

在黑启动过程中直流系统的恢复研究

对黑启动中的直流系统的恢复问题进行了分析,论述了直流系统的启动过程,根据黑启动系统的特性及要求提出了合理的直流恢复策略。针对交直流混合系统中直流系统在黑启动中的恢复问题,考虑控制系统的详细动态行为,建立直流系统控制部分的仿真模型,并进行了仿真,得到直流系统启动的数据曲线,能够反映直流系统的启动及控制系统的动态行为。

熊 炜/三峡大学电气与新能源学院 张碧华/云南玉溪供电公司
任乔林/湖北孝感供电公司 邹 宇/广西钦州供电公司



熊 炜/讲师

关键词/Keywords

直流输电·
黑启动·
保护装置·

涉及直流系统的黑启动中的研究^[1-3]有很多都是针对交直流混合系统中的交流系统部分发生故障后,或故障已经解除后的直流系统的恢复,这与黑启动的实际情况有所区别。近年来,也有很多把直流系统启动考虑其中的黑启动研究。文献[4]通过在PSCAD中搭建模型研究直流系统启动的方式和条件。文献[5]是在交直流混合系统中,探讨把分布式发电应用到黑启动中。文献[6]反过来研究直流系统在黑启动中的作用及其在实际应用中的方案。黑启动中的直流系统的两端所连的交流系统为典型的弱交流系统,能够承受的频率和电压冲击均很有限,而直流输电系统能够在极短的时间内把输送功率恢复到额定值,伴随有功功率有增加,直流系统需要的无功功率也会剧增。如葛—上线的直流输电系统,其额定输送功率为1 200 MW,

若在短时内启动并达到额定运行,则对两侧的弱交流系统带的冲击将是灾难性的,甚至会使刚恢复的交流系统再次崩溃;另一方面,若交流系统的电压不能维持稳定,则直流系统也不可能恢复到额定工作点,或者根本启动不成功。因此,在黑启动过程中,直流输电系统恢复时,要求系统启动过程平稳,直流输送功率平滑增加,尽量减小系统暂态变化,控制在启动过程中产生的电压和频率波动在系统所能允许的范围内。为了获得平稳的启动过程,必须对黑启动中的直流系统的启动加以仔细的分析研究,制定可行的启动策略。

直流系统启动过程

直流输电系统的启动过程一般是由一个换流器先触发,使电压保持低值,然后另一个换流器也建立触发,为了避免对交流系统带来大的冲击,控制电流在小值;然后保持电流指令不变,提升电压指令;待电压上升到设定指令后,维持电压不变,提升电流指令;按上面的两步交替进行直到直流系统运行在额定值。电压和电流的上升速率要适合具体的场合,实际运行的换流站都有自己具体的设定值,如葛—上直流系统,最低输送功率为额定功率的10%,亦即单极60 MW,双极120 MW,功率常规提升共分10级,每60 MW一级,约1 min调一级。此外在黑启动中交流系统往往相对弱一些,按照直流系统的调节速率可能会影响到交流系统的稳定性,所以还需要在启动前对交流系统做详细的交

国家自然科学基金青年基金(51407104),湖北省
微电网工程技术研究中心开放基金(2015KDW10),
梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金
(2013KJX11)。

直流仿真，确定直流系统指令合理的提升速率。

在直流系统的启动过程中需要考虑的问题主要有三个：谐波、无功平衡和有功平衡。由于高压直流输电系统换流器的非线性特性，在交流系统和直流系统都将会产生谐波电压和电流，为此在换流变压器交流母线上大多装设对应次谐波的滤波器来限制流入交流系统的谐波电流，从而达到抑制谐波的目的。并且由于滤波器在工频频率下为容性阻抗，所以它还有无功补偿的作用。若在直流系统启动时滤波装置全部投入，那么会恶化弱交流系统的运行，使得直流系统的恢复变得更加困难；另一方面在系统低电压小电流的启动过程中如果没有滤波器组的投入，换流器换流时形成严重的电压波形畸变会使直流系统无法正常启动。为了保证直流系统能够正常启动，通常的做法是在整流站与逆变站均投入一组最小滤波器组。而直流系统的无功补偿方式则宜采用调相机和静止无功电源，能够增强交流系统的强度，有利于直流系统的恢复。有功稳定即交流系统的所能容许的频率波动，在整流侧只能靠发电机的调速器来调节，在逆变侧通过负荷的不断投入来平衡。

黑启动中直流系统恢复安排

1. 控制方式的选择

对于黑启动中的弱交流系统，直流输电系统在恢复时对交流系统的电压稳定性有极其重要的意义，特别是在逆变侧换流站的电压稳定性问题。因此在控制方案中应选择具有良好电压稳定性的控制方案，即整流侧定电流控制、逆变侧定电压控制。

2. 谐波问题

从换流站来看，由于系统阻抗和滤波器阻抗相并联，那么常常可能出现某个频率的并联谐振，这种谐振在弱交流系统的情况下更为严重。如果没有任何当地负荷，由远方发电机给高压直流系统供电时，交流系统对谐振的阻尼就会非常小，可能出现谐波不稳定性。因此在制定恢复方案时，对交直流系统可能产生的谐振条件进行详细的计算及暂态仿真是很有必要的。

