(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 118970851 A
(43)申请公布日 2024.11.15

(21)申请号 202410862914.2
(22)申请日 2024.06.28
(71)申请人 四川华能嘉陵江水电有限责任公司
地址 637000 四川省南充市顺庆区柳林路189号
(72)发明人 张鹏程 陈枰 叶明恩 董曦 胡钢 杨洋
(74)专利代理机构 南京禹为知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 32272
专利代理师 方晓雯
(51)Int.Cl.
H02H 9/04(2006.01)
H02H 1/00(2006.01)
G06F 30/20(2020.01)
G06F 30/36(2020.01)
G06F 113/04(2020.01)

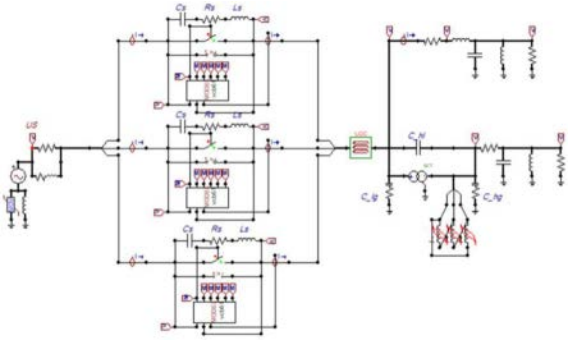
权利要求书3页 说明书14页 附图9页

(54)发明名称

一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,涉及水电站系统过电压技术领域,包括构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。本发明不仅提高了系统稳定性和可靠性,还优化了保护策略和运行方案,提升了经济效益。同时,结合地表电位时空分布的分析,增强了接地网故障诊断能力,为系统设计和改造提供了科学依据,推动了水电站过电压抑制技术的创新发展。这种系统性的解决方案显著提升了水电站10kV系统的整体性能和安全水平。



CN 118970851 A

1.一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:包括,

构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;

通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;

基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

2.如权利要求1所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:所述水电站仿真模型为主变压器的10kV侧EMPT仿真模型,包括10kV真空断路器仿真模块、主变压器仿真模块、电缆仿真模块、避雷器仿真模块以及阻容吸收器模块;

所述10kV真空断路器仿真模块是在ATP-EMTP的MODLES模块中建立,包括真空断路器的燃弧时间、截流、绝缘强度以及高频熄弧能力四个要素;

所述主变压器仿真模块采用ATP-EMTP中三相对称非线性电感Type-96模型模拟变压器的磁化特性,其中Type-96非线性电感表示励磁电流和磁通的关系,是通过空载和短路试验获得变压器的空载特性曲线进而用ATP-EMTP转换为磁化曲线;

所述电缆仿真模块是在ATP-EMTP中利用type 92元件构建避雷器,包括拥有高于正常伏安特性曲线的避雷器和拥有低于正常伏安特性曲线的避雷器。

3.如权利要求2所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:所述操作过电压,包括分闸操作过电压、合闸操作过电压、暂态恢复过电压、投切变压器过电压;

所述分闸操作过电压是指在断路器或开关进行分闸操作时,由于电气设备的特性以及电力系统的运行状态的因素导致的电压异常增加的现象;

所述合闸操作过电压包括计划性合闸操作和自动重合闸操作;

所述计划性合闸操作产生的最大过电压为p倍即过电压幅值与稳态工频电压幅值之比;

所述自动重合闸操作是线路发生跳闸故障后,有自动装置控制而进行的合闸操作;

所述暂态恢复过电压是电力系统发生短路后,断路器分闸开断短路电流,断路器触头分离后,触头间产生电弧,电弧电压过零瞬间,电弧熄灭,触头上产生暂态恢复电压。

4.如权利要求3所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:所述投切变压器过电压是指切除空载变压器、电抗器以及空载电动机,即开断小的电感性电流;

