

± 800 kV 天一中直流对哈密电网 变压器直流偏磁的影响

王 建¹, 马勤勇¹, 常喜强², 张 媛¹, 金 铭¹, 范旭华¹, 刘依梅¹
(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 国网新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘 要: ±800 kV 天一中特高压直流工程在调试期间,为研究天中直流在单极大地方式运行时对新疆电网变压器直流偏磁的影响,新疆电网进行了变压器直流偏磁带电测量工作,尤其是对天山换流站所在的哈密地区电网直流偏磁进行了多点测量,并通过交流电网直流电流分布计算软件仿真计算分析新疆哈密电网变压器直流分布的情况。仿真表明,在天中直流大功率单极大地运行时,天山换流站周边近区的变电站中性点接地的变压器直流电流较大,实测发现某些天山换流站接地极周边近区变压器中性点的偏磁电流较大,与仿真结果基本相符合,严重威胁主变压器偏磁运行,后期通过在直流电流过大的主要变压器加装了直流偏磁抑制装置,大大降低了变压器中性点的偏磁电流,提高了哈密地区电网的安全性和可靠性。

关键词: 天一中直流; 直流偏磁; 仿真计算; 偏磁抑制

Abstract: During the commissioning of ±800 kV Tian - Zhong HVDC project , in order to study its impacts on DC magnetic bias of transformers in Hami Power Grid , the live detection for DC magnetic bias of transformers is carried out in XinJiang Power Grid , especially the multi - point measurement is done in Hami Power Grid where the Tianshan DC converter station is , and the calculation software for DC current distribution simulation analysis in ac power grid is used to simulate the distribution of the DC current of transformers in Hami Power Grid. The simulation shows that , when Tian - Zhong HVDC project transports high power with monopole earth mode , the DC current of neutral grounding transformers which are near to Tianshan DC converter station is larger , and the measured results also give that the grounding transformer in some stations which are not far from Tianshan DC converter station has a larger magnetic bias current in neutral point , which is consistent with the simulation results. At last , DC magnetic bias suppression devices are added to the station where has the large neutral DC current. The proposed method greatly reduces the DC magnetic bias current of transformers , which will improve the security and reliability of power grid in Hami district.

Key words: Tian - Zhong HVDC project; DC magnetic bias; simulation calculation; DC magnetic bias suppression

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)04 - 0046 - 07

0 引 言

直流偏磁是变压器的一种非正常工作状态。由于变压器的原边等效阻抗对直流分量只呈现电阻特性,且电阻很小,因此,很小的直流分量就会在绕组中形成很大的直流激磁磁势。该直流磁势与交流磁势一起作用于变压器原边,造成变压器铁心的工作磁化曲线发生偏移,出现关于原点不对称,即变压器偏磁现象^[1,2]。

大型电力变压器的励磁电流比较小,流过变压器的少量的直流电流就可能引起直流偏磁,引起铁

心饱和,导致电流波形畸变,产生高次谐波,危害变压器和电力系统的安全运行^[3-6]。高压直流输电单极大地回线运行方式容易导致周围交流变电站变压器出现直流偏磁现象,换流变压器也多发直流偏磁危害^[7]。目前中国特高压直流输电的入地电流比普通直流输电工程更大:一般±500 kV 直流输电入地电流为 3 000 A,云广特高压为 3 125 A,向家坝—上海和溪落渡—浙西特高压为 4 000 A,锦屏—苏南为 4 500 A。大量的入地电流将导致更加严重的直流偏磁危害,危及交流电网安全运行,因此需要开展直流电流分布预测和监测、直流偏磁预防和治理方面的研究。

目前对变压器直流偏磁电磁学方面的研究尚不成熟,就连确定具体参数的变压器绕组允许通过的直流电流也不能单纯通过仿真来确定,而是需要变压器生产厂家通过试验来确定。针对这种情况,必须对天中直流在新疆电网产生的影响进行实测评估。天一中±800 kV特高压直流工程西起哈密东至郑州,工程的换流站侧接地极位于新疆哈密地区,而哈密地区不仅有3座750 kV变电站作为“疆电外送”枢纽站,还有众多的风电场和光伏电站并网,连同本地的220 kV和110 kV电网一起,与天山换流站形成了复杂的电网结构。就天山换流站的运行对新疆电网变压器直流偏磁的影响进行了仿真、测量和挖掘研究,提出并实施了偏磁治理的方案,取得了较好的效果。

