

# 关于电网黑启动中厂网配合机制的研究

王莉丽<sup>1</sup> 韩 伟<sup>2</sup>

(1. 四川省电力公司调度中心 四川 成都 610041; 2. 四川省电力工业调整试验所 四川 成都 610000)

**摘要:** 电网全黑是电力系统最严重的事故形态, 针对电网黑启动中会遇到的问题, 探讨各变电站黑启动过程中厂网间如何协调配合, 并明确了各变电站的操作目标及各级调度机构的主要职责, 对调度机构处理电网全黑事故具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 电网全黑; 黑启动; 调度; 协调

**Abstract:** Black out of power grid is the most serious accident in power system. The difficulties that will be met in black start are described and the coordination between the plants and the power grid are studied. The operation targets for each substation and the main task for the different levels of the dispatching centers are defined, which provides a significant reference for the dispatching centers to deal with the black-out accidents.

**Key words:** black out of power grid; black start; dispatching; coordination

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0020-03

## 0 引言

电力系统是现代社会中最重要、最庞杂的工程系统之一, 由于自然灾害和单一事故引发的大停电事故在全世界范围内仍时有发生。

2004年美国8.14大停电源于1台68 MW的燃气轮机停运, 事故造成美国东北部和加拿大安大略省停电, 影响人口5 000万, 经济损失达60亿美元。调度员未经过黑启动训练, 操作不熟练, 从外部电源恢复供电的速度缓慢, 导致枢纽变电站用直流电源耗尽, 不能继续操作, 48 h后才逐步恢复。加拿大安大略地区则等了14 d才恢复。2008年四川的“5.12”汶川大地震使得四川电网负荷损失约4 000 MWh, 1座500 kV站及12座220 kV站停运, 位于震中天龙湖电厂、自一里电厂、紫坪铺电厂按事先准备好的黑启动方案在数小时内成功启动机组自带厂用电及向附近重要负荷供电, 不仅避免了水库漫坝的恶性事故, 而且有力支援了抗震救灾工作, 具有重大社会及经济意义。

目前三华(指华东、华中、华北电网)同步运行的交直流电网已经初步形成, 但自然灾害、人为误操作、保护误动造成潮流大范围转移从而引发大停电的风险仍然存在, 电网黑启动操作的可能性在局部电网及区域电网内都还存在。研究在黑启动操作中

如何克服电网由小变大过程中遇到的各种问题、厂网间如何协调配合以及调度机构间如何协调配合, 对于构建大电网的安全防御体系至关重要, 也对于处理一般电网事故具有启发作用。

## 1 黑启动过程中遇到的问题

黑启动是指整个电力系统因故障停运后, 不依赖别的网络的帮助, 通过系统中具有自启动能力机组的启动, 带动无自启动能力的机组, 逐步扩大电力系统的恢复范围, 最终实现整个电力系统的恢复和向用户供电, 期间将会面临电压、频率、振荡等一系列问题。

### 1.1 电压问题

电压问题是首要问题。在由小容量的发电机对长线路零起升压过程中, 同步发电机定子回路中联接有电容时(如与空载线路相连)就有可能因电枢反应的助磁作用而发生定子电流、电压幅值自发增大, 产生自激磁现象。电网恢复初期输电线路轻载运行, 由充电电流引起持续的工频过电压问题; 在系统中断路器操作如合空长线及合空载变压器时产生的操作过电压问题; 在某些特殊方式下电压互感器等非线性元件和系统中的电容元件组成许多复杂的振荡回路, 可能发生谐振过电压。

系统恢复过程中应及时投入电抗器、退出电容

器、调整主变压器分接头、发挥接入电厂的进相能力及对电压的快速调整能力,对线路充电尽量采用带有合闸电阻的开关进行充电,同时安排一定容量的低功率因数的负荷也是保证电压合格的必要条件。

### 1.2 频率问题

频率问题是另一个主要问题。频率与系统出力及负荷有关,控制频率涉及负荷恢复速度、机组调速器响应速度。

首先应保证小网的备用充足,以应付负荷波动,并入小电网的机组的旋转备用容量应大于发电负荷的30%;另一方面控制负荷恢复的节奏,负荷恢复不宜使频率较前次下降大于0.5 Hz,且小系统的运行频率不低于49.5 Hz。每轮负荷恢复后,待频率及电压恢复到正常运行水平时,再开始下一轮的恢复;最后应注意当发电厂与小网并列后,应尽可能将并网电厂的机组均开出,尤其是转动惯量较大的发电厂的机组,提高整个小网的转动惯量水平。同时每台机组所带负荷尽量均匀,避免单一机组跳闸造成跨网。

