

基于土壤结构的直流偏磁治理装置设计与仿真研究

徐志奇

甘肃光明电力工程咨询监理有限责任公司，甘肃 兰州

收稿日期：2024年4月6日；录用日期：2024年6月5日；发布日期：2024年6月14日

摘要

本文以酒泉 ± 800 kV换流站及其输电线路为研究背景，构建了接地极附近三维复合分层模型并对其线路所经酒泉地区的土壤结构电阻率进行测试，分析了对ESP (地表电位, Earth surface potential)的影响。通过分析直流偏磁产生机理，提出直流偏磁直流方法，首先，在特地土壤结构中，通过设置测站，实测实量对周边交流变电站中性点接地的直流偏磁的影响进行分析研究，最后，搭建了基于土壤结构的隔直装置电路模型，利用MATLAB中Simulink可视化仿真工具，对直流偏磁治理进行仿真研究，为特高压直流输电项目的接地极极址选择和直流偏磁治理提供一定的参考。

关键词

特高压直流，土壤结构，变压器，直流偏磁，治理

Design and Simulation Study of DC Biasing Governance Device Based on Soil Structure

Zhiqi Xu

Gansu Guangming electric Power Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Lanzhou Gansu

Received: Apr. 6th, 2024; accepted: Jun. 5th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

The paper based on the research background of Jiuquan ± 800 kV converter station and its transmission line, constructed three-dimensional composite layered model of the soil structure near the grounding pole, and tested resistivity the area where the line passes through Jiuquan, the effect of ESP (Earth surface potential) is analyzed. Firstly, in the special soil structure, the influence

of the measured quantity on the DC bias grounded at the neutral point of the surrounding AC substation was analyzed and studied. Finally, the circuit model of the straightening device based on the soil structure is built, and used Simulink in MATLAB, the simulation study of DC magnetic biasing treatment can provide some reference for the selection of grounding pole address and DC magnetic biasing treatment of ultra high voltage direct current (UHVDC) projects.

Keywords

Ultra High Voltage Direct Current, Soil Structure, Transformers, DC Bias, Governance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自“十二五”以来,我国全面建设特高压直流输电[1],哈密-郑州 ± 800 kV 特高压直流输电、酒泉-湖南 ± 800 kV 特高压直流输电,以及2023年开建的陇东-山东 ± 800 kV 特高压直流输电工程均经或起源于甘肃省,而且在很长区间内并行。目前,我国特高压直流输电采用双极直流输电系统居多,我国电网规模庞大,系统错综复杂,交直流网在某一地区并存[2] [3] [4] [5] [6],当其中一极发生故障或退出运行或双极不对称运行时,系统会自动投入单极大地运行,这时会有较大的直流电流经接地极流入大地,接地极附近有直流电位[7] [8] [9] [10] [11],该电位和输送的电流大小和该处的土壤电阻率有关,电流越大,土壤的电阻率越高,电位就越高。致使接地极附近的地表电位升高[12] [13],当附近有交流系统的变压器采用中心点接地时,较大的直流电流经由中心点接地进入变压器绕组,导致该变压器产生直流偏磁效应[14] [15] [16] [17],使得变压器产生振动剧烈、噪音过大、发热等现象,影响到电网安全运行[18]-[28],一定程度上给高速铁路供电系统也带来了很大影响。

分析 ESP 是分析直流电流对交流系统的影响的关键,目前,对变压器中性点流过的直流分量估计不够,究其原因是很难选用合适的土壤模型用以计算 ESP 分布。文献[12]基于水平和复合分层土壤模型计算 ESP;文献[14]对地表电位影响及合理选取土壤模型给出了方法,文献[19]对直流偏磁保护做了改进,文献[23]给出了一种直流偏磁直流策略,文献[26]给出了一种直流偏磁抑制装置实际运用效果,文献[18] [22] [28]分析了直流偏磁给变压器影响。

酒泉 ± 800 kV 换流站已投入运行数年,为甘肃清洁能源消纳和外送发挥了巨大作用,本文对其接地极极址实际数据进行分析,从土壤结构对地电位的影响,从理论上分析了土壤参数变化对地表电位影响的物理机理,针对特定的土壤结构,对比研究了加装隔直装置前后的直流偏磁治理效果。