1 ±800 kV 天一中特高压直流系统基本情况

±800 kV天一中特高压直流工程起点在新疆哈密南部能源基地,落点河南郑州,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南6省(区)。额定输电电压±800 kV,额定电流5 kA,输电能力将达8 000 MW,成为连接西部边疆与中原地区的“电力丝绸之路”。哈密南换流站茈茈台接地极站位于哈密市东南部,距哈密市约60 km,乌拉台乡政府北侧约22 km,隶属哈密市的乌拉台乡。茈茈台接地极站距离换流站直线距离约为62.09 km,周围各电压等级的变电站均有。距离较近的变电站有750 kV哈密变电站、750 kV烟墩变电站、220 kV东疆变电站、220 kV烟墩西变电站、110 kV兴业变电站等多个变电站。众多的不同电压等级的变电站汇集在接地极半径100 km以内,容易因直流输电接地极入地流过大电流而引起变压器偏磁现象。

随着天一中直流工程的投运,直流输电入地电流在新疆交流电网分布的研究越发紧迫。根据初步实验结果,当在直流极注入时,采用东疆变电站220 kV侧、烟墩西边220 kV侧接地刀闸分闸,骆驼圈子变电站110 kV、兴业变电站110 kV、雅矿变电站110 kV侧接地刀闸分闸运行方式时,此时烟墩变电站220 kV侧中性点的直流电流为12.61 A。而在单极运行接地极注入电流最大值—5 000 A时,烟墩变电站中性点的直流电流最大可能达到126.1 A。因此重点研究和治理天一中直流投运对新疆电网变压器

中性点直流电流过大而造成直流偏磁问题显得极为迫切。

2 天一中直流运行时哈密地区变压器中性点直流电流的仿真计算与初步测量

2.1 仿真建模应用

为了仿真计算天一中特高压直流投入运行后对新疆电网变压器直流偏磁的影响,使用了基于电流分布理论的《交流电网直流电流分布计算软件》进行计算。该软件程序从入地电流的恒流场进行分析,推导出场路耦合模型。在2007年至今,直流电流分布计算软件一直关注广东电网的直流电流分布,成功预报了大量存在直流偏磁风险的变电站,并积极地参与了抑制措施选型的工作,有较高的准确性^[8-10]。

2.2 场路耦合模型的推导

若交流电网总共有 m 个变电站, b 个母线节点, n 个独立中性点,则由节点电压法有

$$YV = J \tag{1}$$

式中, V 为电网节点电压列向量, $V = [V_S; V_N; V_B]$, V_S 、 V_N 、 V_B 分别为变电站节点电压(V)、独立中性点电压(V)、母线电压列向量(V)。若中性点与变电站节点短接,则在模型中删去该站的中性点,仅保留变电站节点。

Y 为电网节点电导矩阵, $Y = H^T G + Q$; H 为变电站节点与所有节点间的关联矩阵; H^T 为 H 的转置, $H_{m \times (m+n+b)} = [E_m \ 0_{m \times n} \ 0_{m \times b}]$, E_m 为 m 阶单位阵; G 为变电站接地电导阵, $G = R^{-1}$, $R = \text{diag}(R_{G1}, R_{G2}, \dots, R_{Gm})$; R_{Gi} 为第 i 个变电站直流接地电阻; Q 为交流电网地上网络节点电导矩阵。

J 为电网节点注入电流列向量

$$J = [J_S; J_N; J_B] = [GP; 0; 0] = H^T GP \tag{2}$$

式中, J_S 、 J_N 、 J_B 分别为变电站节点、独立中性点、母线节点注入电流列向量 A ;

P 为变电站的感应电位列向量, V 由接地理论有

$$P = MI_D + NI_A \tag{3}$$

式中, I_D 为直流极入地电流 A ; I_A 为注入变电站接地网的直流电流 A ; M 为直流极与变电站间互阻抗阵; N 为变电站间(不包括自身作用)的互阻抗

闸,其他变电站均采用正常接地方式。

在以上 3 种运行方式中,对天山换流站周边变电站进行中性点接地的变压器实地偏磁直流电流测量。同时,根据哈密地区的网络结构,利用交流电网直流电流计算软件,得到测量值与仿真计算值,如表 1 所示。