### 1.3 低频振荡问题

系统建立初期易形成一个多电源的小系统。此时可出现低频振荡问题,其实质是远距离送电系统缺乏足够的阻尼,阻尼性能变差。

装在发电机励磁系统中的PSS可以感受发电机转速或电磁功率的变化,适当调整励磁电流,改变发电机端电压,从而达到阻尼功率振荡的目的,因此并入小网的电源应及时投入PSS功能,同时在启动电源和被启动机组并列运行的小网中,要注意协调机组间的调节特性。如果机组调节特性差别较大,则手动调节和自动调节结合使用,避免子系统发生低频振荡。另外调度机构对子网内电厂出力及时调整以达到合理的潮流分布可有效抑制和消除振荡。

## 2 电厂的配合

### 2.1 黑启动电源的选择

黑启动首先是电厂的恢复,可承担黑启动任务的电厂为黑启动电源。一般黑启动电源有柴油发电机、燃气机组、水轮发电机、抽水蓄能电站。其中水轮发电机结构简单、没有复杂的辅机系统、厂用电少、启动速度快,因此是理想、方便的“黑启动”电源。但是并不是所有的水电厂都可作为黑启动电

源,如在一大流量低水头的河流上建设的水电厂大多为灯泡式贯流机组,如四川青居电厂,机组额定转速低,转动惯量较小,机组启动和停机过程短,转速变化快,在低负荷区机组振动较大,不仅不具备带自身厂用电的条件,也不具备在黑启动初期负荷较轻时子网调频调压要求,仅能依靠外界电源完成自身机组的启动。火电机组也是需外界电源才可启动的机组。

### 2.2 水电厂的配合

水轮发电机组自启动的关键是停电后控制水轮机导叶开启的压力油槽油压能否维持在正常工作范围内(允许时间一般为30 min左右)。当判断为电网全黑后,水电厂应马上检查水轮机导叶开启的压力油槽油压是否满足启动机组的要求,迅速开出机组,带厂用电,同时检查泄洪闸等水工建筑,保证大坝及上下游居民的生产生活安全。不承担黑启动任务的电厂也应配备柴油发电机或其他备用电源。

### 2.3 火电厂的配合

对于火电厂,电网全黑后,应依靠柴油发电机等设备采取人工盘车等措施,保证主机、主设备安全。火电厂作为需外界电源才能启动的电厂,其顺利启动对于维持子网运行的稳定性将起到关键的作用。火电厂的辅机系统包括电动给水泵、引风机、送风机、循环水泵、一次风机、凝结水泵、闭式水泵、开式水泵等。一般1台20 MW以上的水轮发电机就足以启动1台300 MW的汽轮发电机<sup>[1]</sup>。火电厂启动电动机的顺序理论上应考虑先启动大容量的电动机,先启动大电机,线路上电容电流可补偿一部分,但由于大容量电动机启动电流大,在后启动过程中有可能将初始系统拖垮。

### 2.4 电厂运行方式的调整

对于电厂应不待调度命令将本站的运行方式调整为一条出线开关在合位,拉开其余线路开关。承担黑启动电源的电厂,等待上级调度命令进行零起升压,不承担黑启动电源的电厂,等待系统来电,恢复本厂的厂用电及准备并列。

## 3 变电站的配合

### 3.1 运行方式的调整

在电网全黑时,由于站内蓄电池能提供正常运

行的时间范围有限,最小应能保证 1~2 h 内的供电,因此在直流操作电源能够供电时间范围内完成本厂站的方式调整是系统恢复的前提。运行方式调整的最终目的在于减少操作次数,尽快恢复负荷及向下一级待受厂、站送电。

变电站方式调整一般应遵循以下原则。

- ① 变电站应只保留 1 条无须操作即可直接受电的通道;
- ② 若本站接有地方并网的小电源时,应将并网断路器断开;
- ③ 避免高压线路带变压器同时充电;
- ④ 各 110 kV 变电站的 10 kV、35 kV 分路转为热备用,以有利于控制负荷,站用变压器保持运行状态;

