典型事件特点	3
三、典型事件的启示	5

第二章 国外重大电网事件

一、2011年“2·4”巴西大停电	6
二、2011年“9·8”美国和墨西哥大停电	10
三、2012年“7·30”“7·31”印度大停电	14
四、2015年“12·23”乌克兰网络攻击停电	21

第三章 直流系统故障导致的电网事件

一、2012年12月15日楚穗直流极Ⅰ闭锁	24
二、2013年6月30日伊穆直流极Ⅱ闭锁	28
三、2013年7月5日两直流输电系统相继闭锁	32
四、2015年7月1日T直流配套火电机组次同步振荡	35
五、2015年8月5日牛从乙直流极Ⅰ闭锁	39

第四章 交流系统故障导致直流异常事件

一、2011年11月16日、12月11日柴拉直流闭锁	42
二、2012年12月15日高肇直流极Ⅱ闭锁	45
三、2013年8月19日LF直流双极闭锁	47
四、2013年11月6日FF、LF、GN直流换相失败	51

■ 第五章 网源不协调导致的电网事件

- 一、2014 年 3 月 7 日火电机组调速系统异常导致电网低频振荡 54
- 二、2015 年“1·23”藏木电厂功率波动 57
- 三、火电机组低电压穿越能力不足导致的跳机 62

■ 第六章 新能源脱网事件

- 一、2011 年 2 月 24 日甘肃酒泉大规模风电脱网 65
- 二、2011 年 4 月 17 日河北省张家口沽源地区大规模风机脱网 71
- 三、2011 年吉林长岭地区风电场风机脱网 77
- 四、2014 年云南电网风机脱网 80
- 五、2015 年 3 月 20 日欧洲日食影响电网运行 83

■ 第七章 设备原因导致的电网事件

- 一、2012 年 6 月 9 日 J 电网 4 个厂站 220kV 母线失压 88
- 二、2012 年 H 电网 J 变电站主变压器跳闸 91
- 三、2013 年 2 月 18 日 Y 电网 S 变电站 500kV 母线停电 94
- 四、2014 年 5 月 1 日 Y 电网 Z 变电站“N-5”故障 97
- 五、2015 年 9 月 18 日 E 电网 G 电厂 220kV 母线跳闸 102

■ 第八章 自然灾害导致的电网事件

- 一、2011 年 1 月 5 日 S 电网覆冰导致四线同停 105
- 二、2011 年 3 月 21 日新疆电网大面积污闪 108
- 三、2012 年 4 月 11 日宁夏电网覆冰积雪闪络 110
- 四、2012 年 5 月 9 日四川电网山火造成线路跳闸 112
- 五、2012 年 5 月 12 日南方电网雷击损坏 500kV 变压器 114
- 六、2013 年 7 月 20 日 HB 电网 SN 双回线风偏跳闸 116

■ 第九章 外力破坏（电网结构缺陷）导致的电网事件

- 一、2012年4月10日深圳电网停电..... 118
- 二、2014年8月9日330kV H变电站全停..... 121

■ 第十章 人为操作导致的电网事件

- 一、2011年12月28日新疆750kV巴州变电站220kV母差保护误动..... 123
- 二、2014年9月16日Z电网M变电站人员误操作..... 125
- 三、2014年10月19日G电网330kV YW一线故障扩大..... 128

■ 第十一章 继电保护及安全自动装置异常导致的电网事件

- 一、2013年6月14日青海电力330kV乌兰变电站母差保护误动..... 130
- 二、2013年7月25日H电网D电厂出线跳闸..... 132
- 三、2013年9月22日N电网W电厂安全稳定控制装置误动导致机组跳闸..... 134
- 四、2013年10月15日H电网E电厂两台发电机组同跳..... 136
- 五、2013年10月26日H电网J智能变电站多套差动保护同时误动..... 138
- 六、2013年11月16日H电网N变电站主变压器跳闸..... 141
- 七、2014年8月1日N电网V电厂安全稳定控制装置未正确切除机组..... 143
- 八、2015年3月23日S电网500kV X智能变电站线路保护和母线保护误动..... 145

