



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103424652 A

(43) 申请公布日 2013. 12. 04

(21) 申请号 201310324519. 0

(22) 申请日 2013. 07. 30

(71) 申请人 中国电力科学研究院

地址 100192 北京市海淀区清河小营东路  
15 号

(72) 发明人 杨迎建 董晓辉 童雪芳 邓长征  
彭庆华 王湘汉 向念文

(74) 专利代理机构 武汉帅丞知识产权代理有限  
公司 42220

代理人 朱必武 周瑾

(51) Int. Cl.

G01R 31/00(2006. 01)

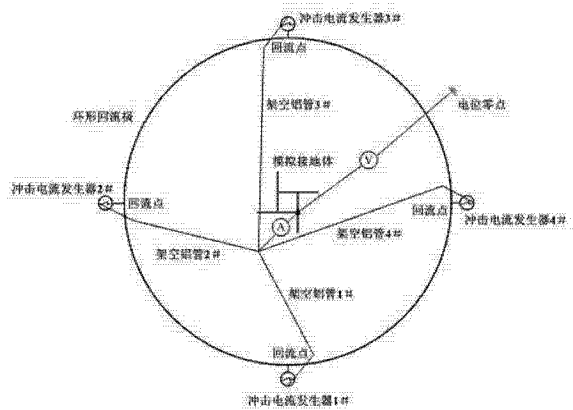
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟  
试验方法和装置

(57) 摘要

本发明提供一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验方法和装置,所述装置包括模拟接地体,分布式对称布置的四台冲击电流发生器及其配套的一个充电回路、四个放电回路、圆环形回流电极、一组调波电感和调波电阻、同轴圆筒式分流器,其特征在于:模拟接地体布置在冲击场中央,埋入地下;四台冲击电流发生器对称布置在冲击场四周,其输出端分别通过四根架空铝管连接至冲击场中央的高架上进行汇流,然后通过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器再连接至模拟接地体。本发明可以满足较大尺度接地体在可与实际雷电相比拟的大幅值冲击电流下的模拟试验,具有操作方便、电源容量大、输出冲击电流幅值高、波形多样、改装灵活多样等优点。



1. 一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,包括模拟接地体,分布式对称布置的四台冲击电流发生器及其配套的一个充电回路、四个放电回路、圆环形回流电极、一组调波电感和调波电阻、同轴圆筒式分流器,其特征在于:

模拟接地体布置在冲击场中央,埋入地下;四台冲击电流发生器对称布置在冲击场四周,其输出端分别通过四根架空铝管连接至冲击场中央的高架上进行汇流,然后通过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器再连接至模拟接地体;冲击电流经模拟接地体、土壤和圆环形回流电极以及与其连接的竖直向上的垂直铜排回流至四台冲击电流发生器的低压端;

四台冲击电流发生器均匀布置在圆环形回流电极外边缘,其并联给模拟接地体注入冲击电流,四台冲击电流发生器的四个放电回路并联;

模拟接地体的模型根据实验目的和内容进行设计制作,通过改变接地体模型的尺寸和型式来模拟不同规模、不同型式的接地体;试验回路中可通过调节多台冲击电流发生器的组合方式、电容器组合方式以及回路中的调波电感、调波电阻方法改变回路参数,从而实现向接地体注入不同波形的冲击电流。

2. 根据权利要求1所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,圆环形回流电极埋在地下一定深度的土壤中,为防腐和保证通流能力,选用铜带作为圆环形回流电极的主材;为避免回流极畸变电流场以及在地面产生过高的跨步电压,连接圆环形回流电极和四台冲击电流发生器负极的垂直铜排的地下部分采用热熔胶包裹后加装10kV电缆的绝缘护套进行绝缘屏蔽。

3. 根据权利要求1所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,圆环形回流电极直径40m,模拟接地体尺寸可达十余米;四台冲击电流发生器本体对地绝缘。

4. 根据权利要求1所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于:四台冲击电流发生器共用一个充电回路,该充电回路由升压变压器、高压硅堆、充电保护电阻、直流电阻分压器、充电架空线路和主电容组成;其中升压变压器的输出端接高压硅堆的输入端,高压硅堆的输出端接充电保护电阻,直流电阻分压器与冲击电流发生器本体的第一级主电容并联连接,用来测量主电容两端的充电电压;通过环绕试验场地的±100kV直流充电架空线路对四台独立的冲击电流发生器的主电容充电。

5. 根据权利要求1所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,四台冲击电流发生器的四个放电回路并联后再连接试品形成总体放电回路,该总体放电回路由主电容、空气放电球隙、架空铝管、汇流铜排、调波电阻、调波电感、分流器、模拟接地体、回流极组成;四台冲击电流发生器的放电电流经四根架空铝管进入回流铜排集中,然后经过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器后注入模拟接地体;调波电阻、调波电感采用螺栓接入回路中。