所述切除空载变压器是切除变压器的空载电流,断路器的灭弧能力在空载电流过零之前就将其强制熄弧而被切断,产生截流现象,则在工频电压作用下,流过空载变压器的电流i为流过励磁电感的电流i_L;

若空载电流$i=I_0$时发生截断,此时电源电压为U_0,则切断瞬间在电感和电容中所储存的能量为:

$$W_L=\frac{1}{2}LI_0^2$$

$$W_C=\frac{1}{2}CU_0^2$$

其中,C表示变压器电容,L表示空载变压器的激磁电感;

在L、C构成的振荡回路中发生电磁振荡,在某一瞬间,全部电磁能量均变成为电场能量,此时电容C上出现最大电压U_{max},根据能量守恒定律得:

$$\frac{1}{2}CU_{max}^2=\frac{1}{2}LI_0^2+\frac{1}{2}LU_0^2$$

$$U_{max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

若截流瞬间电容上所存储的能量$\frac{1}{2}CU_0^2$,则:

$$U_{max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

若截流瞬间I_0值越大,空载变压器的激磁电感L越大,则磁场能量越大;电容越小,同样的磁场能量转化到电容上,产生的过电压越高。

5.如权利要求4所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:通过避雷器和阻容吸收器实现过电压操作的抑制,具体是对分闸重燃过电压的抑制;

所述避雷器的伏安特性高低对过电压的影响程度不同,将避雷器安装在断路器两侧,重燃期间,分闸过电压的幅值受限于避雷器的非线性与断口绝缘强度,重燃结束之后的分闸过电压则仅受限于避雷器的非线性,伏安特性曲线越低,其抑制效果更强;

考虑避雷器对合闸预击穿过电压的影响,相比于分闸重燃过电压,避雷器对合闸预击穿的抑制效果并不显著,特别是高伏安特性避雷器,与分闸仿真相同,伏安特性与安装位置影响抑制效果,伏安特性曲线越低,抑制效果越强,单一避雷器只能限制对应安装处的电压;

进一步考虑阻容吸收器对分闸重燃过电压的影响,阻容吸收器不仅限制过电压幅值,还降低振荡频率与上升陡度,电容值大小与抑制效果呈正相关但存在饱和效应,安装位置存在影响,单一的阻容吸收器比单一的避雷器抑制效果强,阻容吸收器的接入改变了高频回路的振荡参数,对重燃和预击穿过电压有出色的抑制效果;

考虑阻容吸收器对合闸重燃过电压的影响,相比于避雷器,阻容吸收器在面对幅值不高的合闸过电压可以限制幅值,降低振荡频率与上升陡度,电容值与安装位置对抑制效果的影响规律与分闸相同。

6.如权利要求5所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:所述过电压抑制措施通过设置保护设备实现,包括用于限制过电压同值的避雷器和用以降低以至消除振荡过电压RC阻容吸收装置;

所述避雷器采用氧化锌避雷器,对于在运行中的10kV发电机其相对地和相对相之间的绝缘所能承受的过电压数值用电机耐压水平公式进行计算,表示为:

$$U_s=\sqrt{2}(2U_e+1)\times 0.75\times K$$

其中,U_e为发电机的额定电压,K为冲击系数;

氧化锌避雷器采用星形接线保护发电机,当发生单相接地故障时,健全相对地电压升至线电压并允许运行mh,此时计算氧化锌避雷器所承受的工频电压最大U_{gm},为保证氧化锌避雷器的安全运行,其标称电压U_{1mA}必须大于U_{gm},计算当氧化锌避雷器中流过nA时其上的残压U_c,

将U_c和U_s的数值进行比较,获取采用带串联间隙的氧化锌避雷器,对高压电动机相对地之间的绝缘保护情况。

7.如权利要求6所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:当所述阻容吸收装置未接入时,开关开断后C_0与L_0组成一个振荡电路,由于C_0很小,则振荡频率偏高,幅值与震荡频率正相关,当吸收器r1、c1加入后,$C_1>C_0$,C_0忽略不计,则此时振荡电路为r1、c1和L1回路;

