

# 地震中变电站电气设备损坏原因分析及仿真

魏 星<sup>1</sup>, 李根富<sup>1</sup>, 王亚莉<sup>1</sup>, 卢智成<sup>2</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘 要:**调研了汶川地震与雅安地震中变电站电气设备的受损情况, 总结出套管或瓷瓶受损及电气设备较为细长是设备损坏的主要原因, 并针对提出利用复合绝缘套管及加装隔减震装置是提高电气设备抗震能力的有效措施。调研分析了国内科研机构在抗震理论方面的研究成果, 总结了国内科研机构在抗震理论、抗震应用及软件开发有较为深入研究的结论, 并指出现有抗震规范的不足。通过比较 GIS 套管仿真计算结果与试验结果的差别, 得出利用软件计算设备的抗震性需要对模型进行更加深入的研究的结论。

**关键词:**受损情况; 复合绝缘; 抗震理论; 模型

**中图分类号:** TM411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-044-04

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分, 四川省汶川县发生里氏 8.0 级地震, 据有关部门初步统计, 地震给国家电网带来的直接经济损失超过 120 亿元, 此次地震给国家电网造成 110 kV 及以上主变压器受损 88 台, 断路器(含 GIS)受损 43 台(组), 隔离开关损毁 39 组, 母线损毁 9 段, 电流互感器损毁 64 台, 电压互感器损毁 13 台, 避雷器损毁 21 支。2013 年 4 月 20 日 8 时 02 分, 四川省芦山县发生 7.0 级地震, 成都、重庆及陕西的宝鸡、汉中、安康等地均有较强震感。此次地震造成上百人死亡, 上万人受伤, 200 多万人受灾, 同样也给国家电网造成不同程度的损失。据不完全统计, 雅安地震共造成 34 座 35 kV 及以上变电站停运。地震已成为造成电网大面积停电, 影响电网安全稳定运行的重要原因。

为了尽可能搞清楚变电站电气设备损坏的具体情况, 分析变电站电气设备损坏的原因, 为电网防震减灾及变电站抗震设计提供第一手资料, 笔者调查了四川省电力公司、中国电科院及四川电科院等电力生产及科研相关单位, 掌握了第一手资料, 对获得的资料进行整理、分析及对易损设备进行有限元分析和振动台试验, 分析设备的易损特性, 找出变电站电气设备的易损部位, 寻找变电站电气设备的抗震方法。

## 1 电力设施受损情况

### 1.1 变压器受损情况

综合汶川地震与雅安地震中的变压器损坏情况, 变电站变压器损坏的主要现象为变压器本体移位与套管破损, 以及本体散热器变形, 固定螺栓震断等现象。汶川地震中安县 200 kV 变电站、辕门坝 110 kV 变电站和新市 220 kV 变电站 35 kV 及以上电压等级主变的损坏情况如表 1 所示。

表 1 主变压损坏情况

损坏位置	数量
主变脱轨(处)	8
套管损坏(处)	59
其他(处)	46
总计(处)	113

雅安地震中总共有 6 个变电站的 10 台主变受损, 其中典型的有响水滩变电站主变基础发生垮塌, 主变本体发生倾斜(图 1), 其余变压器受损的主要现象是变压器套管破裂、受损及漏油等情况。

变压器本体倾斜在两次地震中发生的主要原因是主变在基础上浮放, 通过在主变与基础之间加装

固定螺栓,可以较好地解决变压器本体倾斜脱轨的情况。从两次地震中变压器受损的情况来看,变压器本体套管破损是变压器受损的主要原因。



图1 响水滩变电站主变基础垮塌、主变倾斜

## 1.2 开关设备受损情况

变电站开关类设备主要包括断路器、隔离开关等设备。在汶川地震与雅安地震中,开关类设备受损的主要现象为支持瓷瓶断裂或受损。

### 1.2.1 断路器

断路器由于顶部质量较大,形成“上大下小”的结构,这种结构更加容易放大地震的破坏作用,直接导致下部连接瓷瓶破损或断裂(图2)。



图2 110 kV 金花变电站断路器断裂

### 1.2.2 隔离开关

从两次调研获得的数据来看,隔离开关由于比较高耸,在地震中受到振动后本体极容易发生变形,并且底部瓷瓶也极容易发生断裂,使得隔离开关完全失去运行能力(图3)。

## 1.3 细长型瓷柱类设备

电流互感器、电压互感器及避雷器受损情况与断路器受损情况相似,都是由于瓷质绝缘套管损坏,而出现漏油的情况。一般高耸设备由于绝缘套管为瓷质,而陶瓷具有极容易破碎的特性,脆性大,在地震中由于受到横摇的影响,在套管与根部的连接处极容易发生断裂、破损等情况,而使设备失去运行能力(图4)。典型受损情况与断路器受损情况相似。