方式调整可在确认电网全黑后由变电站包括电厂自行开始调整,调整完毕后向上级调度机构汇报。调度机构在进行恢复操作前应与本站核对状态,不能以自动化信息作为操作依据。

### 3.2 安稳装置及保护的调整

对于装在变电站包括电厂的安稳装置原则上退出稳控装置中的切机、切负荷出口压板即可。对于保护装置,原则上保护定值和投退方式不变,线路重合闸应停用。

### 3.3 四川黑启动方案子网 1

图 1 是四川电网黑启动方案子网 1 的初始状态,二滩电厂是本子网的黑启动电源,二滩电厂保留 1 条出线 500 kV 二石 1 线 1 个开关在合位,拉开其余所有开关,在调度指挥下对 500 kV 二石 1 线及石板箐 1 台主变压器进行零起升压。其余不承担黑启动电源任务的电厂及变电站应将本厂站方式调整为

余所有开关,原则上母联开关应保持在合位状态。

## 4 各级调度机构间的协调配合

### 4.1 中国调度机构的划分

中国现行调度模式为国、网、省、地、县“五级调度”架构,采用分层分区的运行控制模式,基本上按电压等级划分电网结构层级,以行政经济区域划分电网调度运行平衡区域。

国调、网调、省调是负责输电网的调度,地调及县调负责配电网的调度。在较大范围内发生的大停电事故,系统恢复过程将由多级调度机构共同来完成。黑启动操作是由上级调度对下级调度实施统一协调,实现了分区启动和分区协作的恢复调度。

### 4.2 调度关系的转移

为方便下一级调度恢复本调度管辖范围内的系统,同时集中精力进行本级调度机构管辖的电压等级的电网恢复,在黑启动准备阶段,部分电厂的调度权应进行转移,由下级调度机构进行调度。如在一些水电资源丰富的重庆、四川电网,部分接入 110 kV 及以下系统的水电厂的调度权由省级调度管辖,其调度权在电网黑启动期间交由相应地、县调负责,发挥小水电站的能力多点开花,加速电网恢复。接入 220 kV 电压等级由网调调度的电厂黑启动期间交由省级调度调度,方便 220 kV 系统的恢复。如华中网调调度的河南姚孟电厂、丹江电厂、湖北的隔河岩电、高坝州电厂、二江电站的调度权在黑启动期间交由各省调调度。各电厂调度权交出后,其厂用电的恢复及启动工作由相应调度机构负责。

调度权下放后,下级调度机构建立的子网在与上级调度机构恢复的系统进行并列时应防止非同期合闸。同时应尽量多考虑并列点,一旦预设并列路径遭到破坏后能迅速在其余路径实现检同期并列。因此调度机构在对某些开关操作应特别加以注意,在对这些开关下令操作前应作到任务明确(合环、并列还是送馈电负荷)。对于合环或并列的操作还应考虑是否满足合环或并列条件并使用同期装置。

### 4.3 各级调度机构的任务

地调度管辖的小电厂可以满足小的孤网的调频调压,可先恢复孤网的运行,视系统情况安排与系统并列。负荷恢复是地调的首要任务。按轻重缓急及

(下转第 77 页)

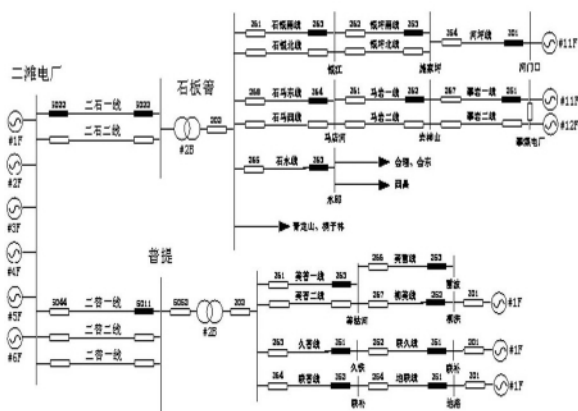


图 1 四川黑启动方案子网 1

等待来电方式,即保留 1 组来电开关在合位,拉开其

[2] Songhai Fan ,Xingliang Jiang ,Lichun Shu , et al. DC Ice - melting Model for Wet - growth Icing Conductor and Its Experimental Investigation [J]. Science in China Series E: Technological Sciences , 2010 , 53 ( 12) : 3248 - 3257.