回路中的震荡频率$f=\frac{\omega}{2\pi}$,角频率ω为:

$$\omega^2=\omega_0^2-\delta^2$$

其中,$\omega_0=\sqrt{\frac{1}{LR}}$, $\delta=\frac{R}{2L}$,当$R>2\sqrt{\frac{L}{C}}$时无振荡衰减波,当$R=R_c=2\sqrt{\frac{L}{C}}$时为临界状态,$R_c$为临界电阻值;

进一步的,通过仿真分析,可得:在中性点经消弧线圈接地电网中,氧化锌避雷器仅能限制过电压幅值不能改变频率和陡度,存在缺陷,偏向于保护相对地绝缘,相间绝缘虽能保护,但方法较繁且价格较高;

RC阻容吸收装置是一种有效的限制真空开关操作过电压的设备,可降低来波的幅值和来波陡度。

8.一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制系统,基于权利要求1～7任一所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其特征在于:包括,

构建模块,用于构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;

分析模块,用于通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;

优化模块,用于基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

9.一种计算机设备,包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,其特征在于:所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求1～7任一所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的步骤。

10.一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于:所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求1～7任一所述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的步骤。

一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及水电站系统过电压技术领域,特别是一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法。

背景技术

[0002] 青居水电站采用两机一变的扩大单元接线方式,发电机出口电压10.5kV,两段10kV厂用电分别通过限流电抗器从扩大单元母线引接,发电机出口断路器选用伊顿公司的150VCP-WRG50型真空断路器。为降低分闸是操作过电压陡度,断路器两侧分别装设了一组RC过电压保护器,型号为LCQ10-0.2/100-1。2021年08月29日08时03分33秒,RC阻容吸收器发生了过热烧损至出口母线断路故障。类似故障在其他发电厂、变电站也多次发生,对于发电厂机组出口10kV,设计单位一般不作操作过电压水平的定量分析和计算,是否选用RC抑制操作过电压陡度完全凭经验,据调研多个同类型电厂实际运行情况发现部分未装设RC阻容吸收器的发电厂因断路器过电压损坏的故障发生率也较低,

[0003] 针对这些情况,是否有必要安装RC阻容吸收器,其参数的选择,如何防范发热烧损都有必要做定性和定量的分析论证。本发明针对这些问题,根据青居水电站的实测参数,采用ATP-EMPT电力系统电磁暂态及电力电子数字仿真系统,模拟电站10kV系统的电磁、机电暂态过程,定量分析断路器不容分合实验条件下系统的操作过电压水平。

发明内容

[0004] 鉴于现有的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法中存在的问题,提出了本发明。

[0005] 因此,本发明所要解决的问题在于发电厂机组10kV,是否选用RC抑制操作过电压陡度,如何防范发热烧损。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供如下技术方案:

[0007] 第一方面,本发明实施例提供了一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,其包括,构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

[0008] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:所述水电站仿真模型为主变压器的10kV侧EMPT仿真模型,包括10kV真空断路器仿真模块、主变压器仿真模块、电缆仿真模块、避雷器仿真模块以及阻容吸收器模块;所述10kV真空断路器仿真模块是在ATP-EMTP的MODLES模块中建立,包括真空断路器的燃弧时间、截流、绝缘强度以及高频熄弧能力四个要素;所述主变压器仿真模块采用ATP-EMTP中三相对称非线性电感Type-96模型模拟变压器的磁化特性,其中Type-96非线性电感表示励磁电流和磁通的关系,是通过空载和短路试验获得变压器的空载特性曲线进而用ATP-EMTP转

