

直流输电系统利用大地回线自动转为金属回线 抑制直流偏磁策略研究

孙文¹ 禹佳¹ 滕予非²

(1. 国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 直流系统接地极流过较大电流是导致中性点接地变压器中流过直流电流、引发直流偏磁的主要原因。而直流偏磁的引入不仅对交流变压器产生影响, 同时还会向系统注入谐波, 影响电能质量。分析了直流偏磁产生原因, 以及对电力系统的危害, 同时提出了一种基于换流站操作的直流偏磁抑制策略。利用该策略, 当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时, 自动地由大地回线模式转换为金属回线方式。由此可以极大地减小接地极流过大电流的实现, 有效抑制直流偏磁。

关键词: 直流输电系统; 直流偏磁; 大地回线运行; 金属回线运行

Abstract: The large current through the grounding electrode of DC system is the main reason for DC magnetic bias which causes DC current running through the neutral grounding transformer. Whereas the introduction of DC magnetic bias can not only affect AC transformers, but also can inject the harmonic wave into the system, which would influence the power quality. The reasons for the generation of DC magnetic bias are analyzed as well as its harms to the power system, and meanwhile a suppression strategy for DC magnetic bias based on the operation of the convertor station is proposed. Using this strategy, when the DC transmission system experiences the unipolar locking due to the protection action, the ground loop mode automatically changes to the metal mode, which greatly reduces the heavy current running through the grounding electrode and suppresses DC magnetic bias effectively.

Key words: HVDC transmission system; DC magnetic bias; ground loop operation; metal loop operation

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0039-05

0 引言

随着中国西部大开发和电力能源战略的推进, 集中于四川金沙江、雅砻江流域的多条特高压直流输电工程已逐渐投运^[1-3]。锦苏、复奉、宾金三条特高压直流从四川向华东输送电能达到 2 160 MW, 成为“西电东送”重要的电力通道。

在直流输电工程中, 双极运行方式是最常见的运行方式, 在该运行方式下, 双极电流保持一致, 从而将接地极电流控制在一个较小的范围之内。然而, 如果此时一极因某种原因退出运行, 大量的注入电流则会通过接地极注入大地。在该方式下, 接地极附近的主变压器极有可能因直流电流的注入而产生直流偏磁。该问题已经得到了学者的深入关注。

文献[4]在分析变压器直流偏磁原理的基础

上, 应用 PSCAD 电磁暂态仿真软件分析了直流偏磁对变压器励磁电流的影响。也有学者利用试验的方法对 500 kV 单相变压器空载及模拟带部分负载下的直流偏磁进行研究^[5]。

在直流偏磁抑制策略方面, 有学者对中性点串联电阻/电容法、电流注入法的工作原理、实施方式、性能效果进行了分析^[6]。结果表明, 利用上述 3 种方法均可导致电网直流电流总量下降, 但是交流电网局部的直流偏磁危害却有可能加剧。

首先对直流偏磁的原理进行了分析, 并对现有常见的抑制策略进行了综述。其次, 基于从源头上抑制风险的思路, 提出了一种利用换流站操作抑制直流偏磁的策略。利用该策略, 当直流输电系统因保护动作导致双极闭锁时, 自动地由大地回线模式转换为金属回线方式, 从而起到减小直流接地点的入地电流, 缓解直流偏磁的目的。

1 直流偏磁产生的原因

国内外研究和实际测量发现,地磁暴或直流系统接地极流过较大电流是导致中性点接地变压器中流过直流电流的主要原因。

太阳耀斑和地磁场相互作用产生极光电喷,使地磁场产生暂态波动,当足够严重时,就称为地磁暴。

大地是一个导电的球体,在发生地磁暴时,地磁场的暂态波动使大地的一部分处于这个随时间变化的磁场中,引起感应地表电位(ESP),在土壤电阻率高的地带,地磁暴较严重时,其数值可达 $1.2 \sim 6 \text{ V/km}$ 。从有关资料上看到因地磁暴产生的变压器中性点直流电流最大可达 300 A 。

