

[控制系统]

电力系统黑启动方案应用

文/国家物资有限公司 葛润东 李延强 纪超 周贺 高憬

针对某地电网可能出现的全停事故，制订并研究了其黑启动方案。着重通过仿真对黑启动过程中发电机自励磁、空载线路过电压、大型辅机起动时频率和电压稳定、初步恢复后小系统暂稳校验等问题进行分析和校验，并完成了对黑启动方案的比较和优选。对于保证当地电网的安全稳定运行具有重要意义。

近几十年来，我国电网建设得到了迅速发展，尤其是特高压电网的建设和大规模新能源的接入，使得电网结构变得更加复杂。随着跨地区及地区间电网之间的联系更加紧密，由局部故障引发大面积停电事故的风险也随之增加。而现代社会对电力供应依存度不断提高，一旦发生大面积停电事故，就会对国家造成巨大的社会影响和经济损失。作为电力系统安全防护措施之一，事故后的黑启动恢复能力和与之相应的方案对优化恢复控制措施、加快系统恢复速度、减小大停电事故带来的损失具有重要意义。

所谓黑启动是指整个电网因故障停运后，不依靠其他的网络帮助，通过系统中具有自启动能力也称为黑启动能力的机组的启动，带动无自启动能力的机组，逐渐扩大系统输电范围，最终实现整个系统的恢复。目前，对于黑启动国内外均已有一定的研究，也有一些地区进行了电网黑启动试验。我国华北电网于2000年5月5日曾利用十三陵抽水蓄能电厂成功地进行了国内首次电网黑启动试验。

本文以某地区电网发生全停事故为例，同时设定电网失去联络线的支持，基于该地区电网的实际网架结构，利用网内具有自启动能力机组，制订其黑启动方案，着重分析了黑启动方案中的发电机自励磁、工频过电压、合空线操作过电压、频率和电压稳定等相关问题，通过试验验证了方案的有效性和合理性。

黑启动过程中的主要问题

1. 黑启动电源的确定

一般黑启动电源需要满足调节性能好、启动速度快、具备进相运行能力等要求。目前黑启动电源一般包括水轮机、燃气轮机、事故后残存的机组或孤岛以及省间或网际联络线等。其中，大容量抽水蓄能电厂中的水轮机往往是非常理想的黑启动电源。

2. 起动机组的自励磁问题

同步发电机的自励磁现象是指无励磁发电机在过大的电容性负荷下电压自发上升的现象。在电力系统黑启动过程中，起动机组自励磁会导致黑启动的失败。

3. 空载线路的过电压问题

黑启动过程中必须考虑线路合闸时产生的过电压，主要包括持续工频过电压和合闸操作过电压两类。

4. 大型辅机的起动

在起动被起动的电厂的厂用电时，需要起动的厂用电的辅机。在投入这些辅机的过程中，系统的电压和频率会受到很大的冲击，可能造成其他厂用电设备的异常和电机保护动作，严重的情况会使电动机过热烧毁，致使黑启动失败。

5. 初步恢复后小系统的暂稳分析

系统初步恢复后，网架结构还比较薄弱，整个系统容量比较小，容易受到干扰而引发稳定问题。因此，应进行系统初步恢复后的暂态稳定校验。

黑启动方案选取原则

一般在制订黑启动方案时需要满足一定的原

则，以保证黑启动方案的成功和及时恢复供电。这些原则如下。

- 1) 每个黑启动电源应有相对独立的黑启动方案。
- 2) 启动过程中电压转换的次数应尽量少。
- 3) 启动路径经过的变电站个数一般不应超出3~5个。
- 4) 启动路径应尽量短。
- 5) 启动时间应尽量短。
- 6) 尽量先启动距离重要负荷比较近的机组。

某地电网及存在的问题

某地区电网位于吉林省电网的东部，是吉林省“两横两纵”主干网架分支电网的末梢，属于典型的送端电网。网内主要有热电厂3座，总容量为1 075 MW，水电站4座，总容量为120 MW，另外有地方小水电、小火电站20座，总装机容量16.91万kW。

该地区电网由于与主网距离较远、联系薄弱，电磁环网问题、热稳及暂态稳定问题十分突出；设备抵御自然灾害能力不强；地区内雨雪冰冻、大风、暴雨等自然灾害频发，个别地区存在发生地质灾害的可能；存在发生大面积停电和设备损坏等突发事件的风险。

