

[变压器]

变压器直流偏磁监测及隔离装置在风电领域的应用

文/国华能源投资有限公司 张宇琼

越来越多的风电开发商选择有特高压直流输送线路的地区进行风电的开发建设，来缓解风电弃风率的问题。直流偏磁对变压器的影响在风电中凸显出来。变压器直流偏磁监测及隔离装置运用到风电领域中的例子越来越多。针对新疆某特高压线路中此装置的运用，论证其作用及可靠性。

为了实现远距离或超远距离大容量送电，高压甚至特高压直流工程建成并投入运行。实践证明，直流输电在一定条件下具有很大的经济效益。随着越来越多的直流输电线路投入运行，我国电网呈现交、直流系统共存的新局面。

在交直流混合输电过程中，当直流输电单极大地运行时，大地极电流一部分通过变压器中性点流入交流系统，这会对交流输电系统产生不同程度的影响。尤其是大地极直流流入变压器中性点，使变压器中性点叠加直流分量后产生磁偏，造成磁饱和，使变压器产生谐波、振动和噪声，影响了变压器及交流系统的安全稳定运行。

监测变压器直流偏磁状况及解决直流偏磁对变压器的影响，已经成为越来越多的学者和专家的共识。将主要介绍直流偏磁产生的原因、现象、危害及在风电场中对其进行的监测及抑制措施。

变压器直流偏磁产生的机理

直流偏磁是变压器的一种非正常工作状态，是指在变压器励磁电流中出现了直流分量。随着直流偏磁电流的增加，励磁电流波形发生畸变，主要是正负半周不对称。与直流同向的一边，由于铁心过度饱和，电流波形变为尖顶波；与直流反向的一边，铁心的饱和度下降，励磁电流幅值变小，呈现平顶波。

1. 高压直流输电引起变压器直流偏磁

高压直流输电单极大地回路方式运行时，接地极入地电流会在极址周边产生一个强大的电流场，由于大地土壤电阻率的变化，接地极周边不同位置的中性点直接接地变压器处于不同地电位，接地极的部分入地电流将从地电位较高的变压器中性点流入变压器三相绕组，再经交流线路，然后通过地电位较低的变压器三相绕组，由中性点入地，从而形成直流回路，即交流系统为入地电流提供了一个比大地更容易流通的通道，如图1所示。

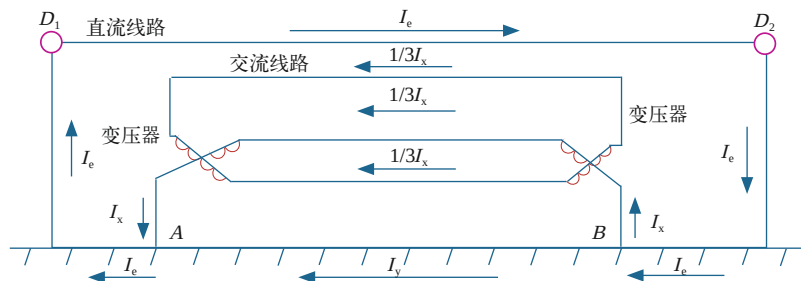


图1 直流输电单极大地回路运行方式下变压器中性点直流产生示意图

图1中, I_c 为直流输电单极大地回路电流; I_n 为流入变压器中性点的电流; I_g 为AB两点间大地电流。

2. 太阳活动引起变压器直流偏磁

太阳表面活动旺盛会导致地球高层大气的扰动,引起地磁暴的发生。磁暴发生时,在极圈附近100~300 km高空会形成极光电流。其方向为自东向西,宽度为几百千米,幅值按正弦规律变化,周期约为数分钟或更长。从电磁理论可知,这些变化的极光电流能扰动电磁场。东西方向的极光交变电流可以感应出南北方向的交变磁场和东西方向的交变电场,而这一东西方向的交变电场可在地球上产生出同方向的电流及电压。从而在地表面上产生电位差,也即所谓的地面电势(ESP)。地面电势的大小据实测表明,一般达到1~10 V/m或更高,持续时间可从几分钟到几小时。由于地面电势的存在,在长距离输电系统特别是东西走向输电系统中各中性点接地的变压器间产生寄生电流,频率在0.000 1~0.1 Hz之间,与工频相比可视为类似直流。这种“准”直流被称为地磁感应电流(GIC),地磁感应电流经过变压器接地中性点经交流系统,同样引起变压器的偏磁问题。

