

# 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地的过电压与绝缘配合分析

傅 中<sup>1</sup>, 王刘芳<sup>1</sup>, 王庆军<sup>1</sup>, 章海斌<sup>2</sup>, 朱胜龙<sup>1</sup>

(1. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 安徽省电力公司超高压公司, 安徽 合肥 232022)

**摘要:** 为研究 500 kV 自耦变压器中性点由直接接地改成经小电抗接地后其各种过电压水平变化情况, 笔者利用 ATP-EMTP 电磁暂态程序对主变中性点和端部过电压进行详细计算, 对变压器中性点接小电抗后的各种过电压水平进行了分析并确定其过电压的保护方式、绝缘配合, 得出安徽省 500 kV 肥西变主变中性点经 5  $\Omega$  电抗器接地后, 加上氧化锌避雷器保护, 可维持原绝缘水平不变的结论, 对解决肥西变 500 kV 电网中单相接地短路电流超过开关额定遮断电流的问题具有重要意义。

**关键词:** 500 kV 自耦式变压器; 中性点; 小电抗; 过电压; 绝缘配合

中图分类号: TM403.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0126-03

## Overvoltage and Insulation Coordination of 500 kV Autotransformer Neutral Grounding through Small Reactance

FU Zhong<sup>1</sup>, WANG Liu-fang<sup>1</sup>, WANG Qing-jun<sup>1</sup>, ZHANG Hai-bin<sup>2</sup>, ZHU Sheng-long<sup>1</sup>

(1. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China;

2. Anhui Province Ultra High Voltage Power Company, Hefei 232022, China)

**Abstract:** To understand overvoltage change at a 500 kV autotransformer neutral when the neutral is grounded from directly to through a small reactance, the overvoltage at autotransformer's neutral and entrance is calculated respectively by ATP-EMTP, and the overvoltage for adopting small reactance grounding is analyzed to determine overvoltage protection and insulation coordination. It is concluded that the insulation level of the autotransformer in 500 kV Feixi substation can keep stable after its neutral is grounded through a 5  $\Omega$  reactance under protection of MOA. This conclusion will contribute to the solution to the problem that single phase short-circuit current exceeds the switch rate breaking current in the Feixi 500 kV grid.

**Key words:** 500 kV autotransformer; neutral; small reactance; overvoltage; insulation coordination

## 0 引言

随着电网超高压系统的扩大, 系统容量不断增加, 单相接地短路电流亦不断地增加, 从而在系统内可能出现单相接地短路电流超过开关额定遮断容量的情况, 进而引起开关在开断单相接地故障电流时发生事故。要避免这种情况的发生, 从改变中性点接地方式出发, 限制单相接地短路电流是一种有效的解决方法。该方法的实施, 不受电网发展的限制, 具有推广性, 又可避免开关的再开发和大量更换的繁杂工作。国内武汉高压研究院、华北电网等几家单位进行过该方法的研究并使用在工程中, 取得了良好的社会效益和经济效益<sup>[1]</sup>。安徽省 500 kV 肥西变采取此种方法, 有效解决了单相接地短路电流超过开关的额定遮断容量的问题。笔者就中性点加小电抗

后对变压器中性点的雷电侵入波过电压、操作过电压、非全相运行过电压等进行了计算和分析, 并确定了过电压的保护方式和绝缘水平。

## 1 雷电下 500 kV 自耦变模型的建立

要分析雷电对变压器的影响, 其关键问题是确定变压器绕组的暂态电路模型以及该模型中各个元件的参数值。笔者分析自耦变中性点暂态电压分布所用的模型是以线饼为单元的等值回路模型<sup>[1]</sup>, 使用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真程序进行计算。

图 1 是以线饼为单元的 500 kV 自耦变压器等值回路模型, 变压器容量为 720 MV·A。

为了改善大型变压器绕组的初始电位分布,  $\alpha l$  一般取值较小, 500 kV 自耦变  $\alpha l$  值为 2.5~7.5, 计算时分别取值为 2.5、5、7.5,  $\alpha l = \sqrt{\frac{C_0 l}{K_0 l}}$ ,  $C_0$  为绕组

收稿日期: 2008-09-09; 修回日期: 2008-11-28

作者简介: 傅 中(1977), 男, 研究生, 工程师, 从事电力系统输电线路过电压、电磁场等方面的研究。

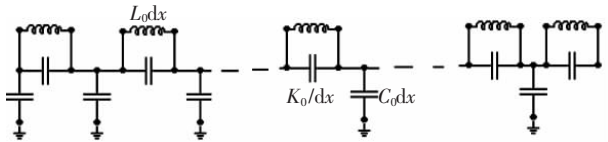


图1 自耦变压器等值回路模型

单位长度的对地等值电容,  $K_0$  为绕组单位长度的纵向电容,  $l$  为绕组高度,  $\alpha$  为空间因素, 计算出模型中的线饼等效电容及电感。