黑启动方案初设

通过对该地区电网主网的分析, 结合实际情况, 初步确定两个黑启动方案。

1. 方案老龙口—珲春启动方案

启动电源为老龙口水电站,被起动机组为珲春电厂3#机组。启动路径如下:老龙口水电站—龙泉分线—靖金甲线—靖边变电站—靖珲线—珲春发电厂。

该方案如图1所示。

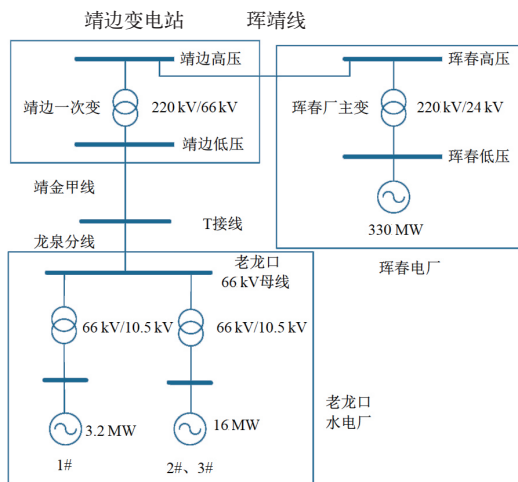


图1 黑启动方案1

2. 方案两江一珲春启动方案

启动电站为两江水电站,被起动机组为珙春电厂 3#机组。启动路径如下:两江水电站—江敦线—敦化变电站高压母线—敦西甲线—延西变电站高压母线—珙西甲线—珙春发电厂。该方案如图 2 所示。

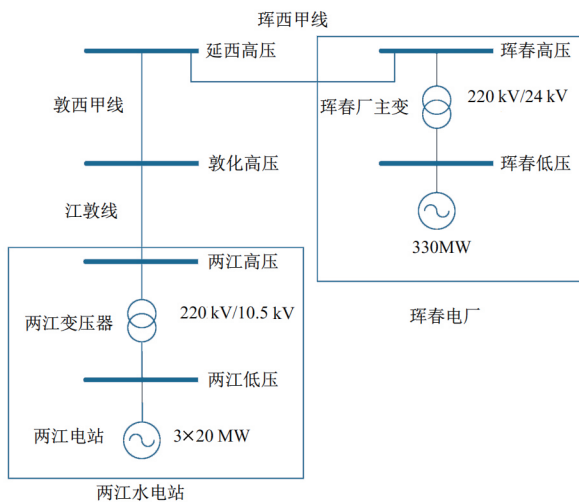


图2 黑启动方案2

需要说明的是,两个方案中,老龙口水电站和两江水电站内分别有 3 台水发电机组,由于被启动电厂珙春电厂的厂用电容量较大,因此,无论在哪个黑启动方案中,3 台水发电机组均需同时起动的。

黑启动方案校验

1. 起动机组的自励磁校验

在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,对两个黑启动方案进行起动机组的自励磁校验,通过发电机励磁施加一个微小初值来体现其剩磁,作为发电机自励磁仿真的初始条件。充电过程中各断路器依次合闸,各断路器合闸间隔时间均为20 s。均以两个黑启动方案中启动电源中的1号机组为观察对象,此时,其端电压对比如图3所示。

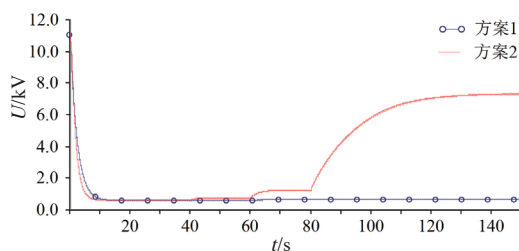


图3 电压对比图

可以看出,发电机起动后空载,在剩磁的作用下其正常电压很低,方案1在合闸过程中未发生

自励磁现象，而方案2的电压则在80 s迅速攀升，最后稳定在7.26 kV左右，发生了明显的自励磁现象。

2. 空载线路的过电压问题

在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型，进行持续工频过电压以及同期合闸、非同期合闸操作过电压的校验，一般要求持续工频过电压不超过