直流输电系统换流站的接地极附近有直流电位,该电位由注入电流的大小和该处的土壤电阻率决定。当直流系统采用大地返回方式运行时,注入电流就是直流输送电流,而土壤电阻率越高,电位也越高,影响范围也就越广。直流接地极的高电位也作用在交流变电站的接地点上,在中性点接地的变压器中流过直流电流,相当于分流了部分直流输送电流,这是交流变压器中性点直流电流的另一个来源。直流电流在交直流系统中的流向如图1所示。

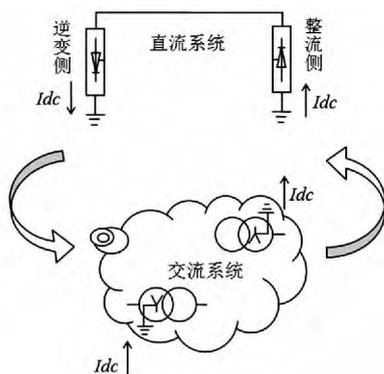


图1 直流电流在交直流系统中流向示意图

单极大地回线运行方式是直流输电系统不同运行方式中的一种。它是利用单根金属导线和大地构成直流侧的单极回路,大地相当于直流输电线路的一根导线,流经它的电流为直流输电工程的运行电流。从理论分析和系统运行情况可知,这种运行方式将在中性点接地变压器上产生直流分量,从而引起变压器发生直流偏磁。

2 直流偏磁对系统的影响

发生直流偏磁时,变压器励磁电流产生的大量谐波,引起变压器的一系列问题。

(1) 无功损耗增大

由于直流偏磁引起变压器饱和,励磁电流大大增加,使变压器消耗无功增加,它或使系统无功补偿装置过载,或使系统电压下降。

(2) 振动、噪声加大

畸变的励磁电流导致变压器铁心的磁致伸缩力增加,加剧铁心的振动,辐射更强的空载噪声;严重的变压器直流偏磁将使变压器工作在半周高度饱和状态下,饱和铁心成为更高磁阻路径,铁心要求更多安培匝数产生相同数量的磁通,为了维持系统正常的正弦电压水平,会产生大量的漏磁通,漏磁与变压器绕组电流作用产生的电动力使绕组振动产生噪声,并使绕组易变形老化。

国外的文献中未见到变压器因直流偏磁引起振动而损坏的实例,据中国的一些变压器制造厂商称,变压器中性点流过直流造成的偏磁的确会引起噪声,但中性点十几安直流尚不至于造成变压器损坏。江苏省对其所属电网的几种变压器的分析结果证实了上述说法。

(3) 变压器损耗增大

谐波中的高频成分在铁心中产生更多的涡流损耗;由于直流的入侵和谐波的集肤效应增加了铜损耗,直流电流越大、谐波频率越高,铜耗越大;增加的漏磁进入箱体各个部件中,增大有功损耗,并使变压器局部过热。发热使设备产生温升,从而恶化设备绝缘条件,缩短设备的寿命。

(4) 影响二次保护

变压器发生直流偏磁时,励磁电流谐波增加,随之变压器各侧的电流和电压谐波均有增加,间接地会影响继电器、自动控制装置的正常工作,影响继电保护装置的正常工作,造成拒动或误动。

3 直流偏磁抑制措施简介

目前国内外抑制流入变压器中性点直流电流的方法有多种,主要是有以下几种。

1) 在变压器中性点装设电阻,可限制直流电流

的大小,但无法全部消除;

2) 在输电线上装设串联电容补偿,阻断直流的通路,但造价较高;

3) 在变压器中性点注入与流入中性点的直流电流大小相等方向相反的电流,可在一定程度上减小直流电流;

4) 在变压器中性点装设电容,彻底阻断直流电流;

5) 采用第3根导线替代大地回线;

