

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.09.033

交流系统变压器直流偏磁防护决策研究

杨嘉伟¹, 黄力¹, 华夏², 唐波¹, 郝斌¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 甘肃电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 现有变压器偏磁的直流防护中, 缺乏用治理直流偏磁风险变电站的决策型方案。为解决该问题, 通过分析直流偏磁产生的根本原因, 指出变电站的不同连接分布是造成直流偏磁现象的直接因素。从实验角度出发, 以酒泉—湖南±800 kV 直流送端系统为研究对象, 建立送端电网等效直流模型, 通过研究变电站与接地极分布、变电站站间连接分布以及并联运行变压器台数和加装抑直设备4种因素影响下的直流电流分布规律, 提出了直流抑制设备在交流电网中的部署策略, 经过在送端电网的应用, 变压器偏磁水平得到了良好控制, 为今后解决同类问题提供了指导性建议。

关键词: 变压器; 直流偏磁; 连接分布; 抑直设备; 防护部署

Research on Decision-making of Transformer DC Magnetic Bias Protection in AC System

YANG Jiawei¹, HUANG Li¹, HUA Xia², TANG Bo¹, HAO Bin¹

(1. College of Electronic Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;
2. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In the DC protection of existing transformer bias magnetic field, there is lack of a decision-making scheme for controlling the risk of DC bias magnetic substation. In order to solve this problem, by analyzing the root cause of DC bias, it is pointed out that the different connection distributions of substations are the direct cause of DC bias. From the experimental point of view, a direct-current system of Jiuquan-Hunan ±800 kV DC transmission system is used as the research object, and the equivalent DC model of the transmission end power grid is established. The substation and the distribution of grounding electrodes, the connection distribution between substation stations, the number of transformers connected in parallel, and the installation of suppression are studied. Based on the direct current distribution law under the influence of four factors of the direct equipment, the deployment strategy of the DC suppression equipment in the AC power grid is proposed. After the transmission end network configuration, the transformer magnetic bias level is well controlled, providing suggestions for solving similar problems.

Key words: transformer; DC bias; connection distribution; DC suppression device; protection deployment

0 引言

近年来, 特高压直流工程建设在我国得到快速发展^[1-2], 但当直流线路以双极不平衡方式运行时, 会造成临近变压器的偏磁现象。实际工程中, 多采用限制变压器中性点流入直流的方式进行偏磁抑制, 因此, 采用合理的抑直策略成为直流偏磁防护关注的热点^[3-5]。

当前尚未有针对直流偏磁抑直策略的研究, 而是主要集中于抑直措施的相关理论和在电网的优化投切方法^[6-14]。如文[6-7]分别研制了一种新型的直流偏磁抑制方法; 文[8]探讨了用于变压器偏磁抑制的中性点串联电容、电阻和电位补偿等方法, 并指出了不同方法之间的性能差异; 文[9-11]研究了应用中性点串接电容或者电阻方法对系统绝缘和继电保护带来的影响; 在优化投切方面, 文[12-14]

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 国家电网公司科技项目(5227221600KW); 三峡大学高层次人才科研启动基金(20161229)。

Project Supported by Scienec and Technology Project of SGCC(5227221600KW), China Three Gorges University for High Level Talent(20161229).

基于人工智能算法研究了电容和电阻型抑直装置在电网中的应用方案。从中可以看出,研究多偏重于单个变压器的直流抑制方法和对系统影响的相关理论研究,虽然一些研究涉及到了在电网的应用策略,但针对的是电容或者电阻某一特定抑直装置的投切方法,并且利用智能算法的前提是建立真实的电网节点模型,无疑会耗费巨大的人力以及计算资源^[11],这将导致直流偏磁问题出现时无法第一时间进行有效的防护部署。

针对以上问题,文中基于酒泉—湖南特高压直流输电工程,提出了用于治理直流偏磁风险变电站的决策型抑直方案,指出了变电站连接分布是造成直流偏磁的直接原因,通过数值模拟揭示了不同地理分布、连接架构以及加装抑直装置影响下的直流电流在交流电网分布规律,为今后直流偏磁防护提供了指导建议。