而针对由于直流系统的非线性造成的谐波污染，甚至带来的启动不成功问题，根据已有的直流系统的启动方案来看，在整流站与逆变站均投入一组最小滤波器组是通用的作法。在系统低电压小电流的启动中，该滤波器组的存在使换流器换流时由电子元件通断所造成的电压波型畸变变得最小，可保证直流系统能够正常启动。再者，最小滤波器组的无功补偿容量往往较小，在投入时，也不会对黑启动中的弱交流系统造成大的电压冲击。

3. 无功补偿

在交直流混合系统中，有一个“零无功交换原则”。因为直流系统在黑启动过程下，它的无功需求只由换流器决定，和线路参数没有关系，其补偿也是靠自己的补偿装置，那么在直流系统和交流系统之间基本上没有无功交换，所以称为零无功交换。

但是在稳定运行时，交流系统要给直流系统提供的无功所占总比例很大，而在直流系统启动前在整流侧与逆变侧投入的最小滤波器组所带来的补偿是远远不够的，常用的无功补偿设备有：固定电容补偿、同步调相机和静止无功补偿器。

一般在直流系统启动时宜采用同步调相机作为无功补偿设备。既能提供直流系统所需的无功，又能提高所连交流系统的强度，可加速直流系统的恢复。

4. 功率恢复速度

直流系统的快速功率调节能力既能在交流系统一侧发生故障时，对其进行功率支援，使整个系统功率平衡，从而增强整个系统的稳定性；另一方面对处于黑启动中功率调节能力较差的交流系统而言，有功功率的不平衡则会给所连接的系统带来大的功率冲击，造成频率的波动。在整流侧，恢复大的功率输送时，会引起整流侧系统的频率下降，按黑启动的频率要求，此频率下降不能超过0.5 Hz，此频率的波动与整流侧发电机的调速系统有很大关系，要适当地安排直流系统的功率恢复速度，做到不会引起交流侧低频保护装置动作，把对交流系统的冲击减小到允许范围内。

制定恢复策略前进行相应恢复方案的数字仿真是有必要的。

在逆变侧,相对整流侧而言,由输送功率的恢复所带来的问题有助于该侧负荷的恢复,根据直流传送功率的变化及时地在逆变端投入相应的负荷就可把该端多余的有功功率平衡掉。对该端而言,直流系统功率的快速恢复可加速该侧负荷恢复,从而加快黑启动过程,缩短停电时间。这与整流端的快速功率恢复所带来的坏处是相矛盾的。

仿真算例

1. 研究中适用的直流模型

在确定启动顺序后就需要对直流系统启动过程进行数字仿真,仿真中直流系统的模型选择成为首要问题。直流系统的简单模型把直流系统两端当作两个恒定负荷来模拟,显然不适合要研究的情况。若采用详细的直流模型则能够很准确地描述直流系统启动及对交流系统影响的暂态过程,但建立详细模型一方面需要对直流系统的复杂控制回路各环节进行简化、分解和综合,控制参数的设置进行配合,给建模造成了较大的难度,需要大量的时间;另一方面各个直流系统采用的控制方案又有较大不同,一些直流输电工程都采用专用的仿真软件,故详细模型是没必要的。观察直流系统在无穷大电源下启动过程发现,由于直流系统的快速调节作用,直流量会立即跟随直流指令的变化,这与响应模型的忽略控制系统本身的动态行为,只模拟控制系统的结果的特性一致。对于直流系统而言,在一个交流仿真周期下进行多个直流系统的控制模拟,则直流系统总能把直流量调节到直流相关指令。为了既能体现控制系统的动态调节效果,又不落入直流系统的复杂控制回路具体化工作中去,对其进行简化。一方面进行编程数字仿真时,工作量不会太大;另一方面选用的传递函数具有一般性,且能反映控制系统的动态过程。

2. 直流系统启动仿真

数字仿真的系统参数如下:

1) 交流等效系统。整流侧和逆变侧交流母

线电压均保持额定标么值,即 $U_r=1(\text{pu})$, $U_i=1(\text{pu})$ 。

2) 直流系统控制系统参数。定电流控制回路: $k_{c1}=0.7854$, $k_{c2}=78.5398$, $T_{c2}=1$, $T_{c3}=0$; 定电压控制回路: $k_{u1}=0.6109$, $k_{u2}=39.2699$, $T_{u2}=1$, $T_{u3}=0$ 。

3) 仿真步长: $\Delta t=0.01\text{ s}$ 。

4) 直流启动控制指令参数:①在0.1 s时解除闭锁,直流系统启动,保持低电流通流,取 $I_{\text{dref}}=0.15(\text{pu})$;②整流侧保持低电流水平,逆变侧线性提升电压参考值 U_{dref} ,使其在40 s时达到0.8(pu);③逆变侧保持电压不变,整流侧线性提升系统的电流,在90 s时达到0.6(pu);④整流侧维持 $I_{\text{dref}}=0.6(\text{pu})$,逆变侧线性提升系统的电压,在100 s时达到1(pu);⑤逆变侧维持 $U_{\text{dref}}=1(\text{pu})$,逆变侧线性提升系统的电流,在120 s时达到1(pu)。