地磁感应电流的大小与多种因素有关。根据地球磁场磁力线的分布及疏密程度,其大小在东西方向远大于南北方向,并与纬度、地质结构和输电线路输送距离有关。纬度高、大地土壤电阻率和长距离的输电线路将产生更高的地面电势和更大的地磁感应电流。

地磁感应电流对电力系统产生影响,造成巨大的损失,已成为不争的事实。1989年3月13日加拿大魁北克发生的电网解列造成近9 h的大停电事故,就是因为变压器直流偏磁所致。在之前几次太阳活动强度大的时期,我国尚未存在有长距离、超高压和大容量的电力网络。电力系统仅由孤立的地区系统或弱联系的系统组成,所以电力系统的GIC很不敏感。但是,随着西电东送,全国联网的逐步实施,将形成东西走向的长距离输电线路。这些线路是极易受GIC的影响的。

直流偏磁对变压器产生的危害

变压器绕组中有直流分量流过时,这些直流磁通造成了变压器铁心的严重饱和,励磁电流高度畸变,产生大量的谐波,变压器的无功损耗增加,金属结构件的损耗也增加,出现局部过热现

象,破坏绝缘,损坏变压器或降低使用寿命。严重时甚至会引起系统电压降低,导致系统继电器的误动作。

1. 噪声增大

变压器绕组中有直流电流流过时,励磁电流会明显增大。对于单相变压器,当直流电流达到额定励磁电流时,噪声增大10 dB;若达到4倍的额定励磁电流,噪声增大20 dB。此外变压器中增加了谐波成分会使变压器的噪声频率发生变化,甚至可能会因某一频率与变压器结构部件发生共振。

2. 系统电压发生畸变

当变压器因直流偏磁的作用而工作点移至非线性饱和区时,变压器的励磁电感将不再是常数,直接后果就是系统的电压发生畸变,从而引起电压波动。具体的畸变情况与变压器的绕组接法和磁路结构有关。在我国,110 kV及以上变压器一般采用Y0/△联结。超高压、大容量变压器特别是自耦变压器一般采用Y0/△/Y0联结。当铁心工作在严重饱和区,漏磁通会增加,在一定程度上会使电压波峰变平。

3. 变压器损耗增加

变压器损耗包括磁心损耗(铁耗)和绕组损耗(铜耗)。其中,铁耗包括基本铁耗(磁滞和涡流损耗)和附加铁耗(漏磁损耗)。基本铁耗与通过铁心磁密的平方和频率成正比。由于励磁电流进入磁化曲线的饱和区,使得铁心和空气的磁导率接近,从而导致变压器的漏磁大大增加。变压器漏磁会通过压板、夹件和油箱等构件,并在其中产生涡流损耗,即增加铁耗。

铜耗包括基本铜耗和附加铜耗。在直流电流的作用下,变压器励磁电流可能会大幅度增加,导致变压器基本铜耗急剧增加。

4. 变压器温度升高

芯式变压器铁心的拉板或壳式变压器铁心的支撑板通常是采用磁性材料,以获得足够的机械强度。位于铁心表面的铁心拉板或支撑板,与铁心硅钢片的磁场强度相同,其厚度比硅钢片的厚度又厚得多。变压器直流偏磁引起的大涡流损耗导致了拉板(或支撑板)温度升高。严重影响变压器的安全运行。

解决措施

目前解决直流偏磁问题工程上有串联电阻法、串联电容法和反向电流注入法等方法。其中

串联电容法较为实用,以其原理简单、效果显著、安装后不需要修改保护及安全自动装置等特点得到了业内的技术认可。

风电的直流偏磁抑制措施与火电并无差异,只是目前风电基本处于偏远地区,电网结构较为薄弱,对偏磁技术并未引起重视。国家电网第五个特高压工程,也是国家“疆电外送”首个特高压项目。目前世界输送容量最大直流工程,哈密南—郑州 ± 800 kV特高压直流工程正式投运。新疆丰富的风电通过“电力高速路”直奔2 000多km外的中原大地。越来越多的开发商奔赴新疆进行风电建设,偏磁问题在风电领域将越来越受到重视。