## 2 变压器中性点雷电过电压

在雷电波的作用下, 变压器与工频下有所不同, 其内部波过程非常复杂, 雷电波作用到中性点已发生明显变化。一般情况下, 雷电侵入波总能量有限, 变电站网络越大, 设备越多, 网络总的容量就越多, 设备上过电压就越低。单线单变情况下过电压最大。变电站 500 kV 线路 MOA 额定电压为 444 kV, 220 kV 线路 MOA 额定电压为 200 kV, 雷电流波按规程取标准波形, 根据计算, 500 kV 侧侵入波取绕击 22 kA, 220 kV 侧侵入波取绕击 12 kA。计算结果见表 1, 图 2~4 为  $\alpha l$  不同取值时中性点波形图。

表1 肥西变中性点经 5  $\Omega$  小电抗接地后中性点雷电过电压水平(中性点未装避雷器)

侵入波方式	中性点雷电过电压水平/kV		
	$\alpha l=2.5$	$\alpha l=5$	$\alpha l=7.5$
500 kV 侧侵入	190.2	30.3	22.4
220 kV 侧侵入	368.0	221.5	107.5

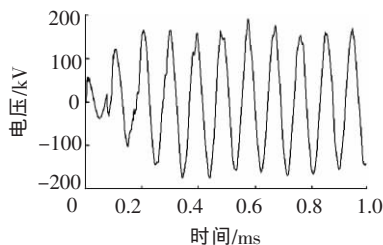


图2  $\alpha l=2.5$  时 500 kV 侧侵入波中性点波形

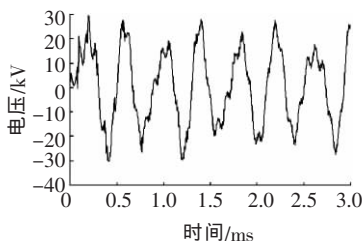


图3  $\alpha l=5$  时 500 kV 侧侵入波中性点波形

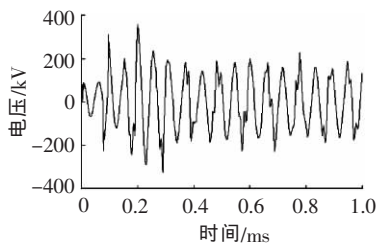


图4  $\alpha l=7.5$  时 220 kV 侧侵入波中性点波形

可以看出雷电侵入后传至自耦变中性点波头已被延缓, 这与文[2,3]中的结论一致。

## 3 绕组端部电压水平

加装 5  $\Omega$  小电抗前、后侵入波绕组端部电压见表 2、3。表 2、3 数据说明: 绕组端部的雷电侵入波过电压, 在中性点加装小电抗前后变化不大, 由于线路和主变的避雷器保护, 主变绕组端部绝缘不会受到威胁。

表2 加装 5  $\Omega$  小电抗前侵入波绕组端部电压 kV

	$\alpha l=2.5$	$\alpha l=5$	$\alpha l=7.5$
	500 kV 绕组端部电压	984.5	982.2
220 kV 绕组端部电压	494.7	493.5	493.9

表3 加装 5  $\Omega$  小电抗后侵入波绕组端部电压 kV

	$\alpha l=2.5$	$\alpha l=5$	$\alpha l=7.5$
	500 kV 绕组端部电压	983.3	983.4
220 kV 绕组端部电压	485.3	492.5	493.8

## 4 其他过电压水平

单相接地短路等故障情况下在自耦变中性点会产生暂时过电压, 其可分为暂态和稳态两部分。根据暂态部分波形波头分析, 其实是操作波波形, 其稳态部分属于工频过电压<sup>[3]</sup>。表 4 列出了单相重合闸和非全相运行过电压, 表 5 为不同电抗值时工频过电压。

表4 单相重合闸及非全相运行过电压 kV

	经 5 $\Omega$ 小电抗接地		备注
	500 kV 侧	220 kV 侧	
单相重合闸	-	94.3	重合时故障已消失, 考虑 60%残压
非全相运行	3.5	7.6	

表5 不同电抗值时工频过电压 kV

	中性点电抗值/ $\Omega$		
	5	10	15
暂态部分电压	41.0	61.0	73.6
稳态部分电压	33.1	50.4	61.2

操作过电压与线路长度、电源容量、合闸时电源的相位角以及线路残余电压的极性和大小有关。在其他参数一定时, 过电压幅值将随线路的增长而明显增大。系统电源容量愈小, 等值漏抗愈大, 线路电容效应越显著, 稳态电压和过电压幅值会急剧上升。因此确定最大可能的合闸过电压应以系统最小运行方式(电源容量最小)为依据<sup>[4,5]</sup>。

## 5 中性点的保护方式及避雷器选择

肥西 3、4 号主变中性点未装小电抗时的绝缘水

平按 35 kV 等级设计,其 1 min 短时工频耐压 85 kV,雷电冲击试验电压 200 kV(BIL)。由以上分析可知,中性点最大雷电过电压已达 368 kV,在中性点绝缘水平不变的情况下需加装避雷器保护。

避雷器选择有如下原则:MOA 标称电流下的残压  $U_r$  需小于  $BIL/K$ ,BIL 表示中性点基本雷电冲击水平,对 BIL 雷电配合系数  $K$  取 1.4;BSL 表示中性点基本操作冲击水平,对 BSL 操作配合系数  $K$  取 1.15; $U_r$  表示所选避雷器在标称电流下的残压<sup>[6]</sup>。