2. 酒泉 ± 800 kV 换流站接地极极址土壤结构及其对 ESP 的影响情况

酒泉-湖南 ± 800 kV 特高压直流输电工程是在甘肃省境内建成的首座换流站,该站位于甘肃桥湾,其接地极极址地处酒泉瓜州县锁阳城镇农丰村北约2 km,属祁连山山前冲洪积缓倾平原,地势平坦开阔,根据勘测,表层均为盐碱层,其厚约5~10 cm,呈灰黄色或斑块状或灰白或白色,地层主要由第四系全新统冲积粉土和粉质粘土组成。以下是各层的岩性描述:

① 粉土(Q4al): 褐黄色,稍湿密,土质较为匀称,混和砂粒比较多。该层主要分布在地表层,其厚

度约为 0.6~0.9 m, 层底为 0.6~0.9 m, 层底的高程大致在 1291.1~1291.5 m 之间。

② 粉质粘土(Q4al): 黄褐~灰褐色, 呈湿润, 较为饱和, 塑性比较好, 地下水位附近呈软塑, 上部呈现碎块状构造, 下部呈现薄层状, 不均匀, 该层中间夹有薄粉砂和粘土。该层仅 KJ21 揭露, 其厚度约为 12.9 m, 层底为 13.8 m, 层底的高程大致在 1278.3 m。

③ 粘土(Q4al): 该层颜色很丰富, 主要呈灰褐、灰绿色, 含水率基本饱和, 塑性好, 土质比较均匀, 中间夹有一定的粉土。该层厚度均在 3.2 m 以上。

根据取样化验结果显示, ①、②层易溶盐在 0.45%~20.2%之间, 对比《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)可知该层属盐渍土层。

①、②层属细粒土均在 2 mm 以下, 按《盐渍土地区建筑规范》(SY/T0317-2012)的相关规定, 该土层为溶陷性盐渍土。其平均厚度约 3 m。从土的取样分析报告可知, 其硫酸钠的含量介于 0.01%~7.08% 之间, 最大易溶盐含量为 20.20%, 从而判定接地极址土壤结构为盐胀性盐渍土。

直流电流在大地中形成的地表电位差与接地极附近的土壤参数有关, 土壤结构影响土壤电位梯度, 电位梯度又决定着中心点接地的变压器励磁电流的直流电流大小。由于我国幅员辽阔, 地理环境复杂, 尤其对分布式接地系统, 方圆数百公里, 土壤的介电常数 ε 并非恒定不变, 土壤分层也趋于复杂, 给计算带来了很大困难, 相对介电常数与频率的变化呈幂函数关系, 如式(1)所示:

$$\varepsilon_r = \begin{cases} pf^q + \varepsilon, 2 \times 10^5 \text{ Hz} \leq f \leq 10^7 \text{ Hz} \\ mf^n + \varepsilon, 50 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \times 10^5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 、 q 、 m 、 n 为与介电常数相关的系数, ε 为频率分界点的相对介电常数。

文献[12][14]构建的三维复合分层土壤模型如图 1 所示, 设定 $O(x_0, y_0, z_0)$ 为点电源, 则 xOy 为大地平面, 在大地中选取任何一层的任意一点坐标为 $S(x, y, z)$, 沿 z 轴水平分 3 层, 各层土壤电阻率随层厚 $z_1, z_2 - z_1, \infty$ 变化为 $\rho_{z1}, \rho_{z2}, \rho_{z3}$, 再把 z 轴水平第 1 层在 x 轴竖向分 3 层, 各层土壤电阻率随层厚 $x_1, x_2 - x_1, \infty$ 变化为 $\rho_{x1}, \rho_{x2}, \rho_{x3}$, 最后把 x 轴竖直第 1 层在 y 轴竖向分 3 层, 各层土壤电阻率随层厚 $y_1, y_2 - y_1, \infty$ 变化为 $\rho_{y1}, \rho_{y2}, \rho_{y3}$ 。

假定沿 x 轴和 y 轴土壤不分层, 则有 $\rho_{x1} = \rho_{z1}$, 除点电源 O 处, 其它空间电位 U 都满足式(2):