表 1 中性点直流电流实测值与仿真值对比

变电站名称	与接地极 距离/km	方式 1/A		方式 2/A		方式 3/A	
		仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
750 kV 哈密变电站	54	4.7	4.5	4.9	4.6	5.1	4.9
750 kV 烟墩变电站	45	7.7	8.0	9.5	9.7	10.2	10.6
220 kV 石城 子变电站	58	2.2	2.1	2.2	/	2.3	/
220 kV 银河 路变电站	64	0.3	0.3	0.3	/	0.4	0.3

根据表 1 在第 1 种运行方式下,750 kV 哈密变电站的仿真值为 4.749 A,实测值为 4.59 A;750 kV 烟墩变电站的仿真值为 7.729 A,实测值为 8.07 A。可看出仿真与实测较为吻合,因此利用该软件对哈密地区进行建模分析能够初步预测各个变压器中性点电流的情况。同时,根据实测的数据可以明显地看到,距离接地极越近的变电站中性点接地的变压器中性点流过的直流电流越大,如表 1 中所示。同等距离下,距离接地极较近的 750 kV 自耦式变压器受直流输电的影响较 220 kV 变压器要大很多。在方式 1 中,750 kV 烟墩变电站的中性点直流电流最大达到 8.07 A,远大于其他变电站的中性点电流值。在方式 2 中,电网的接地方式有所改变,伴随着东疆 220 kV 变电站的 220 kV 的中性点接地刀闸分闸,初步测量可以发现距离东疆变电站较近的 750 kV 烟墩变电站的主变压器中性点电流有所增大,而在方式 3 中,烟疆一、二线拉开后烟墩变电站中性点直流电流明显上升了。由此可以看出当电网的中性点接地方式改变时,直流电流的通路可以发生改变,从而改变了各个变电站内主变压器的中性点直流电流方向和大小。经过仿真和实测还发现 750 kV 哈密变电站和 220 kV 东疆变电站、十三间房变压器等变电站中性点直流电流都偏大,因此,需要对这些中性点直流电流过大的站点采取直流偏磁抑制措施。通过对比和实测发现两者之间的误差较小,但当电网中的站点增加时,随着工况进一步复杂化,仿真和

实测的误差可能会有所增大,但两者反应的主变压器中性点直流电流改变的趋势是一致的。

3 中性点直流偏磁电流抑制

通过仿真和实测,均已明确了天中直流大地运行方式下会对哈密地区电网部分变压器造成偏磁电流过大的后果。针对这一现象,结合目前国内外使用的偏磁治理方式,有必要对哈密电网中的个别变压器进行合理化的偏磁直流,以达到降低偏磁电流的目的。

3.1 抑制变压器中性点直流电流的措施

目前抑制直流偏磁的主要措施有:在变压器中性点串接电容、注入方向电流和串接电阻^[11,12]。

中性点串接电容的基本思路是将电容、火花间隙(或大功率晶闸管)和旁路开关并联后串入变压器中性点,达到阻隔大地直流回流的目的^[13]。

串接电容法可以彻底切断直流电流的通路,但可能引起其他变压器中性点的直流电流增大造成直流偏磁。

反向注入电流法是指在变压器中性点注入中与其流过的直流电流反方向的直流电流,抵消或削弱由地中直流流入变压器产生的偏磁^[14,15]。

反向注入电流法仅局限在电流超标的变电站中使用,需要较大功率的电源,接入方式较复杂,不易现场快速的实施,其效果还有待进一步验证。中性点串接小电阻的范例十分简单明确,在中性点和电网之间传入一个阻值为数欧姆的小电阻,可以减小中性点流入的直流电流。串联电阻的大小需要根据变压器和变电站及电网地网的具体情况选取。

除了对中性点接地进行改造外,还有其他方式也在探索研究中。例如,在交流输电线路路上安装串联电容器,利用电容器的隔直作用抑制直流通过线路进入变压器。但是,中国目前的特高压电网中多采用的是自耦变压器,仅在一个电压等级的输电线路路上安装串联电容器,不能限制直流通过自耦变压器流入另一个电压等级的输电线路中。若要完全限制直流电流,则需要在与交流系统相连的所有出线上都安装串联电容器,才可有效地限制和消除流入变压器中性点的直流电流。