6. 根据权利要求1所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,各台冲击电流发生器参数相同;每台冲击电流发生器的主电容由5级电容器组串联而成,每级电容器组由3台200kV/0.6μF的圆筒式电容器并联而成,单台冲击电流发生器的额定充电电压为1000kV,电容量为0.36μF,储存能量为180kJ,能通过顶部继续串联电容器组而进行升级,也可通过继续增加并联的冲击电流发生器升级;能在4Ω及以下的负

载条件下产生峰值达到 100kA 的 8/20  $\mu$ s 冲击电流；电容器间的连接采用螺栓。

7. 根据权利要求 1 所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,四台冲击电流发生器同时充电,同步放电;通过多路延时可调触发器实现同步触发点火,不同冲击电流发生器的触发信号之间的相对时间差在 0.1  $\mu$ s 以内,使不同发生器产生的冲击电流叠加后的总冲击电流波形与单台发生器的冲击电流波形基本一致。

8. 根据权利要求 1 所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,采用基于 PLC 技术的控制系统为冲击电流发生器发出各种控制命令,以满足冲击电流试验的各种控制功能;采用光缆连接操作单元和控制柜以控制和显示充电回路的控制量,采用光纤连接操作单元和四台冲击电流发生器的本体控制盒,从而调节和显示球隙间距以及控制鼓风机的开关。

9. 一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验方法,采用如权利要求 1-8 所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,试验步骤如下:

1) 根据试验目的研究试验方案,制作模拟接地体模型,提出施加电压、电流幅值和波形要求,需要观测的参量和测量方法,将模拟接地体埋入冲击试验场中心地下土壤中;

2) 进行冲击放电回路电气参数的测试与反演,为调制出符合接地冲击特性试验要求的冲击电流波形,需掌握整个冲击放电回路的电气参数,包括电容、电阻和电感参数,具体测试方法如下:①四台发生器及其高压引线与接地体、土壤、回流电极构成放电回路,其中不串联任何调波电阻和调波电感,放电完成后根据冲击电流波形推算整个回路的电阻  $R_1$  和电感  $L_1$ ;②采用铜箔短接地下回路部分,即 1# 发生器、高压引线、铜箔构成放电回路,放电完成后根据冲击电路波形推算回路的电阻  $R_2$  和电感  $L_2$ ;③采用 LCR 测试仪测量短接铜箔的电阻  $R_3$  和电感  $L_3$ ;④根据式 (1) 计算单台发生器及其高压引线的电阻  $R_y$  和电感  $L_y$ ,根据式 (2) 计算包括接地体、土壤、回流电极的地下回路的电阻  $R_f$  和电感  $L_f$ ;

$$\begin{cases} R_y = R_2 - R_3 \\ L_y = L_2 - L_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_f = R_1 - R_y \\ L_f = L_1 - L_y \end{cases} \quad (2)$$

3) 冲击电流幅值和波形调试,根据冲击电流发生器 LCR 冲击电流放电回路公式 (3) 计算提出要达到预期波形,所需的回路电容、电感、电阻参数,然后基于步骤 (2) 中获得的现有冲击放电回路的  $R_y$ 、 $L_y$ 、 $R_f$ 、 $L_f$  参数,提出电容器的组合方式,以及需要的调波电感、调波电阻参数,进行相应的接线调整,制作相应的调波电感、调波电阻,并接入回路;

$$U_0 - \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3)$$

4) 测量仪器仪表接入,分流器一直串联在回路中,接在汇流铜排和模拟接地体电流注入点之间,测量回路的冲击电流;将分压器两端分别接至接地体电流注入点和环外十余米的工频零电位点,测量接地体地电位升;

5) 启动冲击电流发生器,设置球隙间距,控制冲击电流发生器升至需要的电压水平,通过球隙放电获得所需的冲击电流;

6) 分析试验数据,依据地电位升波形幅值除以冲击电流幅值获得模拟接地体的冲击接地电阻。

## 一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高电压试验技术领域,具体地说涉及到输电线路、变电站等输变电设备接地体(包括杆塔接地装置、变电站接地网等)在大模拟尺度、大幅值的冲击电流下的冲击特性的试验方法。

### 背景技术

[0002] 架空输电线路杆塔、变电站等均设置了接地装置或接地网(后统称接地体),在故障时提供泄流通道。当遭受雷电冲击,冲击电流经接地体泄放至土壤中,一方面在接地体上产生高电位,可能延伸至塔顶引起绝缘闪络发生跳闸故障,另一方面,在土壤中形成电位梯度,危及站在地面的人体和接地设备的安全,甚至通过地中耦合威胁变电站中二次设备的安全。因此,接地设计时对其冲击特性进行评估,合理设计接地体型式及应对措施,对电力系统的安全稳定运行十分重要。