1 当前治理存在问题

实际工程中,通常采用变压器中性点加装抑直装置的方式限制流入直流,从而达到偏磁防护目的。在溪洛渡—浙西直流工程中,采用了电容和电阻抑直设备进行直流防护,并提出了分层治理的方法。但是,该思路是针对特定的地区和偏磁程度的治理,对于不同电网连接结构的直流工程不具有参考意义。在天山—中州直流工程治理研究中,是依据变压器严重程度依次治理,但多项研究已经表明,采用逐步治理存在风险的偏磁电站可能会造成电网局部电流升高^[15-17],还会造成抑直设备的资源浪费。

因此,为了避免上述问题产生,需要提出合理的防护策略指导直流偏磁治理。

2 偏磁电流的分布与防护决策研究

2.1 变电站连接架构与电流分布

直流偏磁产生的根本原因是土壤电阻率分布不均导致表层大地电位差异而引起的一种变压器故障现象,见图1。图1中:变电站A、B、C分别位于不同地理位置且依次直接相连。以正极—大地运行为例,距离直流接地极近的变电站中性点电位高,距离接地极远的中性点电位较低^[18]。

图1中A变电站距离接地极位置最近,电位最高,与B、C站相比电位差异大,因此有连接时,会产生较大的偏磁电流;B站相对于A、C两站情况复杂。根据B变电站的地理位置,其地电位高于C变

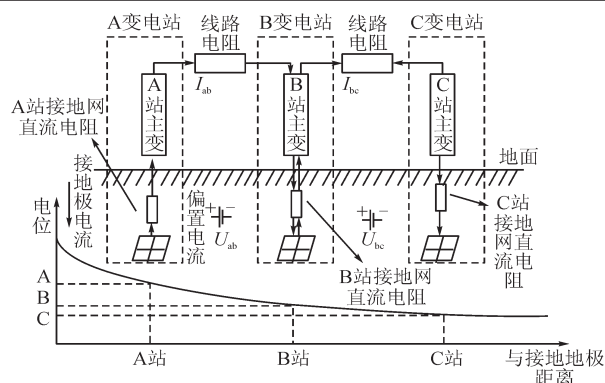


图1 直流电流流向交流系统原理

Fig. 1 DC current flow to AC system principle

电站低于A变电站,当该站和A站C站都相连构成回路时,电流从A站流入,从B站流出,同时,由于B站电位高于C站,电流会从B站流入再从C站流出,因此在这种情况下B变电站中性点流入直流电流相对较小;对于变电站C,距离接地极较远时,中性点电位近似为零,当C站仅与B站相连时,由于电位差变化不大,此时中性点流入直流较小,但当与A站连接时,此时电位差很大,可能会有较大的直流电流流入,造成直流偏磁,但实际土壤电位变化复杂,具体情况应通过计算分析。综上所述可以看出,变电站不同的连接分布使得接地点电位和电网结构发生改变,直接影响了中性点直流分布,使得不同电站偏磁程度存在差异。

因此,文中提出研究接地极与变电站距离、变电站线路连接、并联运行变压器台数和加装抑直装置4种情况下对电网结构的改变,分析直流电流的分布规律,进而确定合理的防护决策。

2.2 偏磁电流计算

假设交流系统有 i 个变电站, j 个发电厂,则接地支路有 $(i+j)$ 条,同时假设系统中有1个节点, b 条支路,则地上系统有 $(i+j+1)$ 个节点, $(i+j+b)$ 条支路。对于接地支路,设 U_{si} 和 I_{mi} 是变电站中性点电位和流过电流。

电位和电流可根据节点电压法计算

$$J_n = Y_n \cdot U_n \quad (1)$$

式(1)中: J_n 是注入节点的电流源向量; n 是节点数,即 $(i+j+1)$; Y_n 是节点导纳矩阵; U_n 是节点电压。

其中 J_n 可以通过式(2)计算

$$J_n = A \cdot Y_m \cdot U_s \quad (2)$$

式(1)中: A 为 $(i+j+1) \times (i+j+1)$ 关联矩阵; Y_m 是 $(i+j+b) \times (i+j+b)$ 支路导纳矩阵; U_s 是 $(i+j+b) \times 1$ 电压源矩阵。

Y_n 可表示为

$$Y_n = A \cdot Y_m \cdot A^T \quad (3)$$

代入(1)式化简得

$$U_n=Y_n^{-1}A\cdot Y_m\cdot U_s$$
 (4)

则支路电压 U_m 可以表示为

$$U_m=A^T\cdot U_n$$
 (5)