综上,从汶川地震与雅安地震中变电站电气设



图3 220 kV 草坝变电站母联 2121 隔离开关 C 相断裂



图4 220 kV 溪黄线 265 避雷器断裂

备受损的原因综合分析,变电站电气设备受损的主要原因可以归纳为:

1) 套管或瓷瓶受损是变电站电气设备受损的主要原因,因为陶瓷的易脆性,导致电气设备容易在地震中受到破坏。

2) 电气设备的结构,变电站电气设备一般较为细长,且像断路器“上大下小”的结构型式,更加容易放大地震的破坏作用。

## 2 变电站电气设备抗震措施

针对变电站电气设备的受损情况及原因,有针对性地地进行设备选型及抗震设计,可以有效地减小地震对变电站电气设备的破坏作用。可选用复合绝缘类型的套管或绝缘子代替传统瓷质套管或绝缘子,并对支柱类高耸设备进行隔震设计,可以减小变电站设备的受损。

绝缘材料按照所使用的外绝缘材料的不同可以近似分为瓷质绝缘子与非陶瓷绝缘子两大类。瓷质材料的绝缘性能和材质稳定性得到了长期运行的验证,作为绝缘子材料具有稳定性好、机械强度高、生产成本低等特点。但随着陶瓷材料在电力工业上的应用,近年来也爆发出一系列问题,比如脆性大、重量大、空心失效、抗污性能差。相对于传统绝缘材料,复合绝缘材料制造的绝缘子或套管,具有强度高、抗震性能好的优点,通过可靠设计,抗弯性能可达到瓷绝缘子的9倍以上。表2给出了复合材料与

瓷管体材料的抗震性能对比。

表 2 复合材料与瓷管体材料抗震性能对比

对比项目	抗弯强度/MPa	阻尼比/%
瓷管体材料	80	3
复合材料(FRP)	160—750	6

笔者调研了江苏神马生产的复合型绝缘套管、支柱绝缘子等产品,包括变压器套管、GIS/HGIS 套管、电流互感器(SF<sub>6</sub>)、电流互感器(油)、避雷器等产品(表 3)。

表 3 变电站复合绝缘设备性能

序号	调研项目	性能数据		
		变压器、 高抗套管	电流互感 器(SF <sub>6</sub> )	避雷器
1	生产厂家	传奇	精科	ABB 金冠
2	电压等级/kV	110	110	110
3	设备高度/mm	1 570	2 280	1 300
4	设备重量/kg	92	400	180
5	设计抗震能力/g	1	0.7	
6	产品抗震设计计算/g	1	0.7	0.9

按照《电力设施抗震设计规范》(GB50260—2013)的规定,当抗震设防烈度为 9 度时,其设计基本地震加速度为 0.4 g,从表 3 可以看出,复合绝缘设备的抗震性能都大于 0.4 g 的要求,抗震性能很好,使用复合绝缘材质的套管或绝缘子代替传统的瓷质套管或绝缘子,可以有效提高变电站电气设备的抗震性能。

基础或支架加装隔震减震装置,通过在变压器、GIS 基础等部位加装基础隔震减震装置,通过减震装置消耗掉一部分能量或通过隔震装置阻尼能量的传播,变传统的硬抗为柔抗,提高设备的抗震性能,减小地震对上部设备的影响。

### 3 国内抗震研究成果

国内变电站电气设备抗震研究涉及较多的科研机构包括中国电科院、同济大学、中国地震灾害防御中心、郑州机械研究所等科研机构。中国电科院在中国地震灾害分区图、电气设施抗震可靠度研究方面,进行了较为详细的研究;同济大学谢强教授在变电站软母线连接电气设备的抗震计算理论模型以

及数值分析等理论研究方面进行了较为详细的理论推导与计算研究;中国地震灾害防御中心则在合成满足标准谱的电气设备抗震试验输入地震动等方面进行了开拓性的研究;郑州机械研究所则开发了抗震分析软件 DSASP,用于变电站电气设备的抗震分析计算。国内的抗震研究成果,涵盖了抗震理论、抗震应用及软件开发等方面,在抗震研究方面进行了较为深入的研究,为电气设备抗震产品的研发、设计做了充足的理论准备。