■ 第十二章 自动化系统异常导致的电网事件

- 一、2013年S省调EMS系统时钟信号故障导致水电厂减负荷..... 147
- 二、2013年G电厂AGC故障导致电厂有功输出功率与调节需求反向波动..... 149
- 三、2015年7月3日H省电力调度部门UPS故障导致自动化系统部分失效..... 151

■ 第十三章 通信设备异常导致的电网事件

- 一、2012年5月23日M变电站内通信电源故障..... 153

二、2014 年 4 月 29 日 H 省电力公司 TMS（通信管理系统）停机 155

三、2014 年 9 月 23 日 G 省电力公司调度大楼弱电井失火 156

四、2015 年 4 月 8 日 H 省调度数据网业务通道中断..... 157

五、2015 年 7 月 28 日 G 电厂通信光缆故障 159

参考文献..... 160

电网运行基本情况及典型事件概述

一、“十二五”电网结构变化及主要特点

(一) 电网结构变化

改革开放以来,我国电力工业一直以较快的速度发展,经历了机组由小到大和电网由小到大、由弱到强、电压等级逐步提高的发展历程,技术和管理水平不断提升,走出了一条具有中国特色、符合我国国情的发展道路。进入 21 世纪后,电力工业更是取得了前所未有的成就,国家在电网领域加大了投资和建设力度,电网发展与电源建设相协调,电网的可靠性、灵活性和经济性显著提高。

2015 年,全国发电装机容量 14.88 亿 kW。装机构成中,火电装机容量 97 969 万 kW,随着风电、太阳能的发展,火电占比从 2000 年的 74.4%下降至 2015 年的 65.8%;水电(含抽水蓄能)装机容量 31 791 万 kW,占比 21.4%;风电和太阳能占比将近 10%。全社会用电量达到 5.55 万亿 kWh。

到“十二五”末,全国联网格局已基本形成,形成华北—华中(西南)、华东、东北、西北、南方五个主要同步电网,除中国台湾外,实现了全国联网,大电网规模效益初步显现。华北、华中通过 1000kV 交流同步联网,东北与华北通过高岭直流背靠背实现异步联网,西北与华中(西南)通过灵宝直流背靠背、德阳—宝鸡 ± 500 kV、哈密南—郑州 ± 800 kV 直流工程实现异步联网,西北与华北通过宁东(银川东)—山东(青岛) ± 660 kV 直流工程实现异步联网,华中与华东通过葛洲坝—上海(南桥)、三峡(龙泉)—江苏(政平)、三峡(宜都)—上海(华新)、三峡(荆门)—上海(枫泾)4 回 ± 500 kV 直流工程以及金沙江(向家坝)—上海(奉贤)、雅砻江(锦屏)—江苏(同里)、金沙江(溪洛渡)—浙西(金华)3 回 ± 800 kV 直流工程实现异步联网,华中与南方通过三峡(荆州)—广东(惠州) ± 500 kV 直流工程实现异步联网。西藏与西北电网通过青海—西藏 ± 400 kV 直流工程实现异步联网,2014 年 11 月建成川藏电力联网工程。

我国电网已形成 1000/500/220/110(66)/35/10/0.4kV 和 750/330(220)/110/35/10/0.4kV 两个交流电压等级序列和 ± 500 (± 400)、 ± 660 、 ± 800 kV 直流输电电压等级序列;形成了华北、华中(西南)、华东、东北、西北和南方五大区域电网,西北以 750kV 为主网架,其他区域以 500kV 为主网架。特高压电网在快速发展中,华北、华中、华东电网电压等级已提升到 1000kV,建成晋东南—南阳—荆门、淮南—皖南—浙北—上海、浙北—浙中—浙南—福州特高压交流工程;全国范围内已投运 6 回 ± 800 kV 特高压直流输电工程。

总体上说,电力工业的发展有力支撑了国民经济快速发展和人民生活水平的不断提高。

(二) 电网发展主要特点

“十二五”期间跨区互联电网继续快速发展,电网结构变化的主要特点是跨区特高压直流

通道多，而且单一直流通道输送容量大，单一直流工程输送容量从不超过 3000MW 提高到 8000MW，量的变化使直流运行状态变化对于送、受端电网造成的影响已无法忽视。大规模交直流系统互联电网结构形成后，大容量直流换相过程通过换流阀与送、受端交流系统产生密切的交互影响，使得传统交流系统中的扰动形态发生根本改变，交直流连锁反应成为常态。交流电网短路故障，甚至设备的正常操作如空载变压器充电等引起的暂态响应，经过直流的放大作用，均可能形成送、受端系统大幅度的连锁反应。