将(4)代入(5)式得

$$U_m=A^T\cdot Y_n^{-1}A\cdot Y_m\cdot U_s$$
 (6)

实际系统中不存在电流源,因此支路电流 I_m

可以由式(7)求解

$$I_m=Y_m\cdot (U_m\cdot U_s)=(Y_m\cdot A^T\cdot Y_n^{-1}A\cdot Y_m-Y_m)\cdot U_s$$
 (7)

式(7)中, $Y_m\cdot A^T\cdot Y_n^{-1}A\cdot Y_m-Y_m$ 即为 $(i+j+b)\times(i+j+b)$ 矩阵, 设

$$Y_m\cdot A^T\cdot Y_n^{-1}A\cdot Y_m-Y_m=\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$
 (8)

由于非接地支路电压源为零,因此式(7)可以表示为

$$\begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{s1} \\ 0 \end{bmatrix}$$
 (9)

化简可得接地支路电流为

$$I_{m1}=Y_{11}\cdot U_{s1}$$
 (10)

式(10)中: Y_{11} 是 $(i+j)\times(i+j)$ 矩阵; U_{s1} 依赖于土壤电阻率分布,属于地下“场”的计算,可以由数值仿真得出^[19-21]。

2.3 试验对象选取

文中以酒泉—湖南±800 kV 直流送端系统为研究对象,为简化计算,忽略发电厂部分。建立 330 kV 及以上送端系统变电站连接见图 2。图 2 中土壤分布模型的建立在考虑经典大地模型基础上,针对甘肃地区黄土地质结构进行一定修正,采用的土壤分布参数模型见表 1。

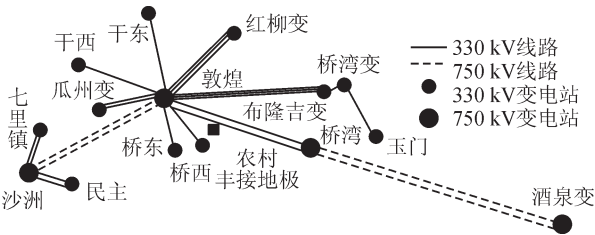


图 2 酒泉—湖南直流送端 330 kV 及以上系统连接
Fig. 2 System connection of Jiu-Hu project for 330 kV and above system

3 交流系统直流分布情况分析

3.1 额定运行下的电网直流分布

2017 年 3 月,在送端侧模拟单极大地运行时,通过对周边 15 座重要变电站监测发现了直流偏磁现象。但受试验条件限制,当天仅模拟了注入 1 500 A 电流情况,而酒—湖直流额定运行时入地电

表 1 土壤电阻率分布参数

Table 1 Soil resistivity distribution parameters

层数	电阻率/(Ω·m)	厚度/m
1	60	0~200
2	150	200~2 800
3	700	2 800~18 000
4	13.5	>18 000

流会达到 5 000 A,影响更加严重。

在农村丰接地极模拟注入 1 500 A、5 000 A 直流电流,对额定运行下的送端电网直流分布情况进行计算见表 2。从表 2 中可以看出,同现场实测数据相比,计算得到的电流呈现相同的变化规律,且相对误差率在 10% 以下,但是个别距离接地极较远的变电站如布隆吉变、干西变和干东变等仿真与实测相对误差较大,这是由于这些电站的中性点电流基数本身很小造成的,但是这些电流均在治理阈值以内,未超过变压器承载能力,不是主要的防护对象,因此不会造成治理时的误决策。

表 2 电流分布情况

Table 2 DC current distribution

变电站	电压等级/kV	1 500 A (实测)/A	1 500 A (仿真)/A	5 000 A (仿真)/A
沙洲变	750	-30.5	-34.8	-107.7
七里镇	330	9.8	11.6	33.4
民主变	330	10.3	10.9	35.1
敦煌变	750	-37.2	-40.4	-130.8
瓜州变	330	31.4	29.8	82.1
玉门变	330	-14.7	-18.3	51.5
布隆吉	330	-2.4	-1.4	-9.3
红柳变	330	13.1	13.2	45.3
干西	330	1.6	2.1	5.5
干东	330	1.2	1.4	4.5
1 号桥湾	750	-2.2	-2.4	-10.4
2 号桥湾	330	1.5	2.2	4.8
酒泉变	750	-0.5	-0.7	-3.9
桥东	330	-16.1	-13.7	59.3
桥西	330	-46.1	-50.7	-125.2