在抗震规范研究方面,用《电力设施抗震设计规范》(GB50260—2013)代替了原《电力设施抗震设计规范》(GB50260—1996),新增了 750 kV 变电站抗震的要求。从汶川地震中电气设备受损情况来看,有很重要的一个原因是汶川地区电气设备的设防烈度为 7 度,而汶川地震的烈度达到 11 度,远超过汶川地区变电站设备的抗震设防水平,《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)已经不能满足当前电力设施抗震的要求。

### 4 抗震性能计算结果与试验结果比较

为了验证复合绝缘套管的抗震性能,文中选取了一个 220 kV GIS 套管,将其做振动台试验,并与有限元分析结果进行比较。

220 kV GIS 复合材料设备高度为 2.84 m,质量为 234 kg,弹性模量为  $1.3 \times 10^{10}$  Pa。支架为  $\phi 237 \times 6.5$  mm 钢管,高度为 2.4 m,设备与支架通过螺栓连接。设备试验布置现场如图 5 所示。

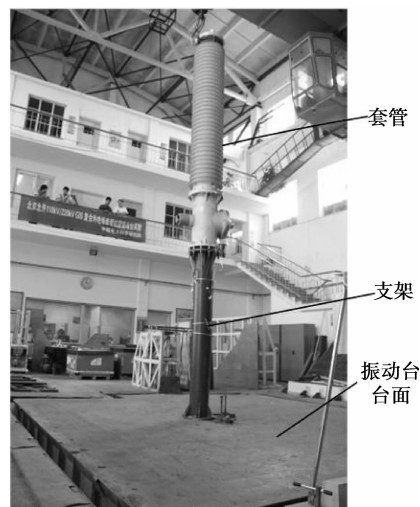


图 5 安装于振动台的 220 kV GIS 复合材料套管

#### 4.1 试验输入

抗震试验输入选用标准时程波。典型标准时程波如图 6 所示,激励加速度峰值 0.4 g。

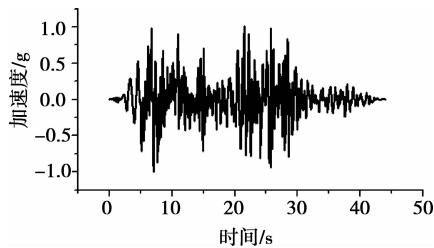


图6 标准时程波

#### 4.2 试验与计算对比

利用 ANSYS 有限元分析软件对设备进行分  
析,并建立其有限元数值模型(图 7),利用 ANSYS  
软件分析计算设备的最大应力,并与震振动台试验  
结果进行对比,有限元分析计算的结果与震动台试  
验的结果如表 4 所示。

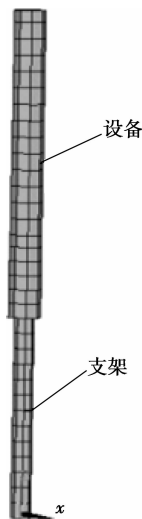


图7 设备数值模型

表 4 计算与试验结果对比

输入加速 度峰值/g	试验套管最 大应力/MPa	计算套管最大 应力/MPa	计算与试验 结果的比值
0.4	5.19	4.71	0.91

通过对比发现,仿真计算的结果与试验结果相  
比,计算结果偏保守。利用仿真基本上可以获得与  
振动台试验相近的结果,但是对于利用软件计算设  
备的抗震性能还有待研究,需要研究设备的建模问  
题,以便更加精确地模拟设备的抗震性能。

## 5 结 论

介绍了调研的汶川地震与雅安地震中电气设备  
受损的主要情况,总结了已有的电气设备抗震措施,

并将电气设备抗震验算的计算方法与实验方法结果  
进行了对比。对于变电站电气设备抗震还需要从 4  
方面进行具体研究。

1)2013 年,国家颁布了《电力设施抗震设计规  
范》(GB50260—2013)取代原《电力设施抗震设计规  
范》(GB50260—1996),但是对于最新《中国地震动  
参数区划图》的颁布还没有结果,按照《中国地震动  
参数区划图》(GB18306—2001)的要求,汶川地震的  
设防烈度为 7 度,对应的地震加速度值为 0.1 g,根  
本不适应汶川地区的设备抗震设防的情况,导致电  
气设备在进行抗震设计验算时缺乏依据。