1. 串联电阻法

串联电阻法是在变压器中性点串接一个小阻值的电阻,增加交流电位直流通路的阻力,抑制直流电流的流动。

2. 串联电容法

串联电容法是在变压器中性点串接一个电容器,直接阻断变压器的直流通路,不让直流电流通过变压器中性点入地,从而彻底消除了变压器的直流偏磁。

3. 反向电流注入法

反向电流注入法需要在发电厂(变电站)外择址另建辅助接地极,为中性点注入电流提供回路。注入电流中的一部分电流直接流入站内电网,另一部分电流(通常是小部分)流入变压器

中性线,抵消直流输电地中电流产生的中性线电流,并经交流电网其他接地变压器中性点流回大地,与前一部分直接入地的电流汇合,从辅助接地极流回,形成回路。

案例分析

1. 概况

2015年哈密地区新增13座220 kV变电站,其中包括天中直流风电配套送出工程的多座220 kV升压变电站,同时 ± 800 kV天中直流配套电源建成投运。为确保在天中直流单极大地回线方式下哈密地区各厂站的安全稳定运行,特开展哈密地区各个厂站中性点入地直流电流直流偏磁计算分析评估,研究各种中性点接地方式下哈密相关厂站中性点直流电流是否在规定范围以内,是否满足安全稳定运行要求。图2为哈密220 kV及以上站点距天山接地极地理位置和直线距离示意图。表1为中直流风电配套送出工程新投升压站与接地极位置关系。

表1 中直流风电配套送出工程新投升压站与接地极位置关系

变电站名称	与接地极的距离/km	变电站名称	与接地极的距离/km
220望洋台变	218.8	220景峡东变	64.7
220望洋台东变	220.5	220景峡南变	72.9
220望洋台西变	233.2	220景峡西变	49.6
220思甜北变	70.3	220景峡北变	75.1
220思甜东变	82.0	220回庄子变	20.6
220雅满苏变	41.3	220庙尔沟变	46.1