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = -\frac{1}{\varepsilon_i} \delta^3(x - x_0)(y - y_0)(z - z_0) \quad (2)$$

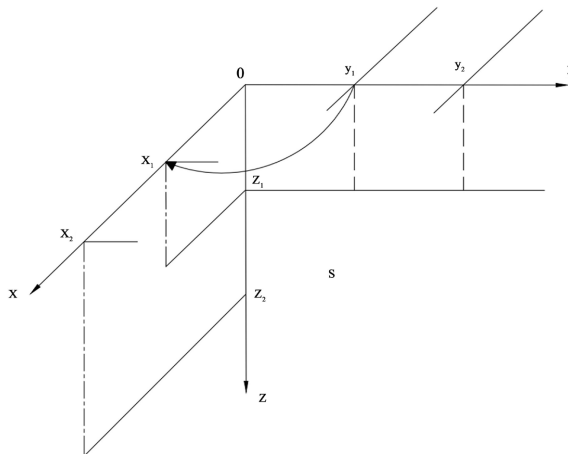


Figure 1. The soil model diagram of three-dimensional composite layered

图 1. 三维复合分层土壤模型图

根据实测实量得到酒泉地区交流变电站土壤电阻率分布情况进行统计,大致为:较湿时为 $100\sim1000\ \Omega\cdot\text{m}$,较干时大于 $1000\ \Omega\cdot\text{m}$,地下水含盐碱时 $30\sim100\ \Omega\cdot\text{m}$,一般地区电阻率均值为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 。经测试当电阻率为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,随着土壤电阻率从 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 增加到 $2000\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,流入变压器的直流电流越大,引起的直流偏磁现象越严重,偏磁电流畸变率从 22.3% 增加到 34.2%。地表电位在土壤电阻率为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 和单极入地电流为 1500 A 时,随着距离从 5 km 到 50 km 地表电位从 44.8 V 到 3.8 V。

计算土壤电阻如式(3)所示:

$$R = \rho L / S \tag{3}$$

式中 ρ 为电阻率, L 为导体长度(利用土壤传输距离), S 电流通过面积(接地极面积,酒泉换流站接地极是由 420 m 和 300 m 同心双圆环型)。

3. 直流偏磁产生及其影响分析

3.1. 交流变压器中性点直流电流流通过程分析

特高压直流输电系统在双极运行故障状态下,会转换成单极大地运行,直流电流将汇流到接地极,利用大地作为回路,在不考虑损耗的情况下,送端和受端流入和流出的电流一致($I_{dc1} = I_{dc2}$),特高压直流输电系统示意图如图 2 所示。

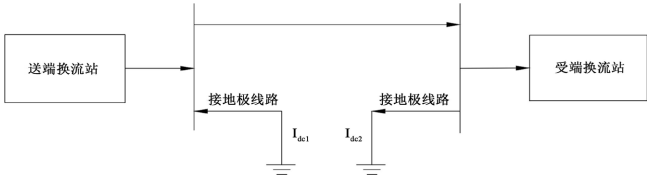


Figure 2. The diagram of UHVDC transmission system
图 2. 特高压直流输电系统示意图

3.2. 直流偏磁产生机理

在直流输电过程中,因单极大地运行或双极不平衡工况下运行时,利用大地作为电流回路,电流通过接地极注入大地,在接地极 100 km 范围内地表电位迅速抬升,从几伏到几百伏,经交流接地网、主变中性点和其交流输电线路等组成的系统网络成了大地电位差直流电流的主要回路,电流直甚至超过了 100 A,对接地极附近的电网运行带来严重影响,尤其是通过磁化曲线的过饱和,使得交流变压器产生发热严重、振动强烈、噪音巨大等危害。其直流产生机理如图 3 所示:

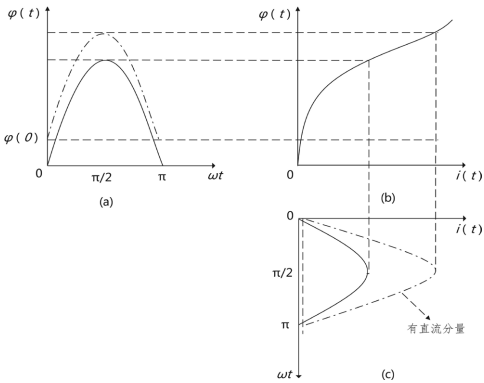


Figure 3. The Mechanism diagram of DC magnetic biasing
图 3. 直流偏磁机理图

甘肃境内以 750 kV 交流电为主网架, 750 kV 变电站的主变压器采用单相三绕组自耦变压器, 其高中压侧通过电场和磁场互联, 因此, 直流分量通过中性点汇入交流系统, 致使交流变压器中的励磁电流得到抬高, 其磁势也迅速增高, 磁化曲线迅速达到过饱和状态, 这样增大了变压器铁损、变压器发声过热、振动和噪音均增大。单项三绕组自耦变压器如图 4 所示。

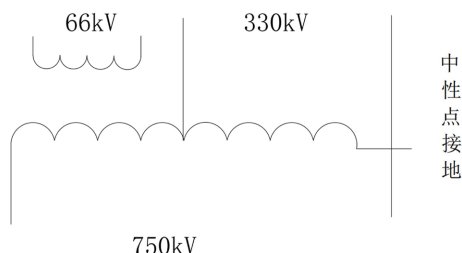


Figure 4. The diagram of single phase auto transformer

图 4. 单相自耦变压器示意图

3.3. 实测直流偏磁对附近交流变压器的影响

为深入研究酒泉 - 湖南 ± 800 kV 特高压直流输电工程在单极运行方式下对酒泉地区交流电网(变压器)的不良影响, 在系统调试阶段选取酒泉地区 110 kV 及以上电压等级的交流系统中 26 台主变压器进行测试。

本次进行的测站分两类, 即: 7 个测试站和 8 个观测站。对 15 个测站 26 台主变进行中性点直流电流、噪声和变压器振动监测, 入地电流 500 A 时的负荷是 200 MW, 入地电流 1000 A 时的负荷是 400 MW, 入地电流 1500 A 时的负荷是 600 MW。主要做法是对观测站进行中性点直流电流监测, 对噪声和变压器振动观察, 表 1 为单极大地运行工况下, 入地电流变化时酒泉地区 110 kV 及以上电压等级的主变压器测点入地电流统计情况表。

Table 1. The Statistics table of ground current at measuring point

表 1. 测点入地电流统计情况表

测试站交流变压器入地 电流(A)	单极运行下入地电流(A)			
	0	500	1000	1500
大于等于 6 A 的主变数量	0	6	10	14
最大入地电流(A)	0	19.1	24.9	38.6

通过上表可知, 在单极大地运行工况下, 入地电流变化过程中, 距离接地极极址最近的某 750 kV 甲变电站主变压器入地电流最大, 图 5~7 所示为距离接地极较近的某甲变电站在注入 1500 A 单极大地运行工况下的主变中性点实测直流偏磁电流, 最大入地电流高达 38.6 A。

根据《750 kV 电气设备交接试验标准》(Q/GDW157-2007)中规定, 各 750 kV 变电站及换流站主变振动值最大值 100 μm , 底部振动最大 30 μm , 平均值不大于 60 μm 。噪声均大于 80 dB 的标准, 某 750 kV 甲变电站测试结果如表 2~4 所示。

考虑到直流分量会严重影响交流变压器和交流电网的稳定运行, 故在测试时注入的最大电流为 1500 A, 通过测试发现, 在单极大地运行工况下, 单极入地电流增大, 交流主变中性点入地电流均呈增大趋势。而酒湖工程设计最大运行电流 5000 A, 如不采取有效的直流偏磁治理, 会严重影响交流电网的安全稳定运行。