2)1 000 kV 特高压变电站抗震研究,现有《电力  
设施抗震设计规范》(GB50260—2013)规定的最高  
交流电压等级为 750 kV 变电站,对于 1 000 kV 变  
电站的抗震还未包括,没有针对其特殊情况及重要  
输电通道特性进行抗震相应的抗震要求。

3)变电站抗震性能监测与数据分析研究。通过  
实时监测变电站设备的抗震数据,通过数据分析变  
电站设备的抗震性能及健康状态。在水电站大坝、  
高层建筑物上已有地震监测相关成熟技术的应用,  
有必要监测地震中电气设备的运行情况,为改进设  
备抗震性能提供可靠数据,并利用地震中设备的动  
态响应数据,进行电气设备的地震后健康状态评估。

4)复杂地质条件下的变电站抗震措施有必要进  
行研究,在中国西部水电丰富地区,由于地质条件相  
对复杂,对于水电送出通道的枢纽变电站,其运行直  
接关系到地区甚至整个电网的安全稳定。研究复杂  
地质条件的变电站的总平面布置,设备基础形式,提  
高复杂地质条件下变电站的总体抗震性能成为一个  
必须面对的问题。

#### 参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 四川汶川大地震电力设施受灾  
情况初步调研报告[R]. 北京:中国电力科学研究  
院,2008.
- [2] 于永清,李光范,李鹏,等. 四川电网汶川地震电力设施  
受灾情况调研分析[J]. 电网技术,2008,32(11):1-6.
- [3] 中华人民共和国国家标准. 中国地震动参数区划图  
GB18306—2001[S]. 北京:中国标准出版社.
- [4] 中华人民共和国国家标准. 电力设施抗震设计  
GB150260—1996[S]. 北京:中国标准出版社.
- [5] 中华人民共和国国家标准. 电力设施抗震设计  
GB150260—2013[S]. 北京:中国标准出版社.

# 主变中性点小电抗限制短路电流技术方案 在南天 500 kV 变电站扩建中的应用

徐文婷, 姜彦西

(四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610016)

**摘要:**针对南天变 220 kV 侧单相短路电流超出设备遮断能力, 通过研究限制单相短路电流的方法, 从经济性、工程改造可实施性, 提出在主变中性点加装小电抗的方式以限制单相短路电流。经计算, 南天变中性点经小电抗接地后, 小电抗改变高中低三侧绕组的零序电阻, 能够限制 220 kV 侧的单相短路电流。

**关键词:**自耦变; 中性点电抗器; 单相短路电流

**中图分类号:** TM411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-048-03

国内已建的 500 kV 变电站大多采用自耦变压器。随着电力系统的发展以及负荷增加, 部分变电站出现单相短路电流增加, 甚至有超过设备额定开断容量的情况<sup>[1]</sup>。

根据“十二五”特高压电网规划, 为满足四川水电更大规模的通过交流通道外送要求, 将在乐山建设一座特高压变电站, 形成雅安—乐山—重庆 1 000 kV 交流特高压输电通道, 输送乐眉地区和川西南凉山州地区丰水期的富余水电。近年来, 乐、眉电网规模迅速发展, 该地区已有南天、东坡、嘉州、沐溪 4 个 500 kV 变电站, 2015 年乐眉地区 220 kV 及以上电网短路电流分析情况见表 1 所示。

其中, 南天 500 kV 变电站 220 kV 侧单相接地短路电流超过设备遮断容量, 必须采取措施加以限制, 否则将影响电网运行及发展。

笔者通过研究限制单相短路电流的方法, 从经济性、工程改造可实施性, 并结合工程实例, 提出通过在主变中性点加装小电抗以限制南天 500 kV 变电站的单相短路电流的方法。

## 1 中性点经小电抗接地对短路电流的限制作用

### 1.1 限制短路电流的措施

从电网结构上可以采取的限流措施:

1) 在电力系统的主网加强联系后, 将次级电网解环运行;

2) 增大系统的零序阻抗;

3) 加大变压器的阻抗, 或将自耦变压器改为普通三绕组变压器, 但一般不宜采取此类措施。

从变电站中可以采取的限流措施:

1) 变压器分列运行;

2) 在主变中性点加中性点电抗器;

3) 母线分裂运行。

南天变为运行中的变电站, 更换主变经济代价太大, 故不考虑。

母线分裂运行和 220 kV 电网解环, 虽然能有效降低短路电流, 但同时也大大限制了电网运行方式, 降低了安全可靠。

表 1 地区电网短路电流分析表

站名	母线	三相短路 电流/kA	单相短路 电流/kA
南天	高压	50.9	38.4
南天	中压	48.5	50.6
东坡	高压	54.5	43.0
东坡	中压	40.6	43.1
嘉州	高压	49.0	34.9
嘉州	中压	39.6	41.1
沐溪	高压	41.5	30.0
沐溪	中压	21.6	22.9