经与电科院研究协作,本次直流偏磁配备电阻和电容型抑直设备。根据变压器直流承载能力,分别采用流过中性点直流 12 A、8 A 作为送端电网 750 kV 和 330 kV 变压器治理阈值。

3.2 变电站与接地极距离的影响

从图 2 可以看出,敦煌变作为送端侧电网枢纽,连接复杂,线路跨度幅度大,具有一定代表性。因

此,为判断整体电流分布情况,选择与该站相连接的电网区域为例研究直流分布情况。

在接地极注入5 000 A直流电流后,中性点电位与电流分布见图3,规定电流从大地流入变压器电流方向为“-”。

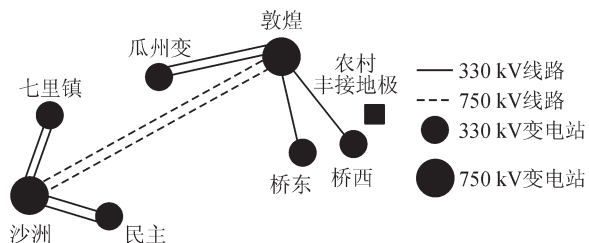
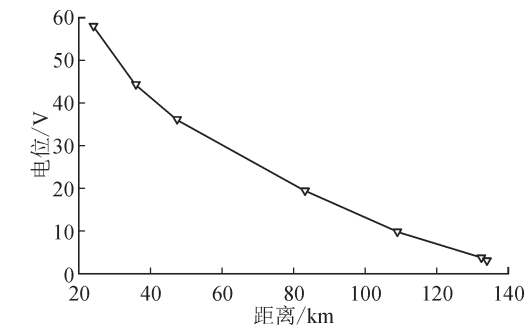


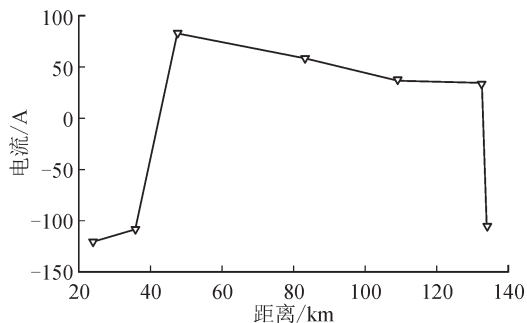
图3 中性点电位、电流随距离变化规律

Fig. 3 Current and potential changes with distance

从图3(a)可以看出,中性点电位和距离的变化基本呈线性关系。但相比于电位变化,中性点电流不完全呈现线性规律,从图3(b)来看,随着距离增加,电流首先是逐步降低,而当达到130 km时,电流又突然增加。根据直流偏磁原理,偏磁电流是由于电位分布不均造成线路中流过直流电流的,而这种情况出现肯定是在该电站连接回路中出现了较大电位差所致,因此需结合变电站连接共同分析见图4。



(a) 中性点电位变化



(b) 中性点电流变化

图4 部分变电站连接

Fig. 4 Substation connection

根据图4网架连接,敦煌变分别与周边的330 kV电站直接相连,但330 kV电站之间没有直接的线路连接。其中桥西变距离接地极最近,相对于桥东变和瓜州变的中性点之间的电位差变化大,因此流过线路的直流也更高。对比敦煌周边变电站发现,沙

洲变及其周边330 kV变电站距离接地极较远,电位已下降至很低,电势差变化不明显,因此民主变和七里镇变中性点流过的电流也较小;然而,沙洲变虽然电位很低,但是其除了和民主变、七里镇变有直接线路连接外,还和敦煌变相连接,又因敦煌变电位很高,造成了两者间电势差非常大,因此导致沙洲变出现了“距离远,电流高”的现象,也就是2.1节所分析的C站出现的情况。

3.3 变电站间线路间距的影响

交流系统中,站点之间通过架空输电线路相连,由于距离直接地极较近的站点具有较高电位,站点间的电位跨度将随站点间距离的不同而改变,最终导致流过站点的直流电流发生变化。因此,分别假设敦煌变和沙洲变作为其周边变电站的连接起始点,瓜州变、桥东变、桥西变和沙洲变作为敦煌变的连接末端,民主变和七里镇变作为沙洲变的线路末端,计算线路末端变电站的中性点电流并整理见表3。