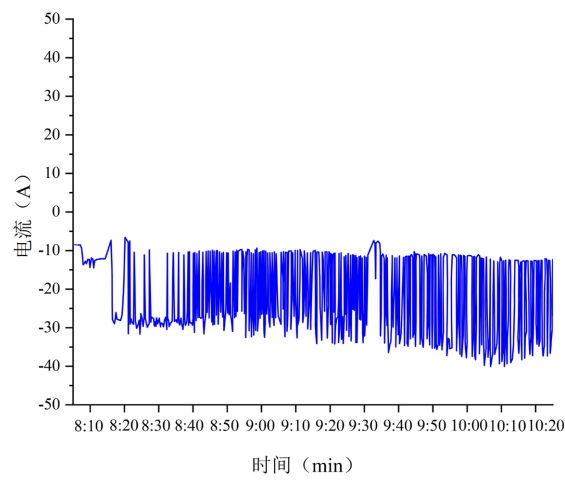


Figure 5. The DC current of 1# transformer
图 5. 1#主变直流电流

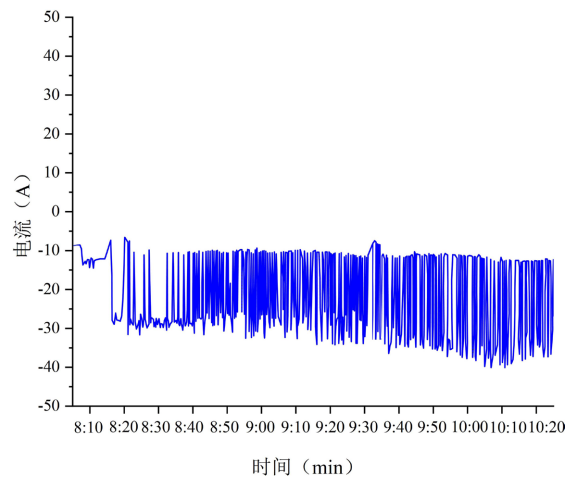


Figure 6. The DC current of 2# transformer
图 6. 2#主变直流电流

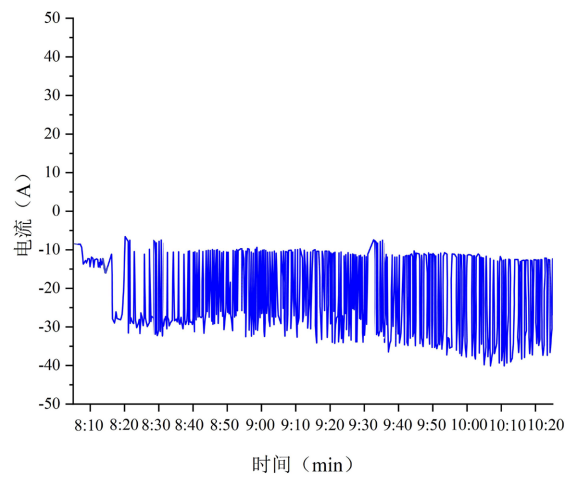


Figure 7. The DC current of 3# transformer
图 7. 3#主变直流电流

Table 2. The vibration noise of 1# transformer**表 2.** 1#变压器振动噪声

测点名称		电流(A)			
		0	500	1000	1500
750 kV 变电站 1# 主变 A 相	振振幅(μm)	2.4~21.7	4.2~26.1	3.4~25.4	3.4~23.8
	噪声(dB)	84.6~92.5	82.2~90.3	80.9~92.9	83.1~91.6
750 kV 变电站 1# 主变 B 相	振振幅(μm)	3.7~20.4	3.1~49.1	3.6~33.3	3.6~16.5
	噪声(dB)	86.6~95.8	86.5~91.6	84.1~91.8	83.6~93.0
750 kV 变电站 1# 主变 C 相	振振幅(μm)	4.2~26.5	5.4~41.3	3.1~33.6	3.9~22.2
	噪声(dB)	88.5~96.4	88.7~97.5	90.3~97.3	91.5~94.5

Table 3. The vibration noise of 2# transformer**表 3.** 2#变压器振动噪声

测点名称		电流(A)			
		0	500	1000	1500
750 kV 变电站 2# 主变 A 相	振振幅(μm)	2.4~20.6	3.1~25.2	3.5~24.4	3.5~17.8
	噪声(dB)	82.8~92.4	81.0~89.1	80.4~92.1	81.3~90.2
750 kV 变电站 2# 主变 B 相	振振幅(μm)	3.3~19.3	4.2~47.4	3.4~29.6	3.7~18.4
	噪声(dB)	83.6~94.6	84.3~90.1	82.1~91.5	82.8~93.3
750 kV 变电站 2# 主变 C 相	振振幅(μm)	3.9~25.8	5.6~39.9	3.3~31.9	3.8~21.1
	噪声(dB)	87.9~95.9	89.6~98.1	89.2~98.3	91.7~95.6