换为磁化曲线;所述电缆仿真模块是在ATP-EMTP中利用type 92元件构建避雷器,包括拥有高于正常伏安特性曲线的避雷器和拥有低于正常伏安特性曲线的避雷器。

[0009] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:所述操作过电压,包括分闸操作过电压、合闸操作过电压、暂态恢复过电压、投切变压器过电压;所述分闸操作过电压是指在断路器或开关进行分闸操作时,由于电气设备的特性以及电力系统的运行状态的因素导致的电压异常增加的现象;所述合闸操作过电压包括计划性合闸操作和自动重合闸操作;所述计划性合闸操作产生的最大过电压为p倍即过电压幅值与稳态工频电压幅值之比;所述自动重合闸操作是线路发生跳闸故障后,有自动装置控制而进行的合闸操作;所述暂态恢复过电压是电力系统发生短路后,断路器分闸开断短路电流,断路器触头分离后,触头间产生电弧,电弧电压过零瞬间,电弧熄灭,触头上产生暂态恢复电压。

[0010] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:所述投切变压器过电压是指切除空载变压器、电抗器以及空载电动机,即开断小的电感性电流;所述切除空载变压器是切除变压器的空载电流,断路器的灭弧能力在空载电流过零之前就将其强制熄弧而被切断,产生截流现象,则在工频电压作用下,流过空载变压器的电流i为流过励磁电感的电流i_L;若空载电流$i=I_0$时发生截断,此时电源电压为U_0,则切断瞬间在电感和电容中所储存的能量为:

[0011]
$$W_L=\frac{1}{2}LI_0^2$$
$$W_C=\frac{1}{2}CU_0^2$$

[0012] 其中,C表示变压器电容,L表示空载变压器的激磁电感;在L、C构成的振荡回路中发生电磁振荡,在某一瞬间,全部电磁能量均变成为电场能量,此时电容C上出现最大电压U_{max},根据能量守恒定律得:

[0013]
$$\frac{1}{2}CU_{\max}^2=\frac{1}{2}LI_0^2+\frac{1}{2}LU_0^2$$
$$U_{\max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

[0014] 若截流瞬间电容上所存储的能量$\frac{1}{2}CU_0^2$,则:

[0015]
$$U_{\max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

[0016] 若截流瞬间I_0值越大,空载变压器的激磁电感L越大,则磁场能量越大;电容越小,同样的磁场能量转化到电容上,产生的过电压越高。

[0017] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:通过避雷器和阻容吸收器实现过电压操作的抑制,具体是对分闸重燃过电压的抑制;所述避雷器的伏安特性高低对过电压的影响程度不同,将避雷器安装在断路器两侧,重燃期间,分闸过电压的幅值受限于避雷器的非线性与断口绝缘强度,重燃结束之后的分闸过电压则仅受限于避雷器的非线性,伏安特性曲线越低,其抑制效果更强;考虑避雷器对合闸预击穿过电压的影响,比于分闸重燃过电压,避雷器对合闸预击穿的抑制效果并不显

著,尤其是高伏安特性避雷器,与分闸仿真类似,伏安特性与安装位置依旧影响抑制效果,伏安特性曲线越低,抑制效果越强,单一避雷器只能限制对应安装处的电压;进一步考虑阻容吸收器对分闸重燃过电压的影响,阻容吸收器不仅限制过电压幅值,还降低振荡频率与上升陡度,电容值大小与抑制效果呈正相关但存在饱和效应,安装位置同样存在影响,但单一的阻容吸收器比单一的避雷器抑制效果更好,阻容吸收器的接入改变了高频回路的振荡参数,对重燃和预击穿过电压均有着出色的抑制效果;考虑阻容吸收器对合闸重燃过电压的影响,相比于避雷器,阻容吸收器在面对幅值不高的合闸过电压不仅可以限制幅值,同时还能降低振荡频率与上升陡度,电容值与安装位置对抑制效果的影响规律与分闸类似。

[0018] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:所述过电压抑制措施通过设置保护设备实现,包括用于限制过电压同值的避雷器和用以降低以至消除振荡过电压RC阻容吸收装置;所述避雷器采用氧化锌避雷器,对于在运行中的10kV发电机其相对地和相对相之间的绝缘所能承受的过电压数值用电机耐压水平公式进行计算,表示为:

[0019] $$U_s=\sqrt{2}(2U_e+1)\times 0.75\times K$$

[0020] 其中,U_e为发电机的额定电压,K为冲击系数;氧化锌避雷器采用星形接线保护发电机,当发生单相接地故障时,健全相对地电压升至线电压并允许运行mh,此时计算氧化锌避雷器所承受的工频电压最大U_{gm},为保证氧化锌避雷器的安全运行,其标称电压U_{1mA}必须大于U_{gm},计算当氧化锌避雷器中流过nA时其上的残压U_c,将U_c和U_s的数值进行比较,获取采用带串联间隙的氧化锌避雷器,对高压电动机相对地之间的绝缘保护情况。

[0021] 作为本发明所述基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的一种优选方案,其中:当所述阻容吸收装置未接入时,开关开断后C_0与L_0组成一个振荡电路,由于C_0很小,则振荡频率很高,幅值同样很高,当吸收器r1、c1加入后,$C_1>C_0$,C_0可以忽略不计,则此时振荡电路为r1、c1和L1回路;回路中的震荡频率$f=\frac{\omega}{2\pi}$,角频率ω为:

[0022] $$\omega^2=\omega_0^2-\delta^2$$

[0023] 其中,$\omega_0=\sqrt{\frac{1}{LR}}$, $\delta=\frac{R}{2L}$,当$R>2\sqrt{\frac{L}{C}}$时无振荡衰减波,当$R=R_c=2\sqrt{\frac{L}{C}}$时为临界状态,$R_c$为临界电阻值;进一步的,通过仿真分析,可得:在中性点经消弧线圈接地电网中,氧化锌避雷器仅能限制过电压幅值不能改变频率和陡度,存在缺陷,主要能保护相对地绝缘,相间绝缘虽能保护,但方法较繁且价格较高;RC阻容吸收装置是一种有效的限制真空开关操作过电压的设备,不但可以降低来波的幅值,也可降低其来波陡度。

[0024] 第二方面,本发明实施例提供了一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制系统,其包括:构建模块,用于构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;分析模块,用于通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;优化模块,用于基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

[0025] 第三方面,本发明实施例提供了一种计算机设备,包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,其中:所述处理器执行所述计算机程序时实现上述的基于ATP-EMTP

仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的任一步骤。

[0026] 第四方面,本发明实施例提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其中:所述计算机程序被处理器执行时实现上述的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的任一步骤。

[0027] 本发明有益效果为本发明通过构建精确的水电站10kV系统仿真模型,结合ATP-EMTP软件进行全面的过电压分析,实现了对各类操作过电压的准确预测和有效抑制。该方法不仅提高了系统稳定性和可靠性,降低了设备损坏风险,还优化了保护策略和运行方案,提升了经济效益。同时,结合地表电位时空分布的分析,增强了接地网故障诊断能力,为系统设计和改造提供了科学依据,推动了水电站过电压抑制技术的创新发展。这种系统性的解决方案显著提升了水电站10kV系统的整体性能和安全水平。

附图说明

[0028] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。其中:

[0029] 图1为三相仿真电路示意图;

[0030] 图2为真空断路器仿真模块图;

[0031] 图3为主变压器仿真模块图;

[0032] 图4为两种避雷器伏安特性曲线图;

[0033] 图5为阻容吸收器电气结构图;

[0034] 图6为分闸操作过电压结果图;

[0035] 图7为A相分闸操作过电压结果图;

[0036] 图8为B相分闸操作过电压结果图;

[0037] 图9为C相分闸操作过电压结果图;

[0038] 图10为计划性合闸操作过电压仿真结果图;

[0039] 图11为自动重合闸操作过电压仿真结果图;

[0040] 图12为暂态恢复过程仿真电压结果图;