表3 各条线路距离

Table 3 Line distance

线路	距离/km	电流/A	线路	距离/km	电流/A
敦煌—瓜州	62.4	82.5	敦煌—沙洲	145.2	-105.3
敦煌—桥东	49.2	57.8	沙洲—民主	43.2	36.8
敦煌—桥西	56.4	-120.4	沙洲—七里镇	41.9	34.2

从表3中可知,当相连站点之间跨度增大时,流经两站点的电流也将增大,但是,这种站点间的线路跨度应符合变电站与接地极地理位置分布见图5(b),即接地极位于两个站点连线水平线附近。以接地极为圆心,两个站点则可以看作位于两个不同电位半径的圆弧上,此时的电势相差较大,因此导致末端站点直流电流增大,根据基尔霍夫电流定律,与之有线路连接的其他站点也会遭受直流偏磁风险。而当站点与接地极位置见图5(a)分布时,虽然站点间的距离与之前相同,但此时接地极位于两站点连线的垂直平分线附近,即处于等电位圆弧上,电势差变化不大,末端站点电流可能很小。

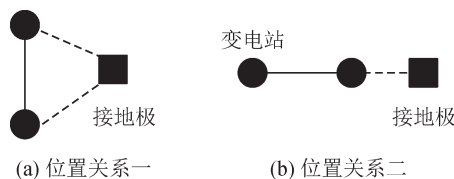


图5 变电站与接地极地理位置

Fig. 5 Substation and grounding location

因此,在进行直流偏磁试验和治理方案制定时,有必要将含较大地理跨度线路连接的站点作为重点关注对象。

3.4 并联变压器台数的影响

并联台数与中性点电流关系见表4。观察表4计算结果,流过变压器的直流电流并不符合随距离增加而递减这一规律。其中,电流值表示流过单台变压器中性点的直流电流,距离表示变电站与直流接地极之间的距离,并联台数表示该变电站中并联运行的变压器台数。

表4 并联台数与中性点电流关系

Table 4 The relation between the number of parallel transformers and DC current

变电站	中性点地电流/ A	电流值/A	并联台 数	距离/km
沙洲变	-105.3	105.30	1	134.10
七里镇	34.2	17.10	2	132.56
民主变	36.8	18.40	2	109.20
敦煌变	-108.7	54.35	2	36.10
瓜州变	82.5	41.25	2	83.30
桥东	57.8	19.30	3	47.60
桥西	-120.4	40.10	3	24.10

由表4可知,750 kV 变电站中,沙洲变距离接地极 134.1 km,流过站点中性点电流为-105.3 A,仅一台变压器运行,因此流过每台主变的电流值为105.3 A;敦煌变距离接地极 36.1 km,流过中性点的电流为-108.7 A,有两台主变并联运行,因此流过每台主变的直流电流值为54.35 A;同理,在330 kV 变电站中,以瓜州变为例,距离接地极 83.3 km,中性点计算电流为82.5 A,流过每台主变的电流为41.25 A。

可见,直流电流总量基本满足随距离增加而递减的规律,但当电站中有多台变压器并列运行时,流过直流电流总量则由多台变压器共同承担,使得每台变压器的直流数值下降幅度很大。这一规律表明:实际工程中具有多台变压器并列运行的电站,其直流偏磁风险将较单一变压器站点会大幅降低,考虑到接地变压器台数与治理设备数量一致。

因此在治理过程中,可优先治理并联运行变压器台数较少的站点,避免治理设备过多而造成成本过高。

3.5 加装抑直措施的影响

通过在敦煌变、桥西变和沙洲变加装电容抑直装置见图6。对比图6(a)和(b)可以看出(其中多回路直流电阻已折算至单回线路),接入电容装置后,该电站的中性点电流为零。根据敦煌变计算结果,接入电容器后,敦煌变中性点电流为零,但敦煌变主要由自耦变压器组成,依据文[13],自耦变压器还应判断其串联绕组等效偏磁电流大小,经计算发