3.2 主变压器中性点直流抑制装置安装

目前在中国使用的直流抑制装置多为串联电容

技术。本次哈密地区电网主变压器使用了隔离直流电流的装置,采用了中性点串联隔离电容设备治理中性点直流电流。其基本原理如图2所示。

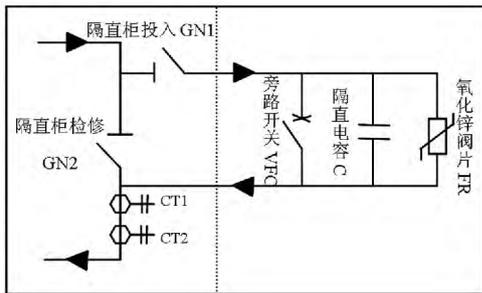


图2 隔直装置原理

测量中性点直流电流的直流电流互感器(TA1、TA2),是基于霍尔效应研制的直流电流传感器,该传感器测量中性点中的电流值用于控制旁路开关,当检测到中性点的直流电流大于预警值时发出投入隔直装置的信号。该装置在安装过程中,通过新设接地刀闸GN1与GN2将隔直装置与原接地刀闸进行并联,正常状态下,接地刀闸GN1和旁路开关VFC闭合,保持中性点经过新设接地刀闸GN1和旁路开关VFC直接接地,安装完毕后原接地刀闸与GN2打开。当TA检测到过流时,发出信号,旁路开关打开,隔直装置立即串联进入中性点接地回路中,起到隔直作用。检修时将隔直柜检修刀闸GN2闭合即可转入检修状态。

经过仿真计算和初步测量,决定在中性点电流较大的750 kV哈密、烟墩和220 kV东疆变电站、十三间房变电站安装隔直装置。

4 大功率单级大地运行对哈密电网的影响

在天山换流站低端调试期间,通过仿真和现场

实测,发现天一中直流在大功率双极不对称和单极大地运行方式下对哈密地区电网主变压器的影响较大。因此,在天一中直流高端调试期间,新疆电网在哈密地区部分变压器安装了中性点直流电流抑制装置,与天一中直流调试工作相互配合,尤其是在单极大地运行方式下,对哈密地区电网直流偏磁现象进行了进一步的测量和研究。

4.1 大功率单级大地运行调试

天一中直流工程高端调试期间,单极大地运行方式下,根据输送功率的不同,接地极中流入大地的电流也不同。对于单极大地运行方式下,换流器投入的数量固定式输送电压即可固定下来,调节输送功率的同时即在调节直流输电的电流值。因此,单极大地方式运行时,接地极的入地电流随着功率的大小波动。表2所示为极1高端单极大地方式运行(电压为400 kV)时接地极电流情况,单极大地运行方式如图3所示。

表2 直流输送功率与接地极电流对应表

哈郑直流输送功率/MW	接地极电流/A
200	500
300	750
400	1 000

表3 中性点直流电流测点

电压等级/kV	测点所在变电站
750	吐鲁番、烟墩、哈密、沙洲、敦煌
220	山北、银河路、天光电厂、淖毛湖、十三间房、东疆、烟墩西、石城子、麻黄沟东、东源热电
110	东疆、天光、山北、淖毛湖