电源结构变化的主要特点是接入电网风电、光伏新能源大幅增加，受端电网直流大规模馈入。大容量直流、大规模并网的风电、光伏等新能源电力使电力电子型电源在系统中所占比重日益增加。电力电子装置具备快速响应特征，在传统同步电网以工频为基础的功角稳定、低频振荡等稳定问题之外，出现了中频带（5~300Hz）的电力电子装置涉网稳定新问题。而且电力电子装置通常对电网电压、频率波动适应性较差，其设备敏感性与强直弱交特性叠加，使得交流系统故障并出现直流换相失败、再启动等扰动期间的暂态过电压和短时频率升高问题，还可能引起电力电子装置异常，继而引发连锁反应。此外，根据直流设计原则，特高压直流输电可大规模输送有功功率，不向系统提供动态无功功率，动态过程中需从系统吸收大量无功功率，可能导致受端电网无功功率不足。

总体上说，随着特高压交直流电网快速发展、新能源占比快速提升，电网运行特性与传统电网并不完全相同。

二、“十二五”电网典型事件特点

(一)对“事件”的定义

对于电力系统，“事件”不等同于“事故”。根据《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(中华人民共和国国务院令 第 599 号)，电力事故包括电力安全事故，电力安全事故指电力生产或电网运行过程中发生的影响电力系统安全稳定运行或者影响电力正常供应的事故(包括热电厂发生的影响热力正常供应的事故)。

《关于印发电力安全事件监督管理暂行规定的通知》(电监安全〔2012〕11 号)中对电力安全事件的定义为：未构成电力安全事故，但影响电力(热力)正常供应，或对电力系统安全稳定运行构成威胁，可能引发电力安全事故或造成较大社会影响的事件。《电力安全生产信息报送制度》中对于事件的定义是：未构成电力事故，但对社会或电力系统造成较大影响的不安全事件。可见电网“事件”的含义远比“事故”宽泛，不以造成事实上的后果作为判定依据，而是强调其可能带来的后果的影响，更侧重事件反映出的问题或隐患，如果其成因(机理)或可能产生的影响有较强的警示和借鉴价值，则为典型事件。

(二)“十二五”典型事件概况及特点

2003 年美加“8·14”大停电、2006 年 11 月 4 日欧洲互联电网大面积停电、2009 年 11 月 10 日巴西大停电等电力系统大停电事件受到了世界范围内的广泛关注。在此之后，在“十二五”期间，国外仍发生了一些具较大影响的停电事故，如 2011 年“2·4”巴西大停电、2012 年“7·30”“7·31”印度大停电、2015 年乌克兰停电等事故，这些事故的发生虽然是多种小概率事件集中出现造成的偶然事件，但是一定程度上反映了电力体制、电网结构、安全管理等方面存在的问题，而中国电力系统在“十二五”期间以及更长的时间段内均未发生大面积停电事故，中国电力系统的优秀表现与其长期坚持相对严格的安全管理是密不可分的。尽管未发生大面积停电事故，但是“十二五”期间还是出现了较多事件，这些事件足以引起电力系统工作人员的重视，并应在技术、管理上采取有效措施避免类似事件再次发生，从而杜绝出现大面积停电事故。

“十二五”期间，电网典型事件的一个突出特征就是与电力系统电力电子化特征逐渐凸显相伴而生的直流、风电和光伏等新能源与交流电网相互影响的事件增多，并且对电网的安全稳定运行带来了不利影响。