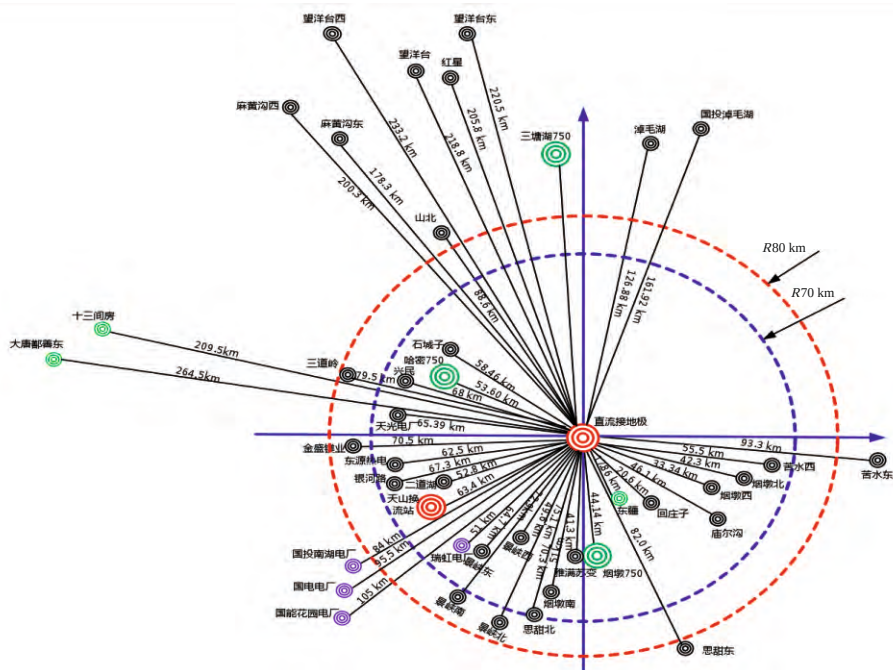


图2 哈密220 kV及以上站点距天山接地极地理位置和直线距离示意图

目前哈密地区装设有隔直装置的厂站有9座,分别为750 kV哈密变、烟墩变,500 kV国能花园电厂、国投南湖电厂,220 kV天光电

厂、东疆变、十三间房变、山北变、能节烟墩北变,哈密地区其余厂站中性点接地方式如图3所示。

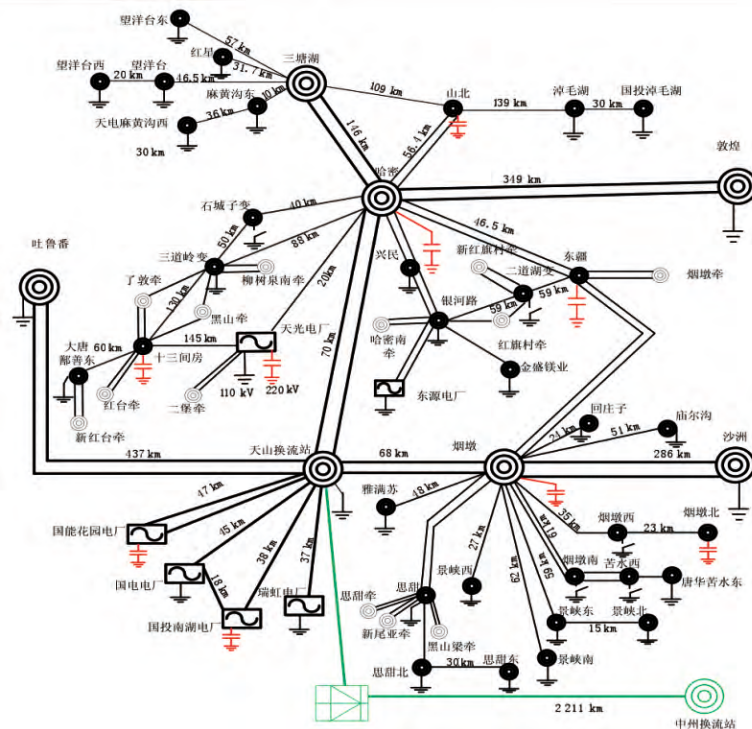


图3 2015年年底哈密地区750 kV及220 kV变电站的中性点接地方式

2. 变压器中性点直流偏磁在线监测与隔离装置

该装置可以有效地阻断流过变压器中性点的直流电流,同时对交流系统的运行不产生任何影响。解决了交直流混合供电系统中,直流单极大地运行对交流系统的影响问题。

抑制变压器中性点直流电流装置由3个部分构成,第一部分是串联接入变压器中性点的装置本体,包括电容器、晶闸管、整流二极管和电感等一次设备及二次控制单元;第二部分是电厂运维人员或设备检修维护人员提供的运行监控终端(简称HMI),提供人机交互的接口;第三部分是装置输出的6个开关量信号和2个模拟量信号,供运维值班人员监视装置的状态。第一部分和第二部分通过光纤接口相连接,第三部分输出到变电站的后台监控系统。装置组成如图4所示。图5为主变压器中性点抑制直流电流装置接线图。

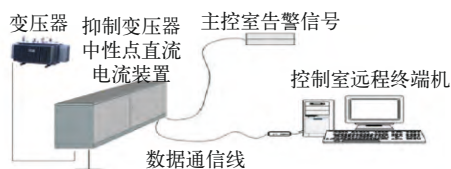


图4 装置及接入变压器中性点系统结构图

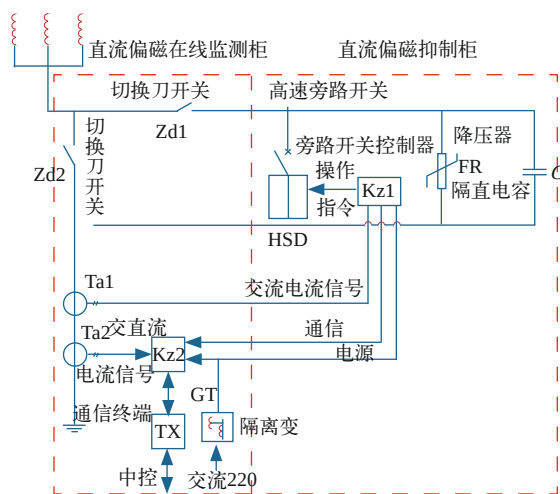


图5 主变压器中性点抑制直流电流装置接线图

由图5可以看出,该装置包括偏磁在线监测装置与偏磁隔离装置两部分。根据系统需要,可单独使用偏磁监测装置,当直流偏磁现象严重时,再添加隔离装置,也可同时装设偏磁监测与隔直装置。