Table 4. The vibration noise of 3# transformer**表 4.** 3#变压器振动噪声

测点名称		电流(A)			
		0	500	1000	1500
750 kV 变电站 3# 主变 A 相	振幅(μm)	2.3~22.7	3.9~25.8	3.3~26.1	3.4~17.5
	噪声(dB)	83.6~91.9	81.7~91.5	81.2~92.9	82.9~92.1
750 kV 变电站 3# 主变 B 相	振幅(μm)	3.2~18.3	3.3~48.4	3.7~32.3	3.7~16.9
	噪声(dB)	83.9~93.9	85.8~90.9	83.9~92.1	82.9~93.0
750 kV 变电站 3# 主变 C 相	振幅(μm)	4.1~25.9	5.3~42.5	3.4~31.5	3.7~19.6
	噪声(dB)	87.7~95.6	89.8~97.3	91.2~96.3	92.0~94.3

4. 直流偏磁治理装置设计与仿真研究

4.1. 直流偏磁装置电路设计

目前国内关于直流偏磁治理方法的研究比较广泛,通过对比分析酒泉 ± 800 kV 换流站周边交流变电站的直流偏磁测试结果,设计的电容型隔直装置系统电路图如图 8 所示,该电路图包含隔直装置和土壤等效阻抗。

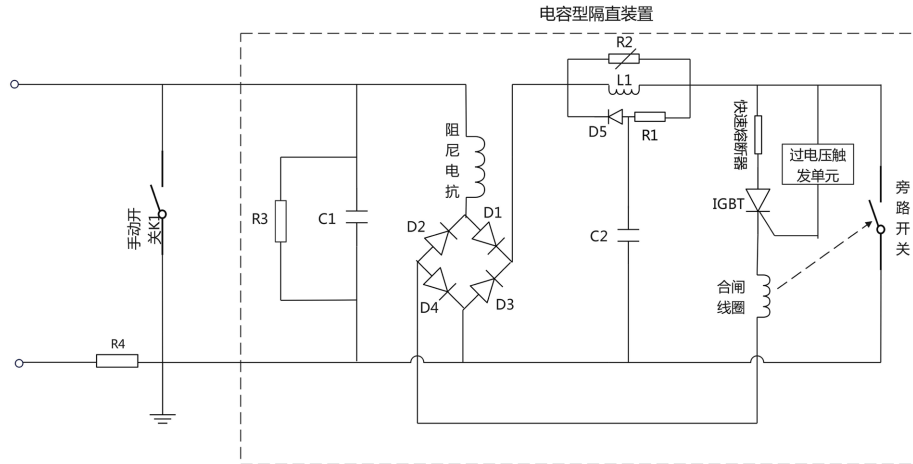


Figure 8. The electrical schematic diagram of capacitance DC bias governance device
图 8. 电容型直流偏磁治理装置电气原理图

该装置主要由串联在中性点和大地之间的隔直电容、晶闸管管组、过流、过压触发单元和恢复装置等构成。为保证隔直装置有效，特设置了过压触发回路和过流触发回路，在任何一个回路动作的情况下均可以触发 IGBT。其简易电路图如图 9 所示：

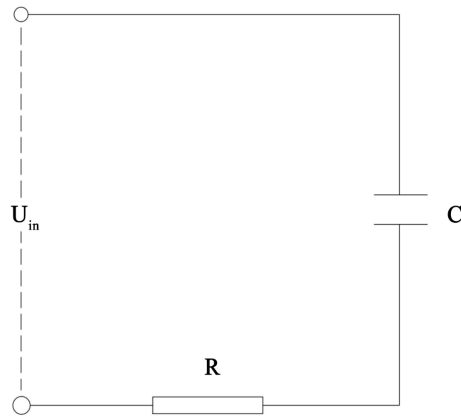


Figure 9. The Simplify the circuit diagram of capacitance DC bias Governance device
图 9. 电容型直流偏磁治理装置简化电路图