“十二五”期间，电力系统中直流与风电、光伏新能源电源快速增加，电力系统电力电子化特征逐渐凸显。相应涉及直流、新能源方面的事件一方面在数量上呈上升趋势；另一方面对电网的影响也从局部性向全网性演变。直流设备异常、直流控制保护逻辑与交流电网不协调会对送、受端交流电网产生影响；电力电子设备对频率、电压等运行条件的敏感性高，交流电网的故障或波动也可能造成直流的电力电子设备异常，继而影响送、受端交流电网，即存在放大电网扰动的风险。例如：2013 年 7 月 5 日，受恶劣天气影响，H 电网 500kV SX 线故障跳闸，该交流系统的扰动，造成向 H 电网送电的 FF 特高压直流受端换流站出现换相失败，继而该直流双极低端闭锁，损失功率 3200MW，是一起交流故障影响直流，继而将较大扰动传导到送端电网的事例；2014 年 6 月 19 日，BJ 直流极方式切换过程中，极 I 高端晶闸管故障后闭锁，这是一起直流故障影响交流电网的事件。在这两起事件中，前者属于交流电

网故障产生短时电压跌落后,引起直流连续换相失败继而闭锁,又对送、受端交流电网造成影响,后者属于直流设备异常,对交流电网带来较大扰动。因为特高压直流输送功率大,这类的交直流相互影响对交流电网的扰动较大,相应地对电网安全稳定运行的威胁较大。此类事件反映了电网发展阶段的特点。

风电、光伏等新能源都依赖电力电子变流器串联或并联接入电网,电力电子开关替代传统机械开关,成为电力系统常用元件。这些电力电子设备对交流电网的扰动较为敏感,2011年2月24日,G电网JQ地区大规模风电脱网,同年4月17日该地区再次发生大规模风机脱网以及J电网发生的风机脱网等事件,这些事件均可看作电网电力电子化特征逐渐显现的典型事件。

同样,直流,串补、SVC等FACTS设备和风电、光伏的增多也使次同步振荡^①的风险有所增大。例如:2009年南方电网GG二回高压直流输电工程发生次同步振荡事件,2015年7月,特高压TZ直流升功率调试过程中,发生送端换流站近区火电机组轴系扭振保护动作而停机事件。

新能源大规模集中并网、分布式电源快速发展增大了源网协调难度,风电、光伏这类新能源与交流电网相互影响的事件还可归入源网协调事件一类。不过在本书的源网协调事件中,仍是以常规电源的源网协调问题为主,常规电源的源网不协调对电网安全稳定运行造成影响的事件仍是“十二五”期间的典型事件,其中有因调速器参数设置不当引起的,如2015年1月23日藏中电网某水电厂机组功率波动事件;也有因热工保护动作判据不当造成的,如2015年4月15日重庆电网某电厂机组造成的省间甚至华中—华北特高压联络线长南线功率波动事件。源网协调始终是电网安全稳定运行的关键,特别是在跨区互联紧密度不断增加,电网一体化特征明显的背景下,源网协调更是关系大电网安全的重要课题。

此外,作为一个自然灾害频发、电力设备数量巨大的电力系统,自然灾害,一、二次设备原因,外力破坏,人为误操作等传统安全威胁因素始终是造成电网安全稳定运行事件的原因。

总体上说,在“十二五”期间,电网运行典型事件在传统的源网协调、自然灾害、设备原因、外力破坏、人为误操作等类型基础上,因直流与新能源快速发展,电力电子设备大量应用,出现了更多的电力电子化设备与传统交流电网产生密切交互影响的事件,这一特点应引起足够关注。

^① 次同步振荡的频率是小于工频,但又远大于低频振荡的0.5~2Hz。目前所采用的串联电容补偿大规模送出系统很容易在发电机组引发次同步振荡,对轴系损害很大;主要形成的原因有电气部分的感应发电机效应、自励磁,还有扭转作用以及暂态扭矩放大等;另外,FACTS装置以及励磁调速系统、HVDC等也可能会引发次同步振荡。

三、典型事件的启示

综观包括中国在内的全球主要国家电网的电网事故和那些得到及时、有效处置而未发展成为事故的各类典型事件，可以得到很多启示，主要有：

- (1) 合理的网架结构和电源结构是保证大电网安全的物质基础。
- (2) 符合电力系统规律的电网管理体制是保障电网安全的必要条件。
- (3) 设备可靠运行及完善的电网保护、控制系统，是确保电网安全的重要手段。
- (4) 适应本质安全方面，新能源迅速发展和电力电子化设备的广泛应用是电网发展的重要方向。