[0003] 目前,研究和评估接地体接地性能的方法主要有三种:现场实测,数值计算,模拟试验。现场实测需要在接地体建设完成后进行,不能在设计阶段采用。数值计算的算法具有一定的假设、简化及近似,其准确性和适用性有待进一步提高;特别是冲击特性研究方面,对放电区域的简化处理和冲击散流特性规律的人为假设等都缺乏试验依据。模拟试验克服了其他两种方法的缺点,只需进行一定的投资来建设模拟试验设备,之后就能长期使用,对于改变接地网模型拓扑结构也十分方便,因而接地模拟技术一直是接地设计的一个有效手段。

[0004] 目前接地体的冲击特性模拟试验方法一般是采用半球形模拟槽或方形模拟槽。半球形模拟槽是在地面挖一个半球形接地池,填充土壤或细沙模拟不同的土壤电阻率,由于模拟槽半径一般不超过 5m,模拟接地体的对角尺寸不能超过 2.5m。方形模拟槽是在地下挖一四方体接地池,通常是填充水等溶液,一般尺寸不超过 30m×30m,模拟接地体的对角尺寸不能超过 3m。中国发明专利“接地模拟试验方法”(申请号:201210117351.1)提出了一种内置透明液体的透明容器作为模拟试验装置,在其底部装设可移动滑轮,其容积不能做得太大,相应的模拟接地体的尺寸更小。小尺寸模拟时对接地体冲击特性中的散流分布特征、电感效应等难以有效研究。且这些试验中,冲击电源能量通常较小,产生的冲击电流也很小,与实际雷电流相差较远。

[0005] 中国发明专利“接地装置雷电冲击特性的大电流户外真型模拟试验方法”(申请号:201110272119.0)提出了一种对接地装置的真型模拟试验方法,接地体尺寸虽然可达到实际尺寸,但其:①布线较长,所需场地庞大,且由于布线电感较大,冲击波头难以达到陡波头情况;②同一个接地体在回路中电感和电阻是定值,不能进行不同雷电流波形下的冲击特性试验;③采用单点回流,冲击电流在地下时在两电流点间流动,与实际情况下冲击电流是以接地体为中心向四周对称流散的特征不符。④接地体是真型模型,但注入冲击电流幅值相对实际雷电流太小,不能反映实际大幅值雷电流下的情况。国内对于大模拟尺寸、大幅

值下的冲击电流模拟试验十分缺乏。

### 发明内容

[0006] 本发明是考虑上述技术中的不足而设计的,提供一种大模拟尺寸、大幅值下接地体冲击特性的试验方法和装置,该方法和装置操作灵活,冲击电流从接地体注入向四周土壤流散,能有效反映不同接地体型式和尺寸在不同冲击电流幅值和波形下的冲击特性。

[0007] 本发明所采用的技术方案是:一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,包括模拟接地体,分布式对称布置的四台冲击电流发生器及其配套的一个充电回路、四个放电回路、圆环形回流电极、一组调波电感和调波电阻、同轴圆筒式分流器,其特征在于:

模拟接地体布置在冲击场中央,埋入地下;四台冲击电流发生器对称布置在冲击场四周,其输出端分别通过四根架空铝管连接至冲击场中央的高架上进行汇流,然后通过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器再连接至模拟接地体;冲击电流经模拟接地体、土壤和圆环形回流电极以及与其连接的竖直向上的垂直铜排回流至四台冲击电流发生器的低压端;

四台冲击电流发生器均匀布置在圆环形回流电极外边缘,其并联给模拟接地体注入冲击电流,四台冲击电流发生器的四个放电回路并联;

模拟接地体的模型根据实验目的和内容进行设计制作,通过改变接地体模型的尺寸和型式来模拟不同规模、不同型式的接地体;试验回路中可通过调节多台冲击电流发生器的组合方式、电容器组合方式以及回路中的调波电感、调波电阻方法改变回路参数,从而实现向接地体注入不同波形的冲击电流。

[0008] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,圆环形回流电极埋在地下一定深度的土壤中,为防腐和保证通流能力,选用铜带作为圆环形回流电极的主材;为避免回流极畸变电流场以及在地面产生过高的跨步电压,连接圆环形回流电极和四台冲击电流发生器负极的垂直铜排的地下部分采用热熔胶包裹后加装 10kV 电缆的绝缘护套进行绝缘屏蔽。

[0009] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,圆环形回流电极直径 40m,模拟接地体尺寸可达十余米;四台冲击电流发生器本体对地绝缘。