所选避雷器需符合如下标准:  $U_{r,ls} \leq BIL/1.4 = 200/1.4 = 142.86$  kV; 变压器中性点  $BSL = 0.83BIL = 166$  kV,  $U_{r,ss} \leq BSL/1.15 = 166/1.15 = 144.34$  kV; 考虑变压器中性点加 5  $\Omega$  小电抗时的最高工频过电压稳态值为 33.1 kV,暂态值为 41 kV; 避雷器的参数选择。避雷器额定电压应高于其在安装处可能出现的工频暂态电压。根据计算可选择额定电压为 51 kV、标称放电电流为 5 kA 等级的避雷器,为在 5 kA 标称放电电流下,其雷电冲击电流残压为 134 kV,操作冲击电流残压为 114 kV。其符合中性点绝缘水平的要求。变压器中性点受雷电侵入最大时加避雷器前后电压见表 6。中性点避雷器在最大 368 kV 的过电压水平下流过的最大电流为 1.14 kA,见图 5,且持续时间极短,比能量为 0.049 kJ/kV,避雷器耐受能力足够。

表 6 变压器中性点受雷电侵入最大时  
加避雷器前后电压 kV

侵入波方式	中性点加避雷器前过电压	中性点加避雷器后过电压
500 kV 侧入侵	190	95
220 kV 侧入侵	368	99

## 6 结论

(1)为解决肥西变 500 kV 电网中单相接地短路

(上接第 114 页)

- [23] HATFIELD L L,BOERWINKLE E R,LEIKER G R,et al. Methods of Increasing the Surface Flashover Potential in Vacuum [J].IEEE Transactions on Electrical Insulation,1989,24(6):985-990.
- [24] ENGEL T G,DICKENS J C,KRISTIANSEN M.Insulator and Electrode Mass Erosion and Surface Voltage Holdoff Recovery for Transient, High Current Surface Discharges [J].IEEE Transactions on Magnetics,1993,29(1):1 143-1 147.
- [25] PARKER J V.Why Plasma Armature Railguns Don't Work (and What Can be Done about It)[J].IEEE Transactions on Magnetics,1989,25(1):418-424.
- [26] 谢建民,邱毓昌,姜唯,等.半导体碳化硅在伪火花开关中的应用[J].高电压技术,2002,28(8):26-28.
- [27] GORTLER A,FRANK K,INSAM S,et al.The Plasma in

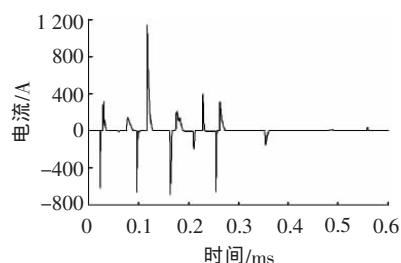


图 5 中性点避雷器电流波形

电流超过开关额定遮断电流的问题提供了合适的方式和理论依据,对解决 500 kV 电网中单相接地短路电流超标问题具有重要的意义。

(2)肥西变 500 kV 自耦变压器的中性点经 5  $\Omega$  小电抗接地,中性点最大雷电过电压已达 368 kV,在中性点绝缘水平不变的情况下需加装避雷器保护。

(3)雷电侵入时,由于线路避雷器和母线避雷器对过电压的限制,到达主变已减弱,安装氧化锌避雷器可保护变压器中性点绝缘,且雷电从 220 kV 侧线路侵入要比 500 kV 侧线路侵入对主变中性点更具威胁。

(4)肥西变 500 kV 自耦变压器的中性点经 5  $\Omega$  小电抗接地,加上额定电压 51 kV 氧化锌避雷器的保护,其绝缘水平仍可以维持原 35 kV 等级。

## 参考文献:

- [1] 周泽存,沈其工,方瑜,等.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,1988.
- [2] 舒廉甫.500 kV 变压器中性点接地方式成果应用推广[J].高电压技术,1993,19(4):45-48.
- [3] 沈扬,丁健.500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地系统的过电压与绝缘配合[J].电气应用,2005,24(5):24-27.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [5] 平绍勋.电力系统内部过电压保护[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 王天君.500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的过电压研究[J].华北电力技术,2000(9):1-3.

High-current Pseudospark Switches [J].IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(1):51-52.

- [28] URBAN J,ARSOV V,BICKES C,et al.Spectroscopic Investigations in the Dense Discharge Plasma of Pseudospark Switches [C]//Conference Record of the 1998 Twenty-third International Power Modulator Symposium,1998:217-220.
- [29] 孙承纬.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002
- [30] 陆建,倪晓武,贺安之.激光与材料相互作用物理学[M].北京:机械工业出版社,1991
- [31] 严萍,王珏,张适昌.新型介质壁加速器[J].电工电能新技术,2005,24(4):43-46.
- [32] CAPORASO G J.Progress in Induction Linacs[C]//International Linac Conference,1999:658-662.