现,实际变压器内流通电流仍超过承受能力,存在直流偏磁风险。

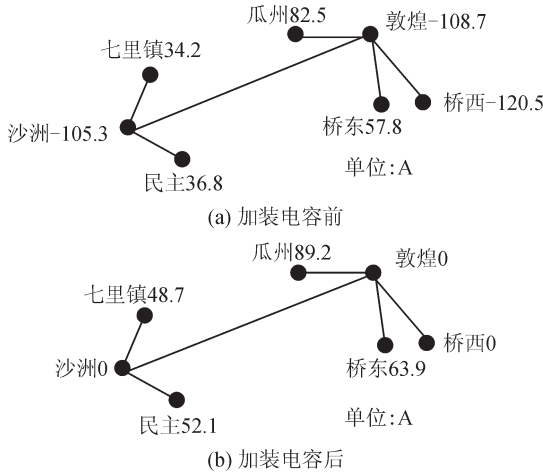


图6 加装电容抑直装置对电流分布的影响
Fig. 6 The effect of installing capacitive devices on the current distribution

说明对于自耦变压器而言,仅对偏磁风险电站加装电容装置无法有效抑制直流电流。并且,观察瓜州变和桥东变发现,电流分别升高了6.7 A和6.1 A,但其他电站未受明显影响。这是由于敦煌变采取措施前对与其有线路相连接的变电站输出电流,从而补偿了这些变电站的中性点直流电流,说明对偏磁电站加装电容装置不仅可能无法抑制本站直流,还可能导致周边电站直流偏磁风险加重。同理研究加装2.5 Ω电阻装置后的电流分布,发现部分电站中性点直流不仅无法被限制在阈值内,同时也会导致周边电站中性点电流出现一定程度的升高。

因此,综合抑直设备的应用效果可以看出,仅在直流偏磁风险电站加装抑直装置会导致局部电网直流电流升高,无法有效抑制直流偏磁,应考虑同时对与其直接相连的电站进行防护。

4 直流偏磁防护部署

4.1 直流治理思路

通过分析直流电流在四种因素影响下的分布规律,提出了具有一定普遍适用性的防护决策:

- 1)确定治理阈值 k_i ,根据各个电站中性点电流 I_n 筛选 $I_n > k_i$ 存在直流偏磁风险的电站。
- 2)在(1)的基础上,根据工程经验,依此筛选距离直流接地极较近(以10 km为一个量度)、两站间距离跨度大(以10 km为一个量度)、连线多(大于等于2条)、主变台数少的变电站优先治理。
- 3)优先接入电阻器后,观察该站中性点直流是否满足 $I_n < k_i$,若是,计算等效偏磁电流是否满足

$I_{\text{eff}} < 4 \text{ A}$ (工程经验数值), 若达到限流标准, 则重复上述步骤进行后续治理。

4) 若没有达到限流标准, 将电阻器替换为电容器重复步骤 1)–3); 若仍无法抑制该站偏磁电流, 则保持该站接入抑直措施的基础上, 选择与该站直接相连的且超过阈值的变电站加装抑直措施 (选取原则同上步骤), 观察电流抑制情况, 直到抑制在阈值范围内。

4.2 送端电网防护配置

依据 4.1 直流治理思路, 对酒—湖送端电网进行防护部署, 并依据抑直装置配置情况计算直流分布见表 5、6。

表 5 防护配置方案

Table 5 Protection configuration scheme

采取措施	变电站名称
加装电容器	750 kV: 沙洲变, 敦煌变;
	330 kV: 桥西变, 瓜州变
加装电阻器	330 kV: 七里镇, 民主变, 玉门变, 红柳变, 桥东变
继续监测	750 kV: 桥湾变, 酒泉变
	330 kV: 布隆吉, 干西变, 干东变, 桥湾变

表 6 送端电网直流电流分布

Table 6 DC current distribution

变电站	电压等级/kV	电容	电阻	中性点电流/A	I_{eff}/A
沙洲变	750	1	0	0.0	-2.1
七里镇	330	0	1	1.2	1.1
民主变	330	0	1	0.9	0.4
敦煌变	750	1	0	0.0	-3.2
瓜州变	330	1	0	0.0	-0.8
玉门变	330	0	1	-2.3	-1.5
布隆吉	330	—	—	-4.5	-0.6
红柳变	330	0	1	1.3	1.6
干西	330	—	—	2.1	0.5
干东	330	—	—	2.2	0.6
桥湾变	750	—	—	-3.8	-0.2
桥湾变	330	—	—	0.7	0.3
酒泉变	750	—	—	-0.1	-0.1
桥东	330	0	1	2.4	0.2
桥西	330	1	0	0.0	-0.1