[0010] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于:四台冲击电流发生器共用一个充电回路,该充电回路由升压变压器、高压硅堆、充电保护电阻、直流电阻分压器、充电架空线路和主电容组成;其中升压变压器的输出端接高压硅堆的输入端,高压硅堆的输出端接充电保护电阻,直流电阻分压器与冲击电流发生器本体的第一级主电容并联连接,用来测量主电容两端的充电电压;通过环绕试验场地的  $\pm 100\text{kV}$  直流充电架空线路对四台独立的冲击电流发生器的主电容充电。

[0011] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,四台冲击电流发生器的四个放电回路并联后再连接试品形成总体放电回路,该总体放电回路由主电容、空气放电球隙、架空铝管、汇流铜排、调波电阻、调波电感、分流器、模拟接地体、回流极组成;四台冲击电流发生器的放电电流经四根架空铝管进入回流铜排集中,然后经过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器后注入模拟接地体;调波电阻、调波电感采用螺栓

接入回路中。

[0012] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,各台冲击电流发生器参数相同;每台冲击电流发生器的主电容由5级电容器组串联而成,每级电容器组由3台200kV/0.6μF的圆筒式电容器并联而成,单台冲击电流发生器的额定充电电压为1000kV,电容量为0.36μF,储存能量为180kJ,能通过顶部继续串联电容器组而进行升级,也可通过继续增加并联的冲击电流发生器升级;能在4Ω及以下的负载条件下产生峰值达到100kA的8/20μs冲击电流;电容器间的连接采用螺栓。

[0013] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,四台冲击电流发生器同时充电,同步放电;通过多路延时可调触发器实现同步触发点火,不同冲击电流发生器的触发信号之间的相对时间差在0.1μs以内,使不同发生器产生的冲击电流叠加后的总冲击电流波形与单台发生器的冲击电流波形基本一致。

[0014] 如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,采用基于PLC技术的控制系统为冲击电流发生器发出各种控制命令,以满足冲击电流试验的各种控制功能;采用光缆连接操作单元和控制柜以控制和显示充电回路的控制量,采用光纤连接操作单元和四台冲击电流发生器的本体控制盒,从而调节和显示球隙间距以及控制鼓风机的开关。

[0015] 本发明还提供一种大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验方法,采用如上所述的大模拟尺寸大幅值接地体冲击特性模拟试验装置,其特征在于,试验步骤如下:

1) 根据试验目的研究试验方案,制作模拟接地体模型,提出施加电压、电流幅值和波形要求,需要观测的参量和测量方法,将模拟接地体埋入冲击试验场中心地下土壤中;

2) 进行冲击放电回路电气参数的测试与反演,为调制出符合接地冲击特性试验要求的冲击电流波形,需掌握整个冲击放电回路的电气参数,包括电容、电阻和电感参数,具体测试方法如下:①四台发生器及其高压引线与接地体、土壤、回流电极构成放电回路,其中不串联任何调波电阻和调波电感,放电完成后根据冲击电流波形推算整个回路的电阻 $R_1$ 和电感 $L_1$ ;②采用铜箔短接地下回路部分,即1#发生器、高压引线、铜箔构成放电回路,放电完成后根据冲击电路波形推算回路的电阻 $R_2$ 和电感 $L_2$ ;③采用LCR测试仪测量短接铜箔的电阻 $R_3$ 和电感 $L_3$ ;④根据式(1)计算单台发生器及其高压引线的电阻 $R_y$ 和电感 $L_y$ ,根据式(2)计算包括接地体、土壤、回流电极的地下回路的电阻 $R_f$ 和电感 $L_f$ ;

$$\begin{cases} R_y = R_2 - R_3 \\ L_y = L_2 - L_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_f = R_1 - R_y \\ L_f = L_1 - L_y \end{cases} \quad (2)$$

3) 冲击电流幅值和波形调试,根据冲击电流发生器LCR冲击电流放电回路公式(3)计算提出要达到预期波形,所需的回路电容、电感、电阻参数,然后基于步骤(2)中获得的现有冲击放电回路的 $R_y$ 、 $L_y$ 、 $R_f$ 、 $L_f$ 参数,提出电容器的组合方式,以及需要的调波电感、调波电阻参数,进行相应的接线调整,制作相应的调波电感、调波电阻,并接入回路;

$$U_0 - \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3)$$

4) 测量仪器仪表接入,分流器一直串联在回路中,接在汇流铜排和模拟接地体电流注

入点之间,测量回路的冲击电流;将分压器两端分别接至接地体电流注入点和环外十余米的工频零电位点,测量接地体地电位升;

5) 启动冲击电流发生器,设置球隙间距,控制冲击电流发生器升至需要的电压水平,通过球隙放电获得所需的冲击电流;