上述方面越完善，则电网防御源网不协调、自然灾害、设备故障、外力破坏、人为操作失误等的能力将越强，同时发生源网不协调、自然灾害、设备故障、外力破坏、人为操作失误等的风险也将降低。

其中启示(1)几乎是所有电网事故都会得出的一大结论，在多重偶然因素叠加带来的复杂故障连锁发展过程中，电网结构的薄弱环节毫无疑问将受到严峻考验。但是，资源分布的天然特性和电力系统技术经济合理性的要求也决定了网架结构和电源结构难以适应所有运行方式和故障考验，因此所谓合理的电网结构是一个相对概念，确保电力系统安全稳定运行还需要其他管理、技术措施。实践证明，中国电网统一调度、分级管理在事前的安全管控、事中各级调度的统一协调和快速处置、事后的“四不放过”的全链条安全管理中效率高、效果好，是适应中国电力系统运行规律的管理模式。当然，具体的管理细节仍需结合技术进步、源网荷特性变化等因素与时俱进。“十二五”以来，源网荷的电力电子化倾向对电力系统特性的影响已越来越不容忽视。可以预见，未来随着大规模直流输电工程进一步发展，送、受端电网中将出现更多的直流换流阀，柔性直流输电技术也已逐步在舟山、厦门、张北等地开展试点；SVC、STATCOM、UPFC等FACTS设备因其响应速度快、调节范围广、控制更加灵活等优点，将在电力系统中得到更广泛的应用。电源侧在大力发展清洁能源的背景下，风电和光伏发电将继续快速发展。用户中分布式或集中式充放电类型的占比逐渐增大。电力电子设备在发、输、用电各环节所占比重将不断增长，电力系统逐渐进入大直流、大风电、大规模电力电子化阶段。这将成为电网运行安全防控面临的新挑战。面对这一新挑战，针对参与电力系统运行的源网荷各环节的电力电子化设备制定合理的技术标准并严格执行，同时提升控制技术将在预防和控制事故中发挥更重要的作用。总体上有完善的技术措施和管理措施始终是防范电网事故的关键，同时，不忽视那些未演变成事故的事件，从中吸取经验教训，防微杜渐，也是不断完善电网安全保障技术措施和管理措施的重要基础。

国外重大电网事件

一、2011 年“2·4”巴西大停电

(一) 事件概述

巴西位于南美洲东部，其电源结构以水电为主，水电装机约占总装机的 72%，火电约占 26%，核电占 2%，几乎没有新能源装机。巴西交流电压等级繁多，主要的电压等级系列有 765V、525V、400V、345kV、230kV 及 138kV，系统频率为 60Hz。

2011 年 2 月 4 日凌晨 0:20 左右，巴西发生大面积停电，开始于伯南布哥州的路易斯·贡萨加 (Luiz Gonzaga) 变电站，由于该变电站内保护装置中电子元件的故障，触发路易斯·贡萨加变电站的安稳系统自动关闭，断开了变电站所连的 6 条高压线路，引发大面积停电。受停电事件影响的为巴西东北部的 8 个州，1300 万人口，损失负荷 8000MW，停电时间从几分钟到数小时，大部分地区上午 8:00 前恢复供电^[1-4]。

(二) 事件经过

事件发生在路易斯·贡萨加变电站，该变电站是保罗·阿方索 (Paulo Afonso) 水利枢纽中心的 500kV 枢纽变电站，接线方式为 3/2 接线。

该变电站的主接线以及保护的動作情况如图 2-1 所示，共有米拉格里斯 (Milagres)、安杰林 (Angelim)、阿丰苏 (P. Afonso IV)、欧林迪那 (Olindina)、索布拉迪纽 (Sobradinho) 1 号和 2 号 6 条线路。