当天一中直流在给定单极大地运行方式下施加功率值稳定时,哈密地区各个中性点接地的变压器

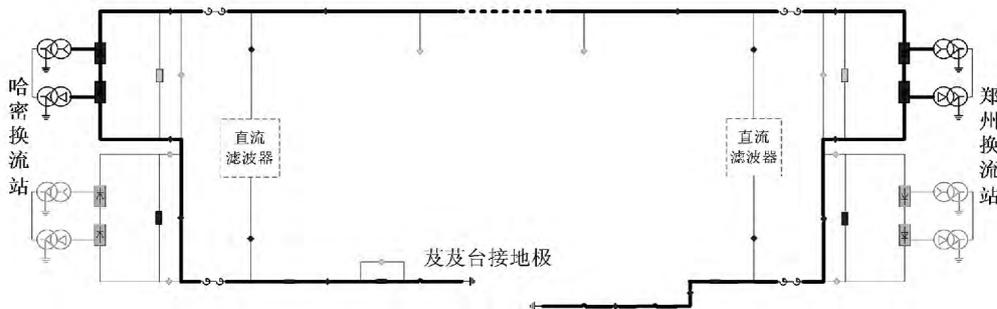


图3 单极大地运行方式

表 4 直流电流测试数据与仿真结果对比 / A

变压器测点	情形 1		情形 2		情形 3		情形 4		情形 5		
	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	
750 kV	哈密	5.825	5.700	8.214	7.750	0.000	/	0.000	/	0.000	/
	烟墩	5.303	5.600	0.000	/	0.000	/	0.000	/	0.000	/
	吐鲁番	-0.327	-0.300	-1.038	-0.100	-1.435	-1.500	-2.251	-2.420	-1.353	0.220
	敦煌	-1.610	-1.620	-2.615	-2.660	-2.286	-2.370	-5.978	/	-2.173	/
	沙州	-4.695	/	-4.094	/	-6.046	/	-5.97	/	-5.833	/
220 kV	山北	-2.750	-3.140	-3.026	-3.720	-4.887	-4.710	0.000	/	-3.508	-3.210
	石城子	0.929	1.240	0.000	/	0.000	/	0.000	/	0.000	/
	天光	-0.305	0.360	0.198	0.171	2.038	2.184	2.599	2.890	0.000	/
	银河路	-0.462	0.510	1.949	2.100	2.075	2.169	2.176	2.300	0.000	/
	东疆	10.404	11.110	0.000	/	0.000	/	0.000	/	0.000	/
	烟墩西	2.245	2.300	0.000	/	0.000	/	0.000	/	0.000	/
	淖毛湖	-0.475	-0.500	-0.569	-0.630	-0.87	-0.840	-1.313	-1.48	-0.848	-0.880
	十三间房	-1.759	-1.700	-1.907	-1.820	0.000	0.000	-2.468	-2.45	-2.178	-1.250
	东源热电	-0.892	1.700	0.372	0.350	1.945	1.720	2.064	0.400	0.000	/
	麻黄沟东	-0.922	-0.970	0.00	0.00	0.00	/	0.000	/		
110 kV	东疆	0.000	0.260	0.00	0.020	0.001	0.060	0.001	0.130	0.001	0.040
	天光	0.009	0.050	1.033	1.150	1.398	-0.240	1.273	/	1.809	/
	淖毛湖	0.391	0.50	0.484	0.497	0.773	0.640	0.778	0.660	0.769	0.742
	山北	0.897	0.870	1.050	1.150	0.895	1.055	0.715	0.829	0.609	0.623

测点工作人员在统一指挥下同时测量中性点直流电流。测点如表 3 所示。

4.2 直流偏磁测试结果

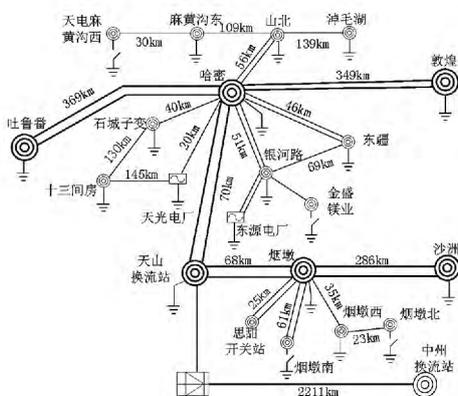


图 4 220 kV 级以上网架结构及试验前接地状态

为了检验天一中直流单极大地回线方式下哈密地区加装隔直装置后对电网直流电流的抑制效果,采用了 5 种测试情形,电网状态和隔直装置动作情况如下。

情形 1:哈密地区电网主变压器接地方式按照

原有方式运行如图 4 所示,极一低端单极大地回线 200 MW。

情形 2:拉开烟墩西、石城子、麻黄沟东 220 kV 侧接地点,极一高端单极大地回线 250 MW 时,烟墩、东疆隔直装置动作。

情形 3:拉开烟墩西、石城子、麻黄沟东 220 kV 侧接地点,极一高端单极大地回线 400 MW 时,哈密、烟墩、东疆、十三间房隔直装置动作。

情形 4:拉开烟墩西、石城子、麻黄沟东、山北 220 kV 侧接地点,极一高端单极大地回线 400 MW,东疆、烟墩、哈密装置已动作,十三间房装置未动作。

情形 5:拉开烟墩西、石城子、麻黄沟东、银河路、天光电厂、东源热电 1 号主变 220 kV 侧中性点,极一高端单极大地回线 400 MW 时,东疆、烟墩、哈密装置已动作,十三间房装置未动作。