6) 分析试验数据,依据地电位升波形幅值除以冲击电流幅值获得模拟接地体的冲击接地电阻。

[0016] 本发明的有益效果是:本发明可以满足较大尺度接地体在可与实际雷电相比拟的大幅值冲击电流下的模拟试验,具有操作方便,电源容量大,输出冲击电流幅值高、波形多样,回流极布置型式新颖,改装灵活多样等优点。

### 附图说明

[0017] 图1为本发明实施例的冲击接地模拟试验接线示意图。

[0018] 图2为试验输出冲击电流波形(波形 $8/20\mu\text{s}$ ,幅值 $100\text{kA}$ ,正极性)。

[0019] 图3为试验输出冲击电流波形(波形 $8/20\mu\text{s}$ ,幅值 $100\text{kA}$ ,负极性)。

[0020] 图4为试验输出冲击电流波形(波形 $2.6\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ ,幅值 $15\text{kA}$ )。

### 具体实施方式

[0021] 为了更好地理解本发明,下面结合实施例进一步阐明本发明的内容,但本发明的内容不仅仅局限于下面的实施例。本领域技术人员可以对本发明作各种改动或修改,这些等价形式同样在本申请所列权利要求书限定范围之内。

[0022] 本发明提出的一种大模拟尺寸、大幅值下接地体冲击特性的试验方法和装置,其冲击接地模拟试验接线示意图如图1所示。为获得接地体冲击电流下的冲击接地电阻,试验基本步骤如下:

1) 根据试验目的研究试验方案,制作接地体模型,提出施加电压、电流幅值和波形要求,需要观测的参量和测量方法。将模拟接地体埋入冲击试验场中心地下土壤中。

[0023] 2) 进行冲击放电回路电气参数的测试与反演。为调制出符合接地冲击特性试验要求的冲击电流波形,需掌握整个冲击放电回路的电气参数,包括电容、电阻和电感参数。具体测试方法如下:①四台发生器及其高压引线与接地体、土壤、回流电极构成放电回路,其中不串联任何调波电阻和调波电感,放电完成后根据冲击电流波形推算整个回路的电阻 $R_1$ 和电感 $L_1$ ;②采用铜箔短接地下回路部分,即1#发生器、高压引线、铜箔构成放电回路,放电完成后根据冲击电路波形推算回路的电阻 $R_2$ 和电感 $L_2$ ;③采用LCR测试仪测量短接铜箔的电阻 $R_3$ 和电感 $L_3$ ;④根据式(1)计算单台发生器及其高压引线的电阻 $R_y$ 和电感 $L_y$ ,根据式(2)计算包括接地体、土壤、回流电极的地下回路的电阻 $R_f$ 和电感 $L_f$ 。

$$[0024] \quad \begin{cases} R_y = R_2 - R_3 \\ L_y = L_2 - L_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_f = R_1 - R_y \\ L_f = L_1 - L_y \end{cases} \quad (2)$$

3) 冲击电流幅值和波形调试。根据冲击电流发生器LCR冲击电流放电回路公式(3)计算提出要达到预期波形,所需的回路电容、电感、电阻参数。然后基于步骤(2)中获得的现

有冲击放电回路的  $R_y$ 、 $L_y$ 、 $R_f$ 、 $L_f$  参数,提出电容器的组合方式,以及需要的调波电感、调波电阻参数。进行相应的接线调整,制作相应的调波电感、调波电阻,并接入回路。

$$[0025] \quad U_0 - \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3)$$

4) 测量仪器仪表接入。分流器一直串联在回路中,接在汇流铜排和模拟接地体电流注入点之间,测量回路的冲击电流;将分压器两端分别接至接地体电流注入点和环外十余米的工频零电位点,测量接地体地电位升。

[0026] 5) 启动冲击电流发生器,设置球隙间距,控制冲击电流发生器升至需要的电压水平,通过球隙放电获得所需的冲击电流。

[0027] 6) 分析试验数据,依据地电位升波形幅值除以冲击电流幅值获得模拟接地体的冲击接地电阻。

[0028] 基于试验场地空间和地下电感量不宜过大的基本要求,通过分析比较确定冲击试验场尺寸为直径 40m;模拟接地体布置在冲击场中央,埋入地下;四台冲击电流发生器对称布置在冲击场四周,其输出端分别通过四根架空铝管连接至冲击场中央的高架上进行汇流,然后通过调波电阻、调波电感、同轴圆筒式分流器等元件再连接至模拟接地体;冲击电流经模拟接地体、土壤和环形回流电极以及与其连接的竖直向上的垂直铜排回流至冲击电流发生器的低压端。调波电阻、调波电感采用螺栓接入回路中,拆卸和更换方便。