从表 6 中可以看出, 加装抑直措施后, 送端电网整体偏磁电流由 708.8 A 降低至 21.3 A, 抑制率达到 90% 以上, 计算变压器等效偏磁电流也发现, 绕组中的直流也被控制在阈值内。相比于单一的电容电阻抑直法, 经过合理的防护配置策略采用电容电阻结合的方法进行变电站配置, 在很大程度上降低了工程造价并保证了直流抑制的可靠性, 达到了直流

偏磁的防护目的。

5 结论

1) 通过分析直流偏磁产生机理, 指出变电站连接分布与直流偏磁产生的关系。通过建立酒泉—湖南送端电网等效直流模型, 从距离、并联主变台数和加装抑直装置 3 个层面分析了直流电流在交流电网的分布规律, 并提出了相对具有普遍适用性的直流防护策略。

2) 经对酒—湖送端电网进行防护部署, 整体直流偏磁水平得到良好控制, 验证了直流防护思路的合理性, 为今后处理同类问题提供有效参考。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhenya. Theory of UHVDC[M]. Beijing: China Economic Press, 2005.
- [2] 刘振亚, 张启平, 董 存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [3] 韩燕明, 黄曾述. 地电流对电力变压器影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 24-29.
HAN Yanming, HUANG Zengshu. Influence of grounding electrode current on power transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(1): 24-29.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 唐 波, 张小武, 葛光祖, 等. 特高压直流输电线路与接地极对地电场观测的干扰[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2951-2959.
TANG Bo, ZHANG Xiaowu, GE Guangzu, et al. Interference on geoelectric field observation from UHVDC power lines and its ground electrode[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2951-2959.
- [6] 陈志伟, 白保东, 陈德志, 等. 电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 208-214.
CHEN Zhiwei, BAI Baodong, CHEN Dezhi, et al. Research on the formation mechanism and suppression method of transformer DC bias[J]. Transactions of China Electrotech-

- nical Society, 2015, 30(14):208-214.
- [7] 梅桂华, 梁文进, 刘艳村, 等. 变压器直流偏磁电流阻容抑制装置的开发应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2581-2585.
MEI Guihua, LIANG Wenjin, LIU Yancun, et al. Development of the DC current blocking device in capacitor-resistor for transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2581-2585.
- [8] 李强, 叶红枫, 山江川, 等. 直流偏磁对变电站设备的影响分析及抑制方法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13):75-78.
LI Qiang, YE Hongfeng, SHAN Jiangchuan, et al. Analysis of DC bias effect on the substation equipment and its restraining methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(13):75-78.
- [9] 郑涛, 卢婷, 杨国生, 等. GIC引发直流偏磁对距离保护Ⅲ段动作性能影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2):1-5.
ZHENG Tao, LU Ting, YANG Guosheng, et al. Analysis of the effects on distance protection zone Ⅲ relays caused by DC bias induced from geomagnetic induced current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2):1-5.
- [10] 郑涛, 朱先启, 徐振栋, 等. 适应直流偏磁抑制装置接入的零序电抗继电器动作特性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10):2926-2931.
ZHENG Tao, ZHU Xianqi, XU Zhendong, et al. Analysis of the performance characteristic of zero-sequence reactance relay designed to accommodate DC bias suppression device access[J]. Power System Technology, 2013, 37(10):2926-2931.
- [11] 郑涛, 朱先启, 韩东伟, 等. 直流偏磁抑制装置接入对线路距离保护的影响分析[J]. 电网技术, 2013, 37(2):545-550.
ZHENG Tao, ZHU Xianqi, HAN Dongwei, et al. Influence of grid-connected DC suppression device on distance protection of transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(2):545-550.
- [12] 谢志成, 林湘宁, 李正天, 等. 基于隔直装置全局优化投切的直流偏磁治理方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24):7133-7142.
XIE Zhicheng, LIN Xiangning, LI Zhengtian, et al. Suppression method for DC bias based on global optimal witching method of blocking devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):7133-7142.
- [13] 黄彩臣. 抑制变压器直流偏磁电容隔直装置的优化配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
HUANG Caichen. Study on optimal configuration of suppression transformer DC-biasing capacitor barrier[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [14] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10):117-122.
CAO Nan, WANG Tianzheng, WANG Dongqing, et al. Study on configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10):117-122.
- [15] 邹国平, 姚晖, 何文林, 等. 溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J]. 高电压技术, 2016, 42(02):543-550.
ZOU Guoping, YAO Hui, HE Wenlin et al. DC bias suppression of receiving-end power grid in ±800 kV Xiluodu-Zhexi UHV DC project[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):543-550.
- [16] 于永军, 杨琪, 侯志远, 等. 天中直流工程入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(8):2298-2303.
YU Yongjun, YANG Qi, HOU Zhiyuan, et al. Influence of grounding current in UHVDC transmission project from Tianshan to Zhongzhou on Hami AC power system in Xinjiang uygur autonomous region[J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2298-2303.
- [17] 陈丹. 锦屏—苏南特高压直流输电入地电流在四川电网内分布的预测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14):92-96.
CHEN Dan. Forecast and analysis of Jinping - Sunan UHVDC earth-return current distribution in Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14):92-96.
- [18] 陆海清. 特高压直流输电单极大地运行对交流电网的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LU Haiqing. Research on the effect on AC system by monopolar operation of UHVDC system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [19] 阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(04):1333-1340.
RUAN Jiangjun, XUN Wenjie, DING Zhifeng, et al. Study of DC-bias current distribution in AC power system based on direct field-circuitcoupled model[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(04):1333-1340.
- [20] 刘连光, 马成廉. 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤电位分布计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18):1-5.
LIU Lianguang, MA Chenglian. Calculation of multi-layer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18):1-5.
- [21] 马成廉, 刘连光, 王乐天, 等. 高压直流输电接地极地电位分布 Ansys 仿真[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4):19-26.
MA Chenglian, LIU Lianguang, WANG Letian, et al. The