[0041] 图13为暂态恢复过程仿真电流结果图;

[0042] 图14为开断主变压器低压侧仿真电压结果图;

[0043] 图15为开断主变压器高压侧仿真电压结果图;

[0044] 图16为未安装避雷器时分闸过电压仿真电压结果图;

[0045] 图17为安装避雷器时分闸过电压仿真电压结果图;

[0046] 图18为未安装避雷器时合闸预击穿过电压仿真电压结果图;

[0047] 图19为安装避雷器时合闸预击穿过电压仿真电压结果图。

具体实施方式

[0048] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合说明书附图对本发明的具体实施方式做详细的说明,显然所描述的实施例是本发明的一部分实施例,而

不是全部实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都应当属于本发明的保护的范围。

[0049] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明,但是本发明还可以采用其他不同于在此描述的其它方式来实施,本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似推广,因此本发明不受下面公开的具体实施例的限制。

[0050] 其次,此处所称的“一个实施例”或“实施例”是指可包含于本发明至少一个实现方式中的特定特征、结构或特性。在本说明书中不同地方出现的“在一个实施例中”并非均指同一个实施例,也不是单独的或选择性的与其他实施例互相排斥的实施例。

[0051] 实施例1

[0052] 参照图1～图19,为本发明第一个实施例,该实施例提供了基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法,包括:

[0053] 在详细介绍本发明的实施例之前,为了清楚起见,首先说明本发明的背景经过:

[0054] 2021年08月29日08时03分110kV三回送出线路运行正常;110kV母线I、II段联络运行正常;1B、2B运行正常,其中1B中性点直接接地、2B中性点间隙接地;10kV厂用电I、II分段运行。4台机组运行,1F机组带有功22.2MW,2F机组带有功23MW,3F机组带有功22.2MW,4F机组带有功22MW,带负荷90MW。

[0055] 8点03分33秒开始,监控系统报10kV II段母线PT绝缘降低、3F发电机定子接地、4F发电机定子接地、4F发电机保护装置RCS-985S闭锁,8点05分40秒4F发电机差动保护动作及发电机出口断路器分闸,8点07分4F机组一般事故停机正常。

[0056] 维护人员到现场处置:

[0057] 检查一次设备:检查发现4F机组励磁变4LB高压侧隔离刀闸943G开关柜前柜门已被冲开,柜内三只干式过电压吸收器已损坏,其中B相吸收器的电阻已完全烧毁,A相和B相吸收器的电阻部分金属丝烧毁;B相与母排的连接线有过热现象,A相和C相与母排的连接线脱落;其它设备有明显炭灰痕迹,未发现有明显异常;前后柜门有轻微变形。经现场确认,烧毁过电压吸收器型号为LGQ10-0.2/100-1,生产厂家为锦州锦容特种电容器厂。损坏吸收器的电容检查情况(测量仪器:万用表FULEK 18B+):A相电容值0.203μF;B相电容值0.19μF;C相电容值0.205μF。因ABC三相电阻已烧毁,无法测量电阻值。

[0058] 检查二次设备:现场检查4F机组发电机保护屏,发现RCS-985RS、装置上告警信号和跳闸信号灯亮,打印保护动作录波图进行分析。从录波图分析,故障发生时,机端及中性点电流远远超过了额定值,机端电流二次值最大达到100A,中性点二次侧电流最大达到了10A,差流二次侧最大值达到了110A左右,差流二次有效值为78A(差动启动值:0.2Ie;差动速断定值:4Ie;Ie＝4.064A,电流互感器变比2500/5),导致发电机比率差动动作,保护动作正确。

[0059] 将4F励磁变高压开关柜清理干净,人员撤离,办理电气工作票终结手续。运行人员摇测4F机组励磁变高压侧对地绝缘为10MΩ,4F机组定子绝缘吸收比(R60/R15)＝20/7MΩ,4F机组转子绝缘为3MΩ。各设备绝缘值均合格。