隔直容量 C1 约为 3000 μF 。L1 为空芯电抗器主要在电容器放电时起到缓冲作用，其值为 500 μH ，D5 为快恢复二极管，R1 为放电电阻，其值为 0.1 Ω ，R2 为非线性电阻，R3 为均压电阻，R4 为等效大地阻抗，C2 值为 4 μF ，D5 和 R1 主要是在 IGBT 关断后实现续流，确保 IGBT 处于关断状态。

其等效阻抗数学模型如式(3)所示：

$$Z = R + jX = |Z|\arg(\varphi) \quad (3)$$

式中，Z 为阻抗，R 为土壤电阻，C 为隔直电容， φ 为阻抗角， $X = 1/\omega C$ 。

4.2. 仿真分析

在 MATLAB 软件中利用 Simulink 模块中搭建仿真电路图，设 IGBT 的主触发电压为 600 V，使故障

电流在分别在 1 s 时刻由 200 A 的稳态电流突变为 2000 A 的冲击电流和在 1.5 s 时刻恢复为 200 A 的稳态电流时 IGBT 导通状态。故障电流、隔直电容端电压、流过 IGBT 电流和端电压波形如图 10(a)~(d)所示。

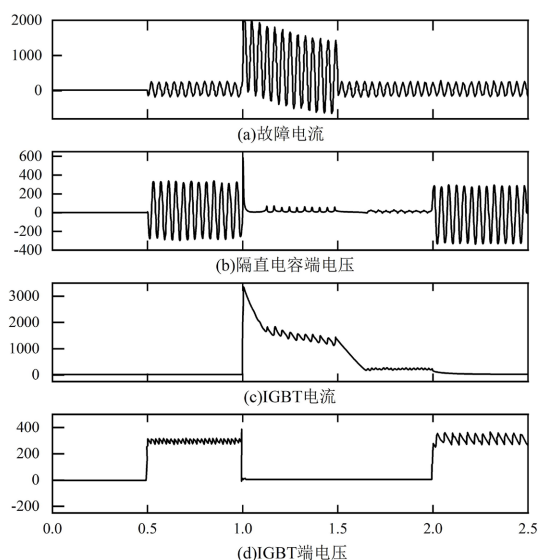


Figure 10. The Simulation result graph

图 10. 仿真结果图

仿真结果显示, 故障电流在 1 s 时主电容电压抬高至 600 V 时, 已达到触发值, 从波形可看出 IGBT 迅速导通, 这时可看到 IGBT 电压为零。在 1.5 s 时故障电流刻恢复至 200 A, 2 s 时 IGBT 电流为零, 电压约 300 V, IGBT 的导通延时结束, IGBT 关断, 主电容又投入到中性点, 整个旁路装置均复位 2.5 s 时, 故障电流为零, 隔直电容端电压为零, IGBT 电流为零, IGBT 端电压呈下降趋势。仿真结果表明, 该隔直装置能够起到对直流分量的约束和控制, 能达到直流偏磁治理效果。

5. 结论

特高压直流输电系统在投入单极大地工况或双极不平衡运行时, 其流入接地极的直流电流会导致接地极附近的交流变压器产生直流偏磁, 给系统稳定运行带来不良影响, 土壤结构影响着地表电位的变化, 地表电位随着与接地极极址距离的增加会逐渐减小, 随着土壤电阻率的增加, 流入交流中性点的直流电流分量越大, 直流偏磁现象就越严重, 偏磁电流畸变率增加约 11.9%。从实测偏磁数据看到, 在单极大地运行时, 距离接地极极址越近的交流电网(变压器、输电线路等)受到的影响最大, 距离越远影响越小。仿真结果显示, 设计的电容型隔直装置, 可有效治理直流偏磁带来的影响。

参考文献

- [1] 郝博可, 赵洪峰, 程宽, 等. 特高压交直流混联输电及稳定运行综述[J]. 东北电力技术, 2019, 40(7): 5-7.
- [2] 姜尚光, 刘健, 于壮状. 大规模新能源接入下特高压交直流混联电网联络线控制策略研究[J]. 中国设备工程, 2019(18): 199-201.
- [3] 刘云. 巴西高压直流输电运行情况及启示[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 32-40.
- [4] 谢莉, 黄韬, 陶莉, 等. 两回 ± 800 kV 特高压直流线路交叉跨越时的地面合成电场计算及设计应用[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 12-17.
- [5] 舒展, 张伟晨, 王光, 等. 特高压直流入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 48(10): 1-10.