[3] Songhai Fan ,Xingliang Jiang ,Lichun Shu , et al. DC Ice - Melting model for Elliptic Glaze Iced Conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery , 26 ( 4) : 2697 - 2704.

[4] Xingliang Jiang ,Songhai Fan ,Zhi jin Zhang , et al. Simulation and Experimental Investigation of DC Ice - Melting Process on an Iced Conductor [J]. IEEE Transactions

on Power Delivery , 2010 , 25 ( 2) : 919 - 929.

[5] 蒋兴良 范松海 胡建林 等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010 , 30 ( 1) : 111 - 116.

[6] 文聪. 输电线路导线覆冰断股分析 [J]. 云南电力技术, 2009 , 37 ( 5) : 24 - 25.

[7] 周鹏 李光辉. 架空地线的融冰方法及改进措施 [J]. 湖南电力, 2008 , 28 ( 4) : 47 - 48.

[8] 许树楷 赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述 [J]. 南方电网技术, 2008 , 2 ( 2) : 1 - 2.

(收稿日期:2012-04-01)

(上接第22页)

重要程度分批次恢复是必须遵循的原则。负荷恢复方案可参考低频减载方案。一般来说低频减负荷方案中没有涉及的负荷定为第1级,低频减负荷轮次为“后备”的负荷定为第2级,低频减负荷轮次为“特2”、“特1”轮的分别为第3、第4级,低频减负荷轮次为第6、5、4、3、2、1的分别定为第5、6、7、8、9和第10级。每1级还可按50 MW进行轮次划分<sup>[2]</sup>。

在负荷恢复中省地两级调度应做好配合,由省调根据子网的备用及潮流分布情况向地调下达负荷指标,地调根据省调下达的负荷指标,按级别轮次进行负荷恢复,待频率及电压恢复到正常运行水平时,再开始下一轮的恢复。负荷恢复不仅是黑启动的最终目的,也是建立一个稳定运行电网的必要手段。

省调负责省级电网发电和用电的平衡,负责省内500(330) kV及220 kV环网及所辖发电厂的调度运行管理。将子网做大做强是省调的主要职责。根据收集来的信息迅速确定黑启动路径是省调调度员的首要任务。启动路径应由电源到负荷的电压转换的次数尽量少、路径长度尽可能短为原则,并先启动离重要负荷近的机组,主网架先恢复单线联系。在子网做大做强的过程中和地调密切配合保证频率的稳定,同时密切关注电压情况,利用电容电抗及电厂进行调压,并合理分布子网的潮流。在子网运行稳定的情况下,尽快同步电气孤岛,扩大子网的规模。

网调调度管辖的主要是500 kV系统的骨干网络,在黑启动中负责各黑启动路径中网调调度设备的送电,为各省、市调相关地区提供启动电源。省、市调选择网调黑启动电源对其负荷供电后,与省调协调进行频率、电压调整。对于从220 kV系统开始

启动的子网,500 kV系统主要承担了子网间并列的任务。因此网调的主要责任在于省调将子网启动起来后,选择并列点,加强子网间的联系,提高电网运行的稳定性。根据各省调子网恢复的程度及先后次序研究省网黑启动子系统并列点和并列次序是网调调度的主要责任。

国调是电网调度的最高一级调度机构,国调调度管辖的主要设备以网间联络线及直流系统为主,这已经是黑启动过程中最后的一个环节。网间交流联络线主要视送受端的负荷平衡情况来恢复,对系统稳定性的提高并不具备显著效应。直流系统的恢复应在系统送、受端的发电和负荷都恢复到停电前一半的水平以上,并根据送受端的电力电量平衡情况来考虑是否有必要恢复。

## 6 结 语

一个稳定运行的子网的建立需要电厂、变电站及各级调度机构间的协调配合。黑启动操作是由上级调度对下级调度实施统一协调,实现了分区启动和分区协作的恢复调度。厂网间协调配合才能在尽可能短的时间内建立一个稳步运行的电网,将对社会经济的影响降到最低。

### 参考文献

[1] 陈明. 对电网黑启动中试验电源容量问题的探讨 [J]. 华中电力, 2009 , 22 ( 5) : 55 - 57.

[2] 杨春雨 李永锋. 地区电网“黑启动”方案研究 [J]. 云南电力技术, 2008 , 36 ( 1) : 14 - 16.

作者简介:

王莉丽(1977),女,硕士,工程师,长期从事电网调度工作。  
(收稿日期:2012-02-13)