收稿日期: 2014-10-10

作者简介: 徐文婷(1985-), 女, 工程师, 主要从事变电站一次设计工作。

在 500 kV 自耦变中性点装设小电抗接地,可有效降低 220 kV 侧单相接地短路电流。小电抗体积小,扩建场地所需占地面积少,经济性好,可实施性好。

### 1.2 自耦变经小电抗接地原理

自耦变压器的高中绕组不仅有磁场的联系还有电的联系,高中侧绕组共用一个中性点,流入中性点的零序电流应该等于高压侧零序电流与中压侧零序电流的差值,中性点的电位不仅与高压侧有关还与中压侧有关。

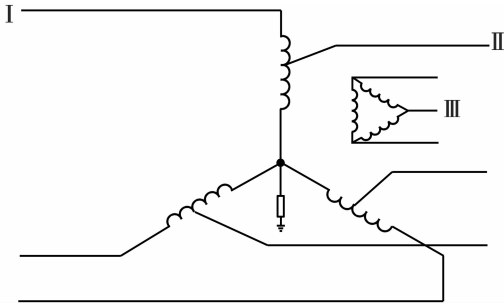


图 1

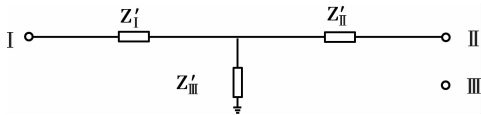


图 2

$$\begin{aligned} Z_I' &= jX_I + 3Z_N(1-K), \\ Z_{II}' &= jX_{II} + 3Z_N K(1-K), \\ Z_{III}' &= jX_{III} + 3Z_N K, \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $X_I$ 、 $X_{II}$ 、 $X_{III}$  为自耦变压器正序电抗,  $Z_N$  为中性点外接阻抗,  $K$  为高中压变比,  $K = \frac{U_1}{U_2}$ 。

由式(1)可知,自耦变中性点经小抗接地后,小抗产生的附加阻抗增大了各零序阻抗,由此限制了单相短路电流。

## 2 中性点电抗限制单相短路电流研究

### 2.1 南天 500 kV 变电站概况

南天变目前有两台自耦变,主变中性点采用直接接地方式。主变参数如下:额定容量  $3 \times (250/250/80)$  MVA;额定电压 525/230/36 kV;短路阻抗高-中阻抗 12%,中-低阻抗 44%,高-低阻抗 29%;联结组别 YNa0d11;中性点绝缘水平 325/140 kV。

### 2.2 中性点电抗器阻值选择

安装不同容量的小电抗对单相短路电流的影

响。南天变单相短路电流计算结果见表 2 所示。

表 2 南天变中压侧单相短路电流分析表

中性点电抗阻值/ $\Omega$	中压单相短路电流/kA
0	50.6
10	47.6
14	47.3
15	47.2
16	47.2

经计算,安装主变中性点电抗前,南天变中压侧单相短路电流为 50.6 kA。

主变中性点加装 10~16  $\Omega$  小电抗后,南天中压侧短路电流减少 47.6~47.2 kA。可以看出,当电抗阻值达到 15  $\Omega$  以后,阻值增大限制短路电流的作用并不明显。综合考虑电抗器对短路电流的限制效果,电抗器技术水平以及主变中性点绝缘水平等因素,南天站选择阻值为 15  $\Omega$  的电抗器。主要选型为:额定电压 66 kV;额定电抗 15  $\Omega$ ;额定电流 200 A;额定绝缘水平为雷电冲击耐受电压 325 kV,1 min 短时工频耐受电压 140 kV。

### 2.3 安装小电抗之后对中性点电压的影响

主变中性点接入小电抗之后,500、220 kV 母线单相短路在主变中性点会产生电压偏移。由于 220 kV 侧故障后的零序电流更大,因此在中性点所产生的零序电压会更高。

故中性点小抗阻值应合适为宜,如果取值过小,中性点接地电流大,限制单相短路电流有限;如果取值太大则主变中性点过电压水平提升,可能导致主变中性点绝缘水平提升,增加工程造价,不利于工程应用。