- 2019, 47(20): 163-170.
- [6] 张华, 周波, 江珂滕, 等. 光储充电站交直流配电方式能效对比[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1): 84-92.
- [7] 蓝磊, 张韬, 文习山, 等. $\pm 1100\text{kV}$ 输电线路雷电屏蔽特性的模型试验及观测[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 105-113.
- [8] 康鹏, 张兆华, 李志忠, 等. 人工冲击下输电线路杆塔暂态特性测试方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3291-3297.
- [9] 郭蕾, 刘聪, 陈伟, 等. 基于暂态接地电阻建模的输电线路雷击响应研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3001-3009.
- [10] 李继攀, 刘宏领, 郭奇军, 等. 基于功率因数角的接地变压器匝间短路故障辨识[J]. 供用电, 2023, 274(9): 50-57.
- [11] 陈鹏伟, 肖湘宁, 唐松浩, 等. 交直流混合配电网区间潮流等效算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 979-992.
- [12] 杨永明, 刘行谋, 陈涛, 等. 特高压直流输电接地极附近的土壤结构对变压器直流偏磁的影响[J]. 电网技术, 2012, (36)7: 26-32.
- [13] Rezaei-Zare, A., Marti, L., Narang, A., *et al.* (2016) Analysis of Three-Phase Transformer Response due to GIC Using an Advanced Duality-Based Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **31**, 2342-2350.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2505499>
- [14] 李文峰, 杨洪耕, 肖先勇, 等. 土壤模型对地表电位影响及合理选取土壤模型方法研究[J]. 物理学报, 2013(14): 150-157.
- [15] 李雄, 陆家榆, 曹方圆, 等. 考虑非线性极化时不同土壤电阻率下直流接地极电流对油气管道的腐蚀影响分析[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 5021-5028.
- [16] 柴睿, 王磊, 韩肖清, 等. 影考虑换流器功率传输裕度的直流配电网优化重构研究[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 561-572.
- [17] 徐渊, 齐金伟, 薛永端, 等. 中压系统接地故障对低压系统的转移过电压分析[J]. 供用电, 2019, 36(12): 17-21.
- [18] 李冰, 王泽忠, 刘恪, 等. 特高压变压器直流偏磁对绕组电流的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1422-1431.
- [19] 张晓宇, 郑超, 莫品豪, 等. 直流偏磁对变压器保护的影响及变压器偏磁保护改进[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 148-154.
- [20] 黄华, 陈璐, 吴天逸, 等. 城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4524-4533.
- [21] 宣梦真, 王泽忠, 李明洋, 等. 特高压变压器空载直流偏磁指数收敛型并行计算[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2425-2433.
- [22] 李冰, 王泽忠, 刘海波, 等. 直流偏磁下 500kV 单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 2801-281.
- [23] 戎子睿, 马书民, 林湘宁, 等. 一种多接地极主动互联及隔直装置协同的直流偏磁治理策略[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3453-3462.
- [24] 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]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
- [25] 李星成, 鞠善忠, 郑太英. 基于粒子群算法的变压器直流偏磁隔直装置安装策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 13-21.
- [26] 伍国兴, 陈龙, 史云涛, 等. 深圳变电站 500kV 主变压器直流偏磁现象测试及抑制分析[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 118-124.
- [27] 潘峰, 孙晨宇, 王燕, 等. 基于多场耦合的变压器偏磁振动建模与仿真分析[J]. 供用电, 2021, 244(3): 66-71.
- [28] 王泽忠, 李明洋, 宣梦真, 等. 单相四柱式变压器直流偏磁下的温升试验及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1006-1013.