当直流偏磁监测装置检测变压器中性点没有大电流(或直流小于设定值)时,旁路开关K为常

闭工作状态，变压器中性点通过旁路开关K接地；当直流偏磁监测装置检测到有直流（或大于设定值）流经变压器中性点时，旁路开关K打开，将隔直电容C串联到接地回路中，起到抑制直流的功能，直流消失后，及隔直电容C上的电压降低到设定值以下，旁路开关K合闸，将隔直电容短路，然后退出隔直的功能；当系统发生单相接地不对称短路时，冲击电流 I_1 流经隔直电容C，使得隔直电容上的电压迅速上升，触发氧化锌FR导通，同时限制电容两端的电压，起到保护隔直电容器的作用。

表2 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ 风电配套送出工程各升压站中性点直流电流分布

升压站名称	中性点入地电流/A	升压站名称	中性点入地电流/A
220 kV景峡东变	3.248	220 kV庙尔沟变	3.938
220 kV景峡南变	-7.819	220 kV思甜东变	-15.618
220 kV景峡西变	3.666	220 kV思甜北变	-18.839
220 kV景峡北变	-6.682	220 kV雅满苏变	8.102
220 kV回庄子变	43.493		

由表2可以看出回庄子变、思甜变、思甜北变、思甜东变存在较大的直流偏磁风险。

在表2的基础上，非风电配套送出工程的升压站加装隔直装置外，回庄子变、思甜变、思甜

用，当短路电流变化到第一个过零点时刻，智能旁路开关相控合闸，将短路电流分流到开关里，起到保护氧化锌的作用。

3. 应用效果

哈密地区所有非风电配套送出工程的升压站加装隔直装置后，利用交流电网直流分布计算软件，在天中直流单极大地回线4 000 MW时直流极注入 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ （其中“-”表示流出）电流时，天中直流风电配套送出工程的多座220 kV升压变电站中性点直流电流分布如表2所示。

北变、思甜东变也加装隔直装置，此种情况在直流极注入 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ （其中“-”表示流出）电流时，各变电站中性点直流电流的分布如表3所示。

表3 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ 风电配套送出工程各升压站中性点直流电流分布

升压站名称	中性点入地电流/A	升压站名称	中性点入地电流/A
220 kV景峡东变	6.209	220 kV庙尔沟变	9.114
220 kV景峡南变	-2.743	220 kV思甜东变	-
220 kV景峡西变	10.708	220 kV思甜北变	-
220 kV景峡北变	-4.798	220 kV雅满苏变	13.599
220 kV回庄子变	-		

由表3可看出，在直流极注入 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ （其中“-”表示流出）电流时，在表2的基础上进一步对回庄子变、思甜变、思甜北变、思甜东变加装隔直装置后，雅满苏变、景峡西变不仅存

在直流偏磁风险。且中性点入地电流超过10 A。在表2、表3的基础上，对雅满苏变、景峡西变加装隔直装置后，各变电站中性点直流电流的分布如表4所示。

表4 $I_0 = -5\,000\text{ A}$ 风电配套送出工程各升压站中性点直流电流分布

升压站名称	中性点入地电流/A	升压站名称	中性点入地电流/A
220 kV景峡东变	8.038	220 kV庙尔沟变	12.405
220 kV景峡南变	0.588	220 kV思甜东变	-
220 kV景峡西变	-	220 kV思甜北变	-
220 kV景峡北变	-3.590	220 kV雅满苏变	-
220 kV回庄子变	-		

从表4可以看出，对雅满苏变、景峡西变采取治理措施后，电网庙尔沟变还存在直流偏磁风险，在对庙尔沟变加装隔直装置后，其余厂站直流偏磁风险均较小。

结束语

在今后的电网建设中，500 kV及以上线路将会成为我国电网的骨干网架，而这些线路一般情况下都是采用单极大地回路方式运行，这也就不可避

免地会受到从中性点注入到变压器的直流电流的影响，与此同时，新能源发电形式的加入，更加考验了电网的稳定性。远距离的输电线路由于输电功率很大，线路一旦发生故障或者引起系统元件（如变压器）的故障运行都会导致系统稳定受到破坏，从而产生大规模的停电事故，在实际电网运行中，为避免此类事件的发生，要对直流偏磁进行实时监测。EA

（收稿日期：2016.08.26）

（编辑：刘群点）