6) 在直流系统发生单极闭锁后迅速双极闭锁,以防止大量直流电流入地。

2004年6月,中国电力科学研究院开始对抑制直流偏磁问题进行了深入的研究及装置研发。随后清华大学、华东电力试验研究院等单位也相继开展了相关研究。目前在广东、上海、辽宁、江苏、浙江等地区已经采取了相应的治理措施。

广东地区已经装设了11台电容型隔直装置,其中500 kV变压器装设了7台,220 kV变压器装设了4台,还有1台正在实施。电容型隔直装置能够彻底消除直流偏磁电流。

上海地区已经装设了5台电阻型隔直装置,以220 kV变电站居多,能够将直流电流限制在3 A以下。

4 大地回线自动转为金属回线治理直流偏磁措施研究

4.1 措施原理

直流输电工程在单极大回线或双极不平衡运行方式下,直流电流依靠大地形成通路,如果在接地极周围的土壤电阻率较大则会使周围交流变电站接地网产生不同的直流电位差,进而在中性点接地的变压器中形成直流电流,此直流电流有可能引起变压器的磁路饱和,引起发热、振动以及谐波超标、声响异常等一系列不良后果。通过直流系统采用双极平衡运行方式或单极金属回线运行方式,可以消除由于直流输电工程入地电流引起的直流偏磁现象。

在直流输电工程的运行中,双极运行方式是最常采用的运行方式,但如果此时一极由于某种原因退出运行,则可将健全极及时转为金属回线运行方式,消除直流系统产生的入地电流,从而彻底解决接地极附近变压器的直流偏磁问题。

4.2 措施步骤

直流系统由大地回线转为金属回线需考虑站间通讯正常及异常两种状态。在极I因故障而闭锁时,直流系统自动将极II由大地回线转为金属回线的步骤如下。

(1) 控制系统自动核实直流系统两端设备具备由大地回线运行转为金属回线运行条件,例如MRTB开关在运行状态。

(2) 控制系统核实停运极是否满足转为金属回线运行的条件,如该极是否处于极隔离状态。若不满足条件,则下发转金属回线运行指令后由控制系统自动转为极隔离,或下发转金属回线运行指令前人为将该极隔离。

(2) 执行大地回线转金属回线运行指令,分、合两站相关接地刀闸及隔离刀闸,最后合上大地回线转换开关(GRTS),形成大地回线和金属回线并联运行状态。

(3) 最后执行大地回线转金属回线运行指令分开金属回线转换开关(MRTB),大地回线电流转移至金属回线,直流系统形成金属回线运行方式。

图2为直流系统双极平衡运行示意图,停运极I并利用自动装置将极II转为金属回线运行后直流系统运行状态图见图3。

4.3 措施风险评估

直流输电工程采用手动方式由大地回线运行方式转为金属回线运行方式需要比较久的时间,包括运行人员检查直流设备的时间及上级调度给运行人员下令的时间。若采用自动转换方式,则上述时间均可省略,但这种条件下要求控制系统对直流系统是否具备转换条件进行必要及充分的判断。