[0060] 13时30分,运行人员恢复4F机组安全措施,将机组恢复备用。13时45分,4F机组开机至空转,各部检查无异常,空转运行一个多小时,检查机组未见异常。

[0061] 15:00现地进行4F机组零起升压,缓慢升压至额定电压,在升压过程监视发电机、

各开关柜、机旁二次设备运行正常。随后,励磁逆变灭磁正常。

[0062] 15:35监控发4F机组“建压”令,建压正常。

[0063] 15:504F机组并网带负荷,逐步加负荷至30MW,检查机组电流、电压、保护采样值均正确,励磁装置工作正常,机组运行正常。

[0064] 根据上面的分析故障主要原因是绝缘破坏而引起的短路。发生点在断路器发电机侧阻容吸收器B相电阻逐渐老化,在电阻上的压降增加,造成电阻发热增加,电阻的局部刻槽电阻特别是有些金属丝在电流数值大时,刻槽间很容易打火烧坏,逐渐将绝缘套烧坏,在电阻及绝缘套烧坏的过程中,存在通过电容器对地放电现象,当柜内导电颗粒和烟雾达到一定浓度,引发ABC三相短路,将A、C相的电阻及绝缘套烧坏,冲击力将A、C相与母排的连接线击落(连接线完好),为阻容过电压吸收器设备故障引起。

[0065] S1:构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度。

[0066] 青居水电站采用4台发电机组,型号为SFWG34-64/6700,每台发电机的额定容量为36.96MVA,额定电压为10.5kV。发电机组的型式为三相同步、卧轴、灯泡贯流式水轮发电机。主变压器型号为SF9-80000/110,额定容量80MVA,额定电压为110/10.5kV。两段10kV厂用电通过限流电抗器从扩大单元母线引接,电缆线路连接发电机出口和限流电抗器,以及限流电抗器和厂用电设备之间。发电机出口断路器选用伊顿公司的150VCP-WRG50型真空断路器110kV侧采用单母线分段4回出线,用于将发电机产生的电能输送到目的地,满足用电需求。基于现场实测数据,青居110kV水电站1号主变压器(型号SF9-80000/110)的10kV侧EMPT仿真模型如图1所示。

[0067] 在前面的分析中可以发现,断路器在切除空载变压器时是过电压产生的重要影响因素。切除空载变压器引起的过电压幅值近似的与截流值I0成正比,截流值与断路器的性能有关,每种类型的断路器每次开断时的截流值I0有很大的分散性。断路器在电流过零以后,断口间存在着绝缘强度恢复和暂态恢复电压增长的两个过程。当暂态恢复电压超过绝缘恢复强度时,就会发生电弧“重燃”。青居水电站采用伊顿150VCP-WRG50型断路器,本文根据Helmer真空断路器模型,该模型具有截流值、介质动态绝缘强度和高频熄弧能力3个基本特性参数,根据具体情况在ATP-EMTP的MODLES模块中建立的的真空断路器模型考虑了真空断路器的燃弧时间、截流、绝缘强度以及高频熄弧能力这四个要素,真空断路器仿真模块如图2所示。

[0068] 图2中T为控制开关,其状态由MODEL模块的输出TACS决定。MODEL模块有3个输入量和3个输出量。输入量为断路器两侧的电压U1和U2以及流过断路器的电流I。输出量为断路器状态控制信号TACS、断路器触头间介质绝缘强度DS和暂态恢复电压TRV。MODEL模块根据当前输入量和预定的规则,计算输出量来实时控制开关T的状态。为了更好的模拟真实环境中断路器的投切和电弧特性,仿真模块参阅相关文献后在触头两端并联了包括10Ω电阻、0.05uH电感和1nF电容串联后的支路。