- 146-152.
CHEN Lingyun, CHENG Gaihong, SHAO Chong, et al. Research on control strategy for a 3-terminal LCC-MMC HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 146-152.
- [17] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC - MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [18] LIU S, XU Z, HUA W, et al. Electromechanical transient modeling of modular multilevel converter based multi-terminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 72-83.
- [19] CHANG Y, CAI X. Hybrid topology of a diode-rectifier-based HVDC system for offshore wind farms[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(3): 2116-2128.
- [20] XU Z, WANG S, XIAO H. Hybrid high-voltage direct current topology with line commutated converter and modular multilevel converter in series connection suitable for bulk power overhead line transmission[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(12): 2307-2317.
- [21] 陈博怡, 李兴源, 胡永银, 等. 混合直流输电控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 118-123.
CHEN Boyi, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Research of control strategies for hybrid HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 118-123.
- [22] 洪潮, 时伯年, 孙刚, 等. 基于LCC-MMC的三端混合直流输电系统故障特性与控制保护策略[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 73-79.
HONG Chao, SHI Bonian, SUN Gang, et al. Fault characteristics and control & protection strategy of three-terminal LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 73-79.
- [23] 余瑜, 刘开培, 陈灏泽, 等. 伪双极VSC-LCC型混合直流输电系统启动方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2572-2578.
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Haoze, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2572-2578.
- [24] NAUSHATH M H, RAJAPAKSE A D, GOLE A M, et al. Energization and regulation of a hybrid HVDC grid with LCC and VSC[C]//IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Saskatoon, SK: IEEE, 2017: 1-6.
- [25] YU Y, LU Y, CHEN Q. Internal model startup control for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[C]//2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Chengdu: [s.n.]: 2017: 15-19.
- [26] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
XU Zheng, WANG Shijia, ZHANG Zheren, et al. Inverter station connection modes and control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 115-122.

张文嘉(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划与自动控制技术。

蔡晖(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划技术。

王国腾(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流电力系统安全稳定分析与控制。

徐政(1962—), 男, 浙江大学求是特聘教授, 博士生导师, 电力系统自动化研究所所长。于1983、1986和1993年分别在浙江大学电机系获学士、硕士和博士学位。主要研究领域为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电与风电场并网技术、电力谐波与电能质量等(通讯作者)(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn, xuzheng007@zju.edu.cn)。

(上接第229页)

ansys simulation of HVDC grounding electrode potential distribution[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 19-26.

杨嘉炜(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事交流电网直流分布计算和直流偏磁防护研究(E-mail: 1046480562@qq.com)。

黄力(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高电压与绝

缘技术领域研究(通讯作者)。

华夏(1989—), 男, 博士, 主要从事智能电网与新能源领域研究。

唐波(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事输变电工程电磁环境与高压直流输电研究。

郝斌(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁环境研究。