比较直流系统由大地回线转为金属回线运行的手动和自动两种方式,在转换过程中存在的相同风险如下。

(1) 在转换过程中控制系统接收到刀闸位置信号与设备的实际状态不一致,导致转换中断,保持大地回线运行。

(2) 转换过程中由于设备缺陷,例如MRTB开关的并联支路、GRTS开关的并联支路,导致转换过程失败,甚至正常运行极闭锁。

而如果采用自动方式将直流系统由大地回线运行转为金属回线运行,还需考虑下列风险。

(1) 双极正常运行的直流系统,当一极由于保

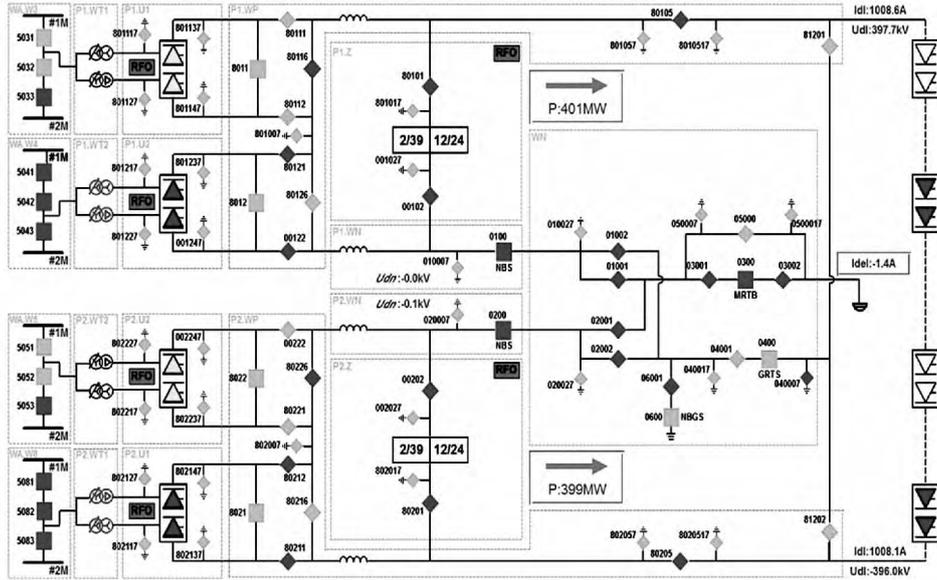


图2 直流系统双极平衡运行

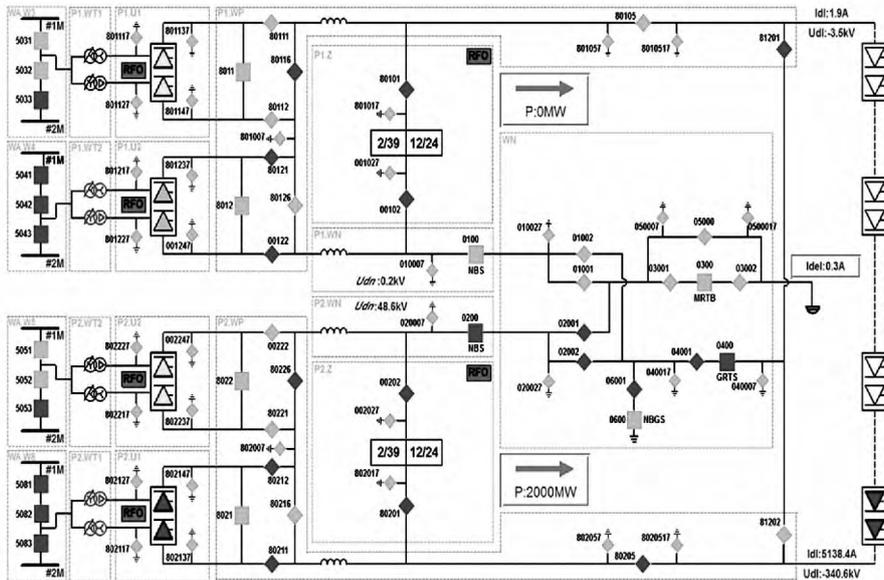


图3 直流系统单极金属回线运行

护闭锁后其功率将自动转至正常运行极,正常运行极可能出现过负荷运行现象,实际直流电流超过额定电流;此时进行转换的话,运行电流超过设备的转换能力,不增加约束条件即进行转换,可能导致设备损坏。

(2) 双极正常运行的直流系统,一极由于直流线路故障导致该极闭锁,闭锁后无法判断直流线路故障是否清除,此时进行大地/金属转换,可能由于直流线路故障仍然存在而导致正常运行极闭锁。