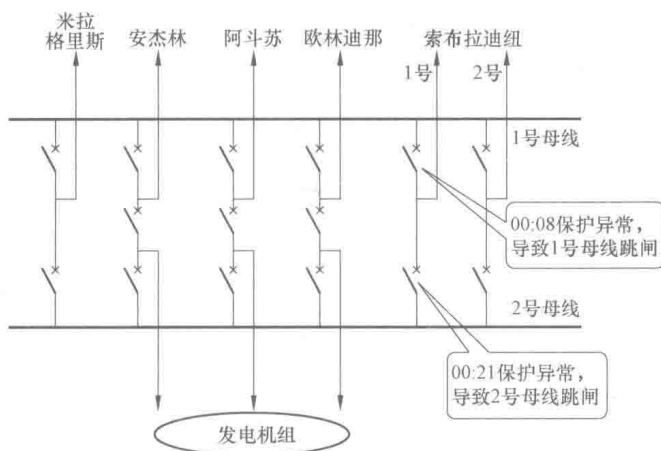


图 2-1 路易斯·贡萨加变电站

事件前东北部电网通过 4 回 500kV 线路与北部电网互联，通过 1 回 500kV 线路与中西部电网互联。

联络断面如图 2-2 所示，从图中可以看出事件前东北部电网为功率受入状态。

事件发生前一天(2011年2月3日)下午,圣若昂皮奥伊州一米拉格里斯线路因紧急检修停运。该线路的检修停运,削弱了保罗·阿方索区域水电北送能力。事件前东北部电网负荷8883MW,接受区外来电3237MW,占区域负荷的36.4%。区内机组发电5646MW,其中水电5369MW,占区域机组输出功率的95.1%,供区域电网60%的负荷,火电130MW,风电147MW。

巴西大停电事件是由继电保护装置误动导致的暂态功角失稳事件,整个事件过程大致可划分为以下5个阶段。

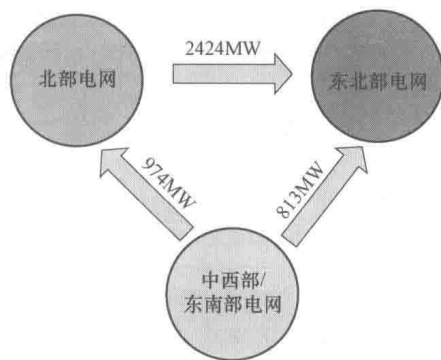


图 2-2 故障前巴西各地区电网潮流交换

1. 起始阶段

00:08, 路易斯·贡萨加变电站中路易斯·贡萨加一索布拉迪组1号线路故障,保护装置需要跳开与母线之间的两个边断路器。但由于保护装置中一块板卡异常,误认为路易斯·贡萨加一索布拉迪组1号线路与1号母线之间的断路器失灵,1号母线跳闸。此时系统的结构改变不大,仍然保持稳定状态,没有损失负荷。

00:20:40, 路易斯·贡萨加变电站运行人员对路易斯·贡萨加一索布拉迪组1号线路进行合闸操作,在合路易斯·贡萨加一索布拉迪组1号线与2号母线之间的断路器时,同样因保护板卡异常,失灵保护动作使2号母线跳闸。

2. 失步振荡阶段

00:20:40, 1、2号母线的跳闸导致路易斯·贡萨加一索布拉迪组2号线路和路易斯·贡萨加一米拉格里斯线路停运,加之事件前圣若昂皮奥伊州一米拉格里斯线路检修,使得中部水电基地送往北部沿海城市的主要通道断开。500kV线路跳闸后,潮流转移使部分线路过负荷跳开,电磁环网方式使更多低电压等级线路跳闸,最终导致东北部电网失步振荡。

3. 失步解列阶段

00:20:40, 失步解列装置动作,东北部电网和北部、东南部电网的联络线全部解列,进入孤岛运行方式。

东北部电网解列后,功率缺额大,系统频率低至56.8Hz,低频低压减载动作切除5754MW负荷。

4. 系统崩溃阶段

图2-3为东北部电网的频率曲线,从图中可以看出东北部电网解列后,系统频率低至56.8Hz。低频低压减载动作后,00:21频率恢复至61Hz,但由于损失了约65%负荷,东北部电网出现高频、过电压问题。00:21~00:21:50高频、过电压保护动作,切除了部分电容器、线路和3338MW机组。大量切机后,孤网频率又急剧下降至46.5Hz。00:21:50~00:29低频、低压减载轮番动作,系统频率维持在47~48.5Hz,过程持续7min20s,至00:29时系统崩溃。