附 GB311.1—2012 关于电力变压器中性点绝缘水平表,见表 3 所示。

根据计算,装设中性点电抗器之后,南天 220 kV 母线单相短路时,主变中性点电压偏移为 41.41 kV;南天 220 kV 母线两相短路时,主变中性点电压偏移为 41.5 kV。该值远小于本站主变设备及 35 kV 设备对应的短时工频耐受电压,具有一定的安全裕量。

表 3 电力变压器中性点绝缘水平表

系统标称电压(有效值)	500	500
设备最高电压(有效值)	550	550
中性点接地方式	固定接地	经小电抗接地
雷电全波和截波耐受电压(峰值)/kV	185	325
短时工频耐受电压(有效值)(内、外绝缘,干试与湿试)/kV	85	140

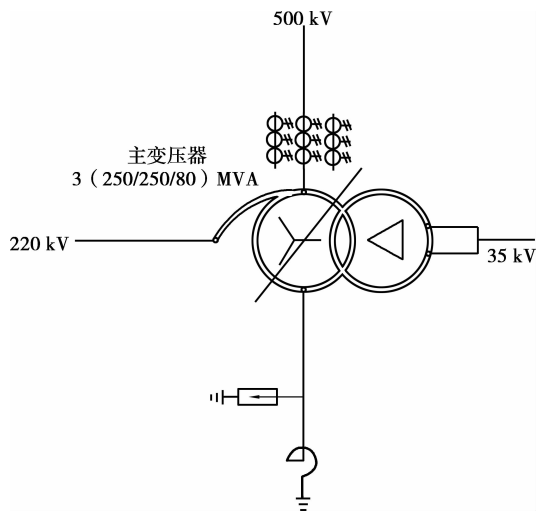


图 3 中性点电抗器配置接线图

### 2.4 安装小电抗之后对继电保护的影响

主变中性点经小电抗接地对继电保护的影响主要有如下 3 个方面。

1) 对于利用工频变化量原理构成的速动保护、利用比相原理构成的多段式相间距离保护、多段式接地距离保护等装置。加装小电抗后引起零序短路电流幅值的大小变化不影响其动作性能。

2) 对于零序电流保护,由于其动作整定值与  $3I_0$  直接有关。当主变中性点串接小电抗接地时,保护装置整定值会相应下降。在调整其保护动作范围及提高装置的灵敏度后,也可满足要求。

3) 对于选相元件、振荡闭锁元件、非全相运行判别等回路都不会受主变中性点是否带小电抗接地的影响。

## 3 南天变中性点电抗应用情况

### 3.1 中性点电抗器配置接线

为保证电网在任何情况下不发生中性点失地运行,故主变中性点与中性点电抗器之间不安装隔离开关,以杜绝误操作的可能。

为提供电网调度可能的接地点调整运行要求,接地串联小电抗器可考虑并联接地开关。就南天站而言,由于电网系统的发展来看,将来几乎不会有中性点直接接地的可能,故本站简化元件配置不考虑并联接地开关,元件配置详见图 3 所示。

### 3.2 中性点电抗安装及布置

南天站主变为分相布置,每相油坑尺寸为  $9\ 200\text{ mm(宽)} \times 12\ 000\text{ mm(深)}$ ,原主变接地用软导线经主变构架人字柱采用支柱绝缘子支撑直接接

入主接地网,本次将其改接经中性点电抗接地。

考虑到原有主变场地有限,若采用油浸式电抗其防火距离难以保证,且设备价格高。故本次选用户外单相干式空心电抗器。

根据设备参数  $66\text{ kV}$ 、 $15\ \Omega$ 、 $200\text{ A}$ ,电抗器直径为  $1\ 280\text{ mm}$ 、高  $1\ 350\text{ mm}$ 、重量为  $1\ 500\text{ kg}$ ,采用玻璃钢支架安装。根据“反措”要求,主变中性点入地点应采用网栏隔离。

## 4 结 论

针对南天变  $220\text{ kV}$  侧单相短路电流超出设备遮断能力,本文提出在主变中性点加装小电抗的方式以限制单相短路电流。经计算,南天变中性点经小电抗接地后,小电抗改变高中低三侧绕组的零序电阻,能够限制  $220\text{ kV}$  侧的单相短路电流。该方式工程造价低、可实施性强,对解决  $500\text{ kV}$  变电站单相短路电流超标具有实际意义。

### 参考文献:

[1] 电力工业部电力规则设计总院. 电力系统设计手册 [K]. 中国电力出版社,1998.  
 [2] 中国标准出版社. GB311.1—2012 绝缘配合[S]. 中国标准出版社,2012.

(编辑 詹燕平)