(3) 换流站均装有紧急停运按钮,运行人员可以在紧急情况下将直流系统快速停运。若直流系

统一极由于运行人员按紧急停运按钮闭锁,说明站内出现比较严重故障,运行人员需要进行故障处理,此时再进行设备操作风险很大。

(4) 金属回线转换开关(MRTB)在检修状态,采用与其并联的刀闸作为大地回线运行的通路,由于该刀闸不具备开断直流电流能力,不能进行大地金属回线转换。

(5) 现有超高压及特高压直流工程中,一个极的换流器保护或极保护动作时要求闭锁该极的同时进行极隔离,以下列举了相关的一些保护。

极母线差动保护

极差动保护
中性母线差动保护
极过流保护
换流器连线差动保护
直流谐波保护
阀短路保护
换相失败保护
直流滤波器差动保护
极控制保护设备监视跳闸 如 VBE 跳闸
辅助设备保护跳闸 水冷系统
非电量保护,如换流变压器非电量保护等

在进行极隔离时均有可能发生 NBS 重合的问题,且导致 NBS 重合的保护具有动作不确定性,而 NBS 重合产生的后果是去合站内接地开关 NBGS,在规定的时间内 NBGS 不拉开就转入金属回线运行也会引起正常运行极闭锁的风险。

(6) 直流系统两站站间通讯异常时,需要两站配合才能完成大地/金属回线转换,因此在站间通讯异常时,此时进行大地/金属转换存在导致正常运行极闭锁功能。

综合上述自动方式下直流系统由大地回线转为金属回线的风险评估,与手动方式大地/金属回线转换功能相比,采用自动方式需要在控制系统设计时进行更加周密的考虑。

5 结束语

对直流偏磁产生原因、直流偏磁影响及其抑制措施进行了综述,并提出了一种基于换流站自动操作的直流偏磁抑制策略。根据该策略,当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时,自动地由大地回线模式转换为金属回线方式,避免大量直流电流入地。得到了以下结论。

(1) 当直流系统采用大地返回方式运行时,注入电流就是直流输送电流,而土壤电阻率越高,直流接地极则会出现高电位。直流接地极的高电位也作用在交流变电站的接地点上,在中性点接地的变压器中流过直流电流,相当于分流了部分直流输送电流,这是交流变压器中性点直流电流的一个主要来源。

(2) 发生直流偏磁时,变压器励磁电流产生的大量谐波,引起变压器的一系列问题。如无功损耗

增大;振动、噪声加大变压器损耗增大;影响二次保护等。

(3) 目前国内外抑制流入变压器中性点直流电流的方法有多种,主要包括在变压器中性点装设电阻,限制直流电流的大小;在输电线上装设串联电容补偿,阻断直流的通路;在变压器中性点注入与流入中性点的直流电流大小相等方向相反的电流;在变压器中性点装设电容,彻底阻断直流电流;采用第 3 根导线替代大地回线等。

(4) 所提出的基于换流站操作的直流偏磁抑制策略,可当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时,自动地由大地回线模式转换为金属回线方式。由此可以极大地减小接地极流过过大电流的实现,有效抑制直流偏磁。分析表明,与大地/金属回线手动转换方式相比,自动转换方式存在更多的潜在风险,需要在功能设计时考虑周全。在充分考虑大地/金属回线自动转换方式的潜在风险并采取相应的对策后,大地/金属回线自动转换功能的实现在技术上是可行的。

参考文献

- [1] 郑晓冬, 邵能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.
- [2] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.
- [3] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [4] 袁海燕, 刘民, 庄燕飞, 等. 交直流混联电网中变压器直流偏磁特性分析[J]. 电气技术, 2013(6): 15-21.
- [5] 李英, 王健, 孙树波, 等. 500 kV 单相变压器空载和负载下的直流偏磁试验研究[J]. 变压器, 2013, 50(4): 55-60.
- [6] 张露, 阮羚, 潘卓洪, 等. 变压器直流偏磁抑制设备的应用分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 151-156.

作者简介:

孙文(1980), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;
禹佳(1983), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2014-04-23)