[0029] 每台冲击电流发生器本体采用阳光板制作成圆筒形密封,有门供内部检修用;根据输出电流能力要求进行计算,每台冲击电流发生器主电容包括 15 台 MCF200-0.6 绝缘桶式脉冲电容器,由 5 级串联,每级 3 台电容器并联组成,总电容量为  $0.36 \mu F$ ,额定输出电压 1000kV,储存能量为 180kJ;主电容间采用螺栓连接,拆卸方便。

[0030] 基于电流向四周均匀流散且电感量较小,开挖施工量较小等因素,设计了环形回流极;根据回流电极影响因素分析结果,环形回流电极导体主材采用截面为  $60\text{mm} \times 6\text{mm}$  的铜带,埋深 1000mm,同时在其对称的 12 个点下部连接垂直向下布置的铜管,长度为 1500mm,半径为 25mm,壁厚为 3mm,共 12 根;为连接各台冲击电流发生器本体中电容器的负极,在铜带上均匀布置 4 根垂直向上的铜排,其截面为  $60\text{mm} \times 6\text{mm}$ ,地面以下部分长度为 1000mm,地面以上部分长度为 200mm,并利用环氧热熔胶对其进行包裹和绝缘。

[0031] 冲击电流发生器系统充电设备主要包括动力电源柜、包含可控硅的充电控制柜、升压变压器、倍压电容器、直流分压器、保护电阻、 $\pm 100\text{kV}$  直流充电引线等。试验场箱式变通过电力电缆向室内的动力电源柜供电,动力电源柜通过与包含可控硅的充电控制柜、串联/并联保护电阻、以及升压变压器的原边绕组构成充电回路的低压回路;升压变压器的副边绕组与倍压电容器、硅堆、充电保护电阻以及四台发生器本体的主电容构成充电回路的高压回路;通过环绕试验场地的  $\pm 100\text{kV}$  直流充电架空线路对四台独立的冲击电流发生器的主电容充电。直流电阻分压器与发生器本体的第一级主电容并联连接,用来测量主电容两端的充电电压;充电控制柜通过直流分压器测量所得的直流充电电压来控制柜中的可控硅触发角,从而调节发生器的直流充电电压,形成闭环控制系统。

[0032] 放电设备主要包括主电容器、放电球隙、充电架空铝管、调波电阻、调波电感及多路触发器。单台发生器包含 5 个放电球隙,第一级电容与第二级电容之间的球隙为点火花隙,根据电容器的充电电压来控制 and 调节放电球隙的空气间距长度。多路触发器置于控制



台上,分别引4根两芯光纤连接单台发生器本体的触发脉冲放大器,以给每台发生器的点火球隙发送触发控制信号;采用点火反馈分压器监测发生器的点火触发;多路触发器的放电时间可调,精度在 $0.1\mu\text{s}$ 内,与发生器的控制系统相对独立,确保实现同步触发。

[0033] 采用基于PLC技术的控制系统为冲击电流发生器发出各种控制命令,以满足冲击电流试验的各种控制功能。控制系统由本体控制盒、充电控制柜和操作单元三部分组成;采用一根光缆连接操作单元和控制柜以控制和显示充电回路的控制量,利用光纤串联连接操作单元和四台发生器的本体控制盒,从而调节和显示球隙间距以及控制鼓风机的开关;操作单元采用专门的控制程序由计算机完成所有测控操作。

[0034] 采用型号为GF-1同轴管式分流器,将其安装在冲击场地中心的汇流铝板上,用来测量试验回路的冲击电流。其主要技术参数为:电阻值 $0.0020684\Omega$ ;标称电流 $100\text{kA}$ ;响应时间小于 $80\text{ns}$ ;输出电压 $0\sim 300\text{V}$ 。分流器的输入端与其上方的调波电感相连,电流输出端与汇流铝板相连,其底部的BNC端口通过传输信号的同轴电缆线与示波器的输入端相连。在分流器的附近配置一组示波器、光电转换模块及UPS电源的屏蔽铁柜,分流器的电压信号经同轴电缆线输出至示波器,示波器通过网线将测量信号输出至光电转换模块,最后通过光纤传输至测控室的测量系统中,UPS电源主用用于给示波器、光电转换模块进行供电。

[0035] 采用弱阻尼电容分压器测量模拟接地装置注入点的地电位升,分压器高压臂的电容器采用环氧绝缘管封装,电容器的连接采用金属法兰,在设计上考虑了机械强度和油密封措施,满足长期使用而不漏油。分压器的顶部采用单屏蔽环结构,屏蔽环的尺寸可满足承受 $1000\text{kV}$ 标准雷电冲击电压波形的要求,采用薄壁不锈钢管拼装结构,以达到重量轻、耐腐蚀、不氧化和风阻小等特点。分压器低压臂输出信号的采集、转换及传输与分流器输出信号的处理方法基本一致,为避免高电位引出,均对输出信号采用了光电隔离措施。