变电站各台变压器不同电压等级中性点的实测和仿真数据如表 4 所示。

5 种情形下哈密地区电网的接地主变压器依次

拉开接地点,且直流输送的功率也由200 MW增大到400 MW,接地极的电流由500 A增大至1 000 A。

情形1为哈密地区电网原始状态,测量天一中直流功率200 MW时各个变电站的中性点的直流电流值。

情形2中,直流功率为250 MW时,距离接地较近的烟墩变电站和东疆变电站隔直装置首先动作,且东疆变电站隔直电容两端的电压高于烟墩变电站的,说明了与接地极距离越近,受到直流偏磁的影响越大。

情形3在情形1的基础上增加直流输送功率至400 MW,在功率上升至400 MW的过程中,哈密变电站和十三间房变电站的隔直装置也相继动作。以此判断,随着接地极电流的增大,直流影响的范围增大,直流电流通过中性点接地变压器和输电线路输送至更远的接地变压器,距离接地极站209 km的十三间房变电站的隔直装置动作说明接地极电流通过耦合通道到达十三间房变压器,也说明了通过合理改变哈密地区电网的主变压器中性点接地方式,可以将直流电流的耦合通道延长和转移,从而避免本地区的中性点电流过大导致主变压器发生严重的直流偏磁现象。

情形4在情形2的基础上将哈密地区北部的山北变电站中性点拉开,分析可知,拉开山北变电站中性点致使直流耦合通路在山北变电站处断开,进一步延伸至麻黄沟和淖毛湖等哈密天山以北的远区,通过这种方式,改变了近接地极区的直流场电流分布和稍远处的装有隔直装置的变电站:哈密变电站和十三间房变电站中性点的直流分量降低,从而隔直装置未动作进行抑制。

情形5中,哈密地区电网中拉开了烟墩西、石城子、麻黄沟东、银河路、天光电厂、东源热1号主变压器共计6个220 kV侧中性点。极一高端单极大地回线400 MW时,哈密地区中接地极近区的烟墩变电站、东疆变电站、哈密变电站、山北变电站、淖毛湖变电站220 kV变压器接地。天一中直流在以400 MW功率输送电能时接地极入地电流幅值为1 000 A,入地电流可以通过750 kV烟墩变电站—220 kV东疆变电站750 kV哈密变电站—220 kV山北变电站—220 kV淖毛湖变电站组成的变压器、线路耦合通道传送直流电流,位于近区的东疆变电站、烟墩变电站和哈密变电站中性点直流电流过大,导致相应的隔直装置动作,以限制直流。

在以上5种情形中,测量结果与仿真数据相比,虽然有一定的差值,但是随着中性点运行方式的改变和直流输送功率的改变,仿真数据的变化趋势与实测值非常接近。同时可以看出110 kV等级的变压器中性点入地电流都较小,大多小于3 A,因此天中直流的投运对220 kV及以上电压等级设备的影响较大,重点治理直流偏磁主要对象应以220 kV及以上的主变压器设备为主。在5种情形对应的运行方式的测试过程中,隔直装置根据直流电流阈值的设置正确动作,成功避免了变电站主变压器直流电流过大,造成偏磁现象危及主变压器运行。本次实测和仿真表明了隔直装置与电网接地点运行方式相互配合,能够有效抑制变压器直流偏磁。

5 结 论

(1) 天山换流站接地极位处哈密地区电网密集区域,与周边各电压等级的中性点接地变压器和输电线路形成直流通路,造成变压器直流偏磁现象。已经实测到的直流电流表明针对天一中直流的投运,需要进行深入的直流偏磁原理和治理的研究,为今后更多的特高压建设和运行做好准备。

(2) 通过交流电网直流电流分布计算软件,计算分析得到哈密地区的直流分布情况,实测表明仿真与实测较为接近,可以充分利用该软件程序进行分析,指导下一步直流偏磁的治理工作。