图1为直流系统启动的仿真曲线,图2为图1在0~2 s仿真曲线的放大。从图1中可以看出,直流电压和电流能够按照给定的电压和电流指令上

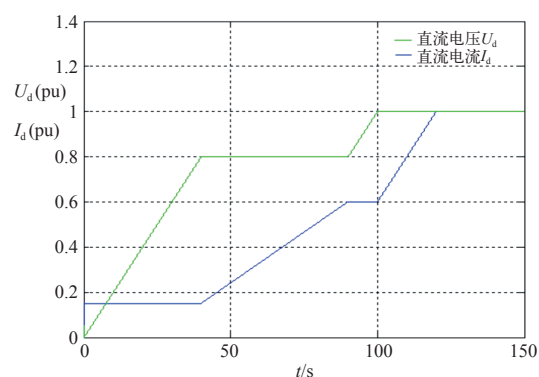


图1 直流系统启动仿真曲线

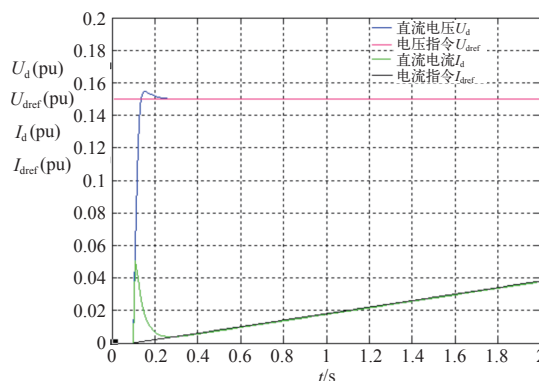


图2 直流系统启动仿真曲线（在0~2 s仿真曲线的放大）

升,在120 s时,系统恢复到额定运行。由于控制系统的动态行为,在刚启动时,直流电压和电流有个调整过程,即出现了超调,把0~2 s时的系统响应放大如图2所示,0.1 s启动前,直流系统闭锁,电流电压均为0,刚启动时,解除闭锁,定电流和定电压控制立即作用,控制电流和电压为参考值(指令值) I_{ref} 、 U_{ref} 。

由于在黑启动中直流恢复问题的特殊性,首先整流侧和逆变侧必须先恢复电力,然后由于黑启动中的交流系统强度往往较小,故此时为一典型的弱交流系统的直流系统启动问题。正常时直流系统需要巨大的无功补偿,一般由滤波器组和并联电容器组来共同承担,而在系统刚启动时所需无功很少,故不能把这些无功都在启动时投入,以防对黑启动的弱交流系统带来大的电压冲击。为了克服换流器换流时引起的电压畸变,从而导致换流失败,在整流侧和逆变侧均投入最小滤波器组可避免上述情况的出现,保证直流系统能够顺利地启动。随着系统输送功率的恢复,所需的无功会越来越多,换流站的无功补偿设备则必不可少,选用能够提高所连交流系统强度的同步调相机会有利于减少直流系统对交流系统的扰动,维持整个系统的稳定。

结束语

直流系统在恢复过程中的电流和电压提升指令取决于交流系统的强度,太快的功率恢复速度会对交流系统的频率造成大的不可接受的扰动,小的恢复速度则会延长恢复时间。

直流恢复时采用具有良好电压稳定性的整流侧定电流和逆变侧定电压控制,换流站的无功补

偿装置使用调相机能够提供足够无功,且有利于整个系统的稳定,直流系统功率的恢复速度要能满足系统的稳定要求。对相关问题进行了研究,总结如下:

1) 对黑启动中直流系统的启动过程进行了详细阐述,并且对其中出现的谐波、无功补偿等问题进行了分析。

2) 进行了相应直流系统的数字模型建立,进行了数字仿真,对结果进行了分析。验证了直流系统在黑启动中的恢复过程和问题。

参考文献

- [1] 刘兴杰,田建设,丁波,等.应用Matlab进行电力系统分析和动态仿真[J].电力自动化设备,2004,24(3):43-49.
- [2] 程晓绚,苟锐锋.弱网直流输电系统启动方式研究[J].高压电器,2005,41(3):170-175.
- [3] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等.直流系统的控制策略对南方电网暂态稳定性的影响[J].电力系统自动化,2003,18(27):57-60.
- [4] 周剑,李建设.电网黑启动情况下高压直流输电系统启动条件分析[J].电力系统自动化,2011,35(3):92-96.
- [5] 刘隽,李兴源,许秀芳.互联电网的黑启动策略及相关问题[J].电力系统自动化,2005,28(5):93-97.
- [6] 周剑,苏寅生,王新宝.云广直流在南方电网黑启动及系统恢复过程的作用[J].南方电网技术,2010,4(4):48-51.

(收稿日期:2015-04-22) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告