[0036] 如图2及图3所示,四台发生器的总电容量为 $1.44\mu\text{F}$ ,额定输出电压仍为 $1000\text{kV}$ ,对 $4\Omega$ 的线性模拟负载放电的情况下,要产生幅值为 $100\text{kA}$ 、波形为 $8/20\mu\text{s}$ 的冲击电流,放电回路的电感量 $L=45.1\mu\text{H}$ ,充电电压 $U_0=881.8\text{kV}$ 。根据上述步骤首先制作了方框接地体,并在其四个角上按 $90^\circ$ 方向布置了四根射线,方框边长 $4\text{m}$ ,射线长 $4\text{m}$ ,埋入地下 $0.8\text{m}$ ,接地体材料为 $40\text{mm}\times 4\text{mm}$ 的扁铁。根据冲击放电回路电气参数测试试验的结果,四台发生器及其引线的电阻 $R_{y4}=0.25\Omega$ ,电感 $L_{y4}=5.20\mu\text{H}$ ,地下回路的电阻 $R_f=1.76\Omega$ ,电感 $L_f=5.86\mu\text{H}$ ,为在超过 $4\Omega$ 负载下实现 $100\text{kA}$ 的 $8/20\mu\text{s}$ 的冲击电流,制作了 $2.4\Omega$ 的调波电阻, $34\mu\text{H}$ 的调波电感。将其接入回路中,对接地体进行冲击电流试验,输出了 $8/20\mu\text{s}$ 的冲击电流,电流幅值在正、负极性下均达到了 $99\text{kA}$ 。

[0037] 如图4所示,为产生波前时间 $2.6\mu\text{s}$ 、半峰值时间 $50\mu\text{s}$ 的冲击电流,将每台发生器上方的第四级、第五级电容短接,并拆除第三级电容与第四级电容的充电电阻,在 $26\Omega$ 的调波电阻、 $13\mu\text{H}$ 的调波电感下,对上述接地体进行冲击试验,输出了 $2.6/50\mu\text{s}$ 的冲击电流,电流幅值达到了 $15\text{kA}$ 。