(3) 经过测量发现,哈密地区电网的多个220 kV变电站距离换流站接地极距离较近,容易产生较大的中性点直流电流。通过在220 kV东疆变电站、750 kV烟墩变电站和哈密变电站安装隔直装置,有效抑制接地接近区的主变压器偏磁电流。

(4) 隔直装置与地区电网主变压器的接地方式相结合,可以有效改变直流的通路,从而实现抑制直流偏磁问题。对于地区电网的接地运行方式仍然需要进一步的深入研究,以确定最优的电网接地拓扑结构,防止将直流电流疏导至其他变压器而产生严重的直流偏磁现象。

参考文献

- [1] 王明新,张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术,2005,29(3):9-14.

(下转第85页)

衡的结果,进行目标网架规划,确定最佳方案。借助重庆星能电气有限公司的《供电网计算分析及辅助决策软件》,提高了规划效率,也使网架规划和分析变得很方便。

参考文献

[1] 邓昆玲,张爱军,王鹏,等. 县城电网现状及规划要点分析[J]. 内蒙古电力技术, 2012(2): 8-11.

[2] 杨志彦. 对县城电网改造的探讨[J]. 农村电气化, 2003(2): 14.

[3] 陈根永,杨丽徒,郑自强. 县级城区电网规划研究[J]. 郑州工业大学学报, 2000, 21(2): 45-47.

[4] 张仁辉. 浅谈县城电网规划[J]. 技术与市场, 2013(8): 186-187.

[5] 周培华. 对县城电网规划的建议[J]. 中农村电工, 2005(1): 22.

[6] 陈光英. 县城电网规划浅议[J]. 农村电工, 2003(3): 30.

[7] 张肖青. 对县(市)城镇电网建设与改造问题的探讨[J]. 农村电气化, 2003(10).

[8] 乐欢,王主丁,肖栋柱,等. 基于空区推论的空间负荷预测分类分区实用法[J]. 电力系统自动化, 2009(7): 81-85.

[9] 中华人民共和国国家电网公司. 配电网技术导则[Z]. 2009.

[10] 中华人民共和国国家电网公司. 城市电力网规划设计导则[Z]. 2006.

作者简介:

冉郑国(1972),主要从事电网规划及建设管理方面的研究;

周星星(1990),主要从事配电网规划在实践应用方面的研究。

(收稿日期: 2014-03-09)

(上接第52页)

[2] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 57-58.

[3] Nobuo Takasu, Tetsuo Oshi, et al. An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 1173-1179.

[4] 覃国茂,付海涛,肖荣. 直流偏磁对葛洲坝电站主变压器的影响及抑制措施[J]. 水利发电, 2007, 33(12): 79-81.

[5] 吴鹏,田猛,陆云才,等. 锦一苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 5-9.

[6] 余洋,韦晨,朱琳. 直流输电接地极电流对不同结构变压器影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 71-76.

[7] 蒯狄正,万达,邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.

[8] Annakkage U D, McLaren P G, Dirks E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.

[9] 郝治国,余洋,张保会,等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 10-14.

[10] 张波,赵杰,曾嵘,等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-87.

[11] 朱艺颖,蒋卫平,曾昭华,等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.

[12] 尚春. HVDC地中电流对交流变压器影响的抑制措施[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.

[13] 马玉龙,肖湘宁,姜旭,等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 62-65.

[14] 杜忠动,董晓辉,王建武,等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.

[15] 蒯狄正,万达,邹云. 变压器中性点注入反方向偏磁直流的应用分析[J]. 华电电力, 2005, 33(6): 21-23.

作者简介:

王建(1986),硕士研究生,工程师,主要研究方向为高压电气设备在线监测和电气设备故障诊断;

马勤勇(1973),本科,高级工程师,主要研究方向为高压电气设备在线监测和电气设备故障诊断;

常喜强(1976),硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电网安全运行及电网调度控制;

张媛(1987),硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为高电压与绝缘技术;

金铭(1987),本科,高级工程师,主要研究方向为高电压与绝缘技术;

范旭华(1955),女,本科,高级工程师,主要研究方向为高压电气设备在线监测和电气设备故障诊断;

刘依梅(1986),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电网运行及其自动化。

(收稿日期: 2014-05-12)