1.3 p.u.，操作过电压不超过3 p.u.。以各段线路空充时得到的最大标么值电压作为观察变量，得到结果如表1所示。

表1 过电压

	工频 过电压 (p.u.)	同期合闸 操作 过电压 (p.u.)	非同期 合闸操作 过电压 (p.u.)	是否满足 要求
方案1	0.892	1.54	1.55	是
方案2	1.27	1.98	2.07	是

可以看出，两个方案在进行过电压的校验中，均能够满足相关要求。

3. 大型辅机起动时电压和频率校验

对于被启动电厂珞春厂，其厂用辅机中容量最大的为3号机1号电动给水泵，容量为5.5 MW，将着重模拟该辅机起动对电压和频率的影响。

在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型，均以启动电厂的1号机组为观察对象，在50 s时投入辅机，此时，其转速对比如图4所示。

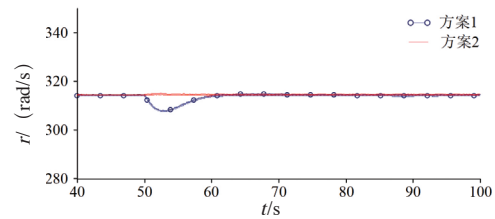


图4 转速对比图

可以看出，辅机起动时，方案1发电机转速相对方案2出现了较大的波动，其发电机转速在辅机投入后迅速下降至307.4 rad/s (48.95 Hz)，至66s基本恢复正常，持续时间将近16 s。但其频率下降幅度并不大，不会影响到黑启动的成功。同时，观察发电机的电压，其电压对比如图5所示。

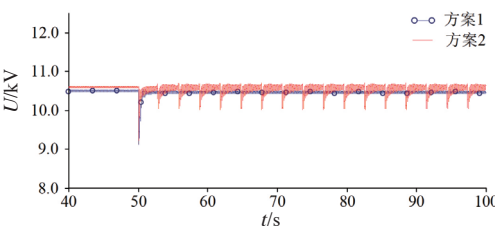


图5 电压对比图

可以看出，方案1在辅机起动时电压经短暂的下降后迅速恢复，而方案2的发电机电压则在辅机起动后始终不停波动，但其波动幅值并不大。

4. 初步恢复小系统暂稳校验

暂态稳定校验是判断黑启动方案可行性的重要校验内容，着重针对刚启动后最脆弱的两机小系统进行校验。按照《电力系统稳定导则》的要求，黑启动初期的小系统暂态稳定性一般只按单相短路接地的单一故障进行考察。

对方案1和方案2设置故障，进行小系统暂稳校验，发现两个方案都能够保持扰动下的暂态稳定，只是振荡时间存在一定的差异。对于方案1，其振荡时间较短，经10 s左右系统即可恢复稳定。如设置珞靖线中部0.1 s发生单相接地故障，1 s时将其切除，此时，发电机之间的相对功角如图6所示。

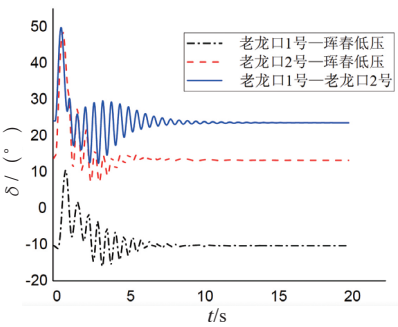


图6 发电机功角摆动曲线

可以看出，三机之间的功角在故障时(0.1 s)发生振荡，之后振荡幅值逐渐减小，10 s时基本可恢复功角稳定。

对于方案2，其振荡时间较长，需经过大约64s，此处不再给出具体案例。

黑启动方案比较及优选

考虑到黑启动方案的选择同时需要考虑诸如启动路径、电压转换次数等指标，因此，结合校验结果，将黑启动方案对比如表2所示。

表2 方案对比

	启动 路径 长度/km	电压 转换 次数	启动 机组 容量/MW	被启动 机组 容量/MW	自励磁
方案1	37	2	19.2	330	否
方案2	300.25	1	60	330	是
	满足 过电压 校验	满足 辅机 启动校验	暂态稳定	小系统 振荡 时间/s	
方案1	是	是	是	10 s左右	
方案2	是	是	是	64 s左右	

可以看出，方案1虽然电压转换次数较多，但其启动路径较短，且不会发生自励磁问题，初步恢复后的小系统一旦发生故障，能够在较短的时间内从振荡中恢复稳定，因此，方案1被优选作为最终的黑启动方案。