[0038] 本说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

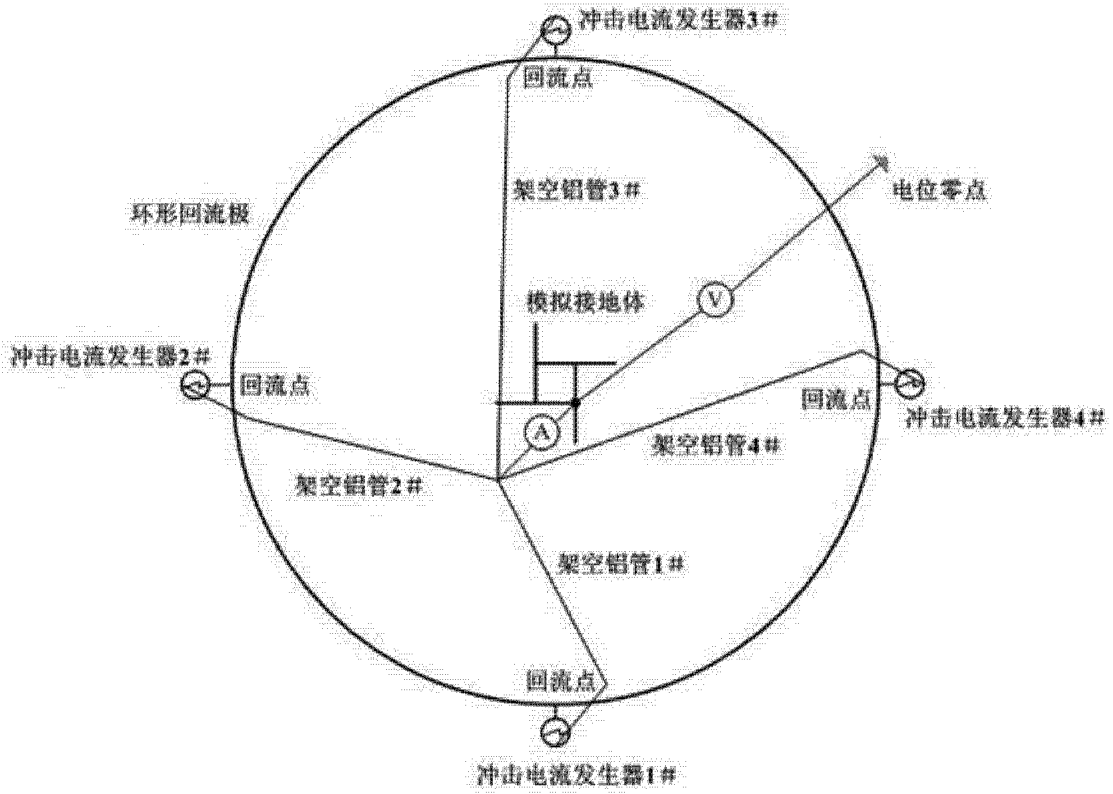


图 1

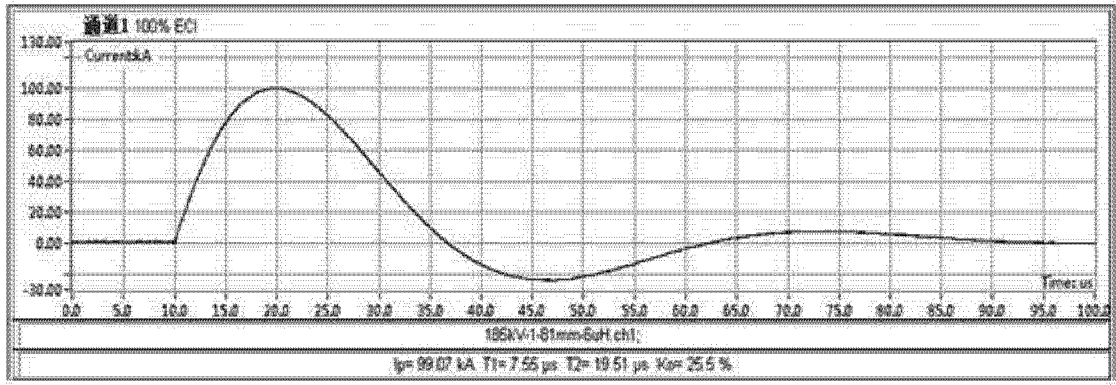


图 2

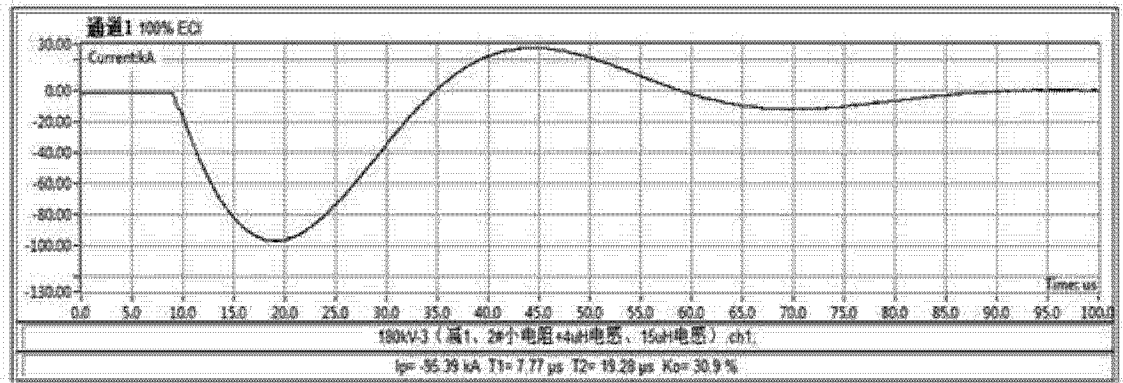


图 3

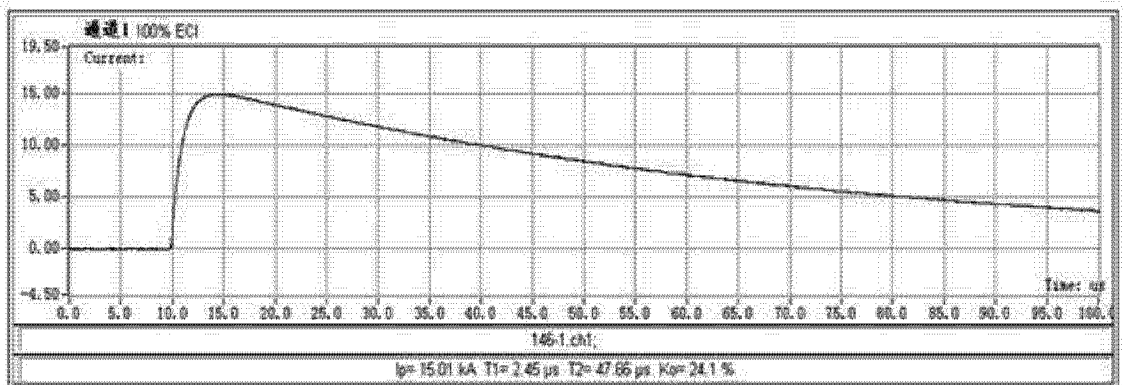


图 4