5. 系统恢复阶段

巴西东北部电网中部区域在经历52min断电后首先恢复供电,东北部电网主要负荷在停电后8h恢复完毕。

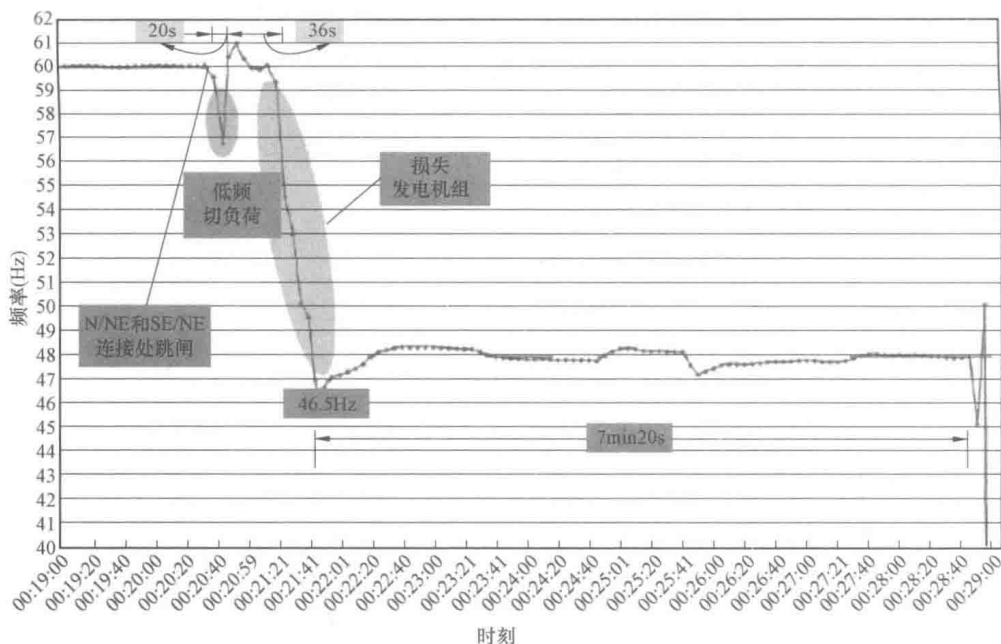


图 2-3 东北部电网的频率曲线

(三) 事件分析

1. 受端电网电源支撑能力匮乏，系统抵御连锁事故能力严重不足

巴西东北部区域电网的东北部沿海地区负荷中心主网架为 220kV 等级，缺乏 500kV 电压等级线路支撑。区域电网电源单一，水电出力约占网内机组出力 95%，供给 65% 的负荷需求，且集中分布于中部的保罗·阿方索区域；东北部电网接受区外电力比例占网内负荷的 36.4%。

巴西东北部电网重要输电断面上存在多个 500/220kV 电磁环网，在输送功率较大的情况下，一旦高电压等级线路故障跳闸，潮流转移到低电压等级线路后，很可能造成“多米诺骨牌效应”，诱发连锁跳闸。

2. 继电保护装置误动是引发巴西大停电事故的主要原因

在巴西电网停电事故中，路易斯·贡萨加—索布拉迪纽 1 号线路保护装置的板卡异常导致失灵保护误动，使变电站 1 号母跳闸；在重合线路时，仍然由于该保护的误动导致 2 号母跳闸，继而导致系统失步振荡。

3. 安控切机策略存在一定问题

巴西大停电事故中，东北部电网安稳装置按照事先设计切机控制策略执行，但系统仍失稳，其安稳策略存在一定的问题。

(四) 事件启示

1. 构建坚强合理的电网结构

电网结构的合理性是电力系统稳定运行的基础，对大电网尤其重要，要加强电网的超前规划和建设，确保电网与社会对电力的需求的同步快速发展。电磁环网的存在，给电网的运行管理和发展带来诸多问题和不确定因素。在网架结构不够坚强的电网中，如果高电压等级线路发生故障，低电压等级线路就会发生过载，变压器过负荷，甚至导致系统稳定性破坏，应尽量避免和消除严重影响电网安全稳定的不同电压等级的电磁环网。