(下转第101页)

最小周期与反应时间之间存在着冲突关系。增大最小周期，反应时间会变长。减小最小周期，可能会出现误报警的情况。所以必须在精度允许、小电阻（此时电压最高，容易出现误报警的情况）和最大电容的情况下进行选择，并且同时满足反应时间最小又不能出现误报警的情况。

3. 周期的调节

(1) 短周期调整到较长周期

短周期调整到较长周期的过程就是，增加一短周期，然后重新选择测量点计算（随着周期的增长，两次采样点的位置也会后移）。如果稳定，则开始下半周期信号的注入，如果不稳定，再继续下去，直到稳定为止。根据仪表的测量范围（与电阻和电容有关），可规定一个最大的测量周期。

(2) 长周期恢复至较短周期

长周期恢复至短周期的过程是，当到达测量点的时候，用该点的采样值与上次的采样值对比，如果在精度允许范围之内，则记下此时的测量周期，并开始下一周期的测量。

4. 电阻与稳定尺度

电阻越大，对应的采样电压越小；电阻越小，对应的采样电压越大。由于不同电阻值对应的采样电压值不同，故不同的电阻时，对应的稳定尺度也不同。在采样电压大的时候对应的尺度可以稍大；在采样电压小的时候，对应的尺度则要减小。

5. 实际周期与理论周期

对RC电路来说，电容电压在零输入响应在任意时刻 t_0 的值，经过一个时间常数 τ 可以表示为：

$$u_c(t_0 + \tau) = 0.368 u_c(t_0)$$

即经过一个时间常数 τ 后，衰减了63.2%，或为原值的36.8%。其中 u_c 为该时刻的电压值。

当时间为 5τ 时，电压的变化量就非常小了，这里选取 6τ 作为理论周期。

在前后两次电阻测量结果相同时，可以根据理论周期调节注入信号的实际周期。在理论周期小于实际周期且两者相差很小的时候，对实际周期不做处理。其他情况时，把理论周期作为下一个周期的实际时间。对每个测量周期都要进行采样、处理。经过测量对比，可以在满足精度的前提下，测量周期达到最短。

如图7a所示的电路，首先将E短路，就变成了放电电路见图7b，显然此时 R_1 和 R_2 并联，等效

电阻 $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ ，时间常数 $\tau = RC = CR_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 。

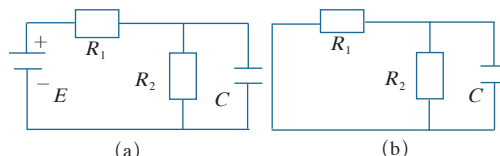


图7 混联电路

测量数据如图8所示。

实际电阻值	显示电阻值	电容值/ μF	理论周期/s	实际周期/s	电阻精度(%)
100k	98 k	500	193	208	2
500k	486 k	500	399	430	2.8
1M	950 k	500	460	498	5
2M	1.91M	500	498	518	4.5
4M	3.76M	500	519	563	6
6M	5.56M	500	527	581	7.3
8M	7.48M	500	531	593	6.5
10M	9.22M	500	533	612	7.8

图8 测量数据对比

通过数据对比发现，电阻精度都在10%以内；实际周期比理论周期稍大，是为了满足测量精度的需要。在实际测量过程中发现，完全使用理论周期是不可取的，应在前面乘以一个系数（增大周期），特别是在电阻达到兆欧级别的时候。

试验验证

该绝缘监测仪经检验满足国际标准，包括电气性能试验和EMC电磁兼容试验、反应时间、测量精度达标（具体可参考图8），功能丰富，能满足各种环境中不接地系统绝缘监测的需求。

结束语

经实际使用证明，本文介绍的绝缘监测装置在交流、直流不接地系统均能可靠工作，可以为不接地系统的安全稳定运行提供一层可靠的保障。EA

（收稿日期：2017.01.20）

（编辑：杨得润）

（上接第91页）

结束语

详细的分析和仿真计算是保证黑启动方案具有实际可操作性的重要条件。本文通过对某地区电网黑启动方案的仿真比较，优选出了合理有效的黑启动方案，其对于该地区应对可能出现的电网全停电事故、保证电网的安全稳定运行具有重要的意义。EA

（收稿日期：2016.08.11）

（编辑：杨得润）