[0069] 如图3所示,构建变压器模型首先要考虑对应匝数比的绕组之间的电磁耦合,其次要考虑铁芯的磁化特性、漏抗和绕组电阻,再次,还要考虑绕组间和绕组对地的电容等。由于变压器含有绕组和铁芯元件,其电气参数、励磁特性等随作用的电压波形、频率变化而变化,呈现鲜明的频率特性。在电磁暂态分析时准确建立变压器模型比较困难。一是因为变压

器和并联电抗器的非线性特性和频率相关性;二是因为变压器的绕组连接方式、铁芯结构多样;三是在建模时需要考虑很多因素,如线圈的自感和互感、泄露磁通、集肤效应、线圈的邻近效应、铁芯饱和、磁滞及电容效应等。在考虑断路器操作引起的操作过电压以缓波前过电压频域对变压器仿真建模。青居水电站主变压器型号为SF9-80000/110,其铭牌参数如下表1所示:

[0070] 表1主变压器铭牌参数表

[0071]

容量(kVA)	额定电压	短路阻抗	空载损耗	负载损耗	连接组别
80000	110/10.5				Dyn11

[0072] 为了仿真高频变压器铁芯的非线性特性,采用ATP-EMTP中三相对称非线性电感Type-96模型来模拟变压器的磁化特性。而感Type-96非线性电感需要的是励磁电流和磁通的关系,可以通过空载和短路试验获得变压器的空载特性曲线从而用ATP-EMTP转换为需要的磁化曲线。

[0073] 构建电缆仿真模块,现场联接断路器与主变压器使用的三芯电缆型号为YJV22-10kV3×120,长度约150m,电源侧电缆使用同样的参数为12m。电缆的单位长度电感约为0.4μH/m,对地电容为22nF,折和为183pF/m。在断路器开断的暂态过程中,也应考虑电缆的交流电阻,单位长度为0.0033Ω/m,电缆相间的耦合电容为70pF/m。

[0074] 构建避雷器仿真模块,避雷器实质上一种放电器并联在被保护设备附近。当电压超过避雷器放电电压时,避雷器先放电,限制过电压的发展,保护设备免遭绝缘击穿。氧化锌避雷器由于其优异的非线性特性,广泛应用于电力系统的过电压防护领域。

[0075] 10kV系统中常规电站用避雷器,其额定电压U_r为17kV。直流1mA下的参考电压U_{1mA}不低于24kV,5kA标称放电电流下的雷电冲击残压不超过45kV。为了探究伏安特性的差异对抑制效果的影响,在ATP-EMTP中利用type 92元件额外构建了两种避雷器,一种是拥有高于正常伏安特性曲线的避雷器,一种是拥有低于正常伏安特性曲线的避雷器。两种避雷器伏安特性曲线如图4所示。

[0076] 投切感性负荷时出现的操作过电压不但具有较高的幅值,而且伴随着非常高的振荡频率,导致感性设备相邻匝间电位差很大,极易破坏匝间绝缘,所以不仅要降低过电压幅值,而且要降低过电压振荡频率。阻容吸收器的电气结构比较简单,如图5所示,每相为电容、电阻的等值串联回路。

[0077] S2:通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略。

[0078] 分闸操作过电压是指在断路器或开关进行分闸操作时,由于电气设备的特性以及电力系统的运行状态等因素导致的电压异常增加的现象。分闸操作过电压在电力系统中出现比较频繁,而且波及全线,采取适当措施来消除和限制这种过电压,对于降低电网的绝缘水平有很大意义。影响这种操作过电压的主要因素包括:(1)断路器的性能。采用灭弧性能好的断路器可以防止或减少电路重燃次数,从而使过电压的最大值降低;(2)母线上有其他出现时相当于加大了母线电容,电弧重燃时残余电荷迅速重新分配,改变了电压的起始值使其更接近于稳态值,使得过电压减小;(3)线路侧装有电磁式电压互感器等设备。它们的存在将使线路上的剩余电荷有了附加的释放路径,降低线路的残余电压,从而降低重燃过电压。

[0079] 分闸操作过电压以切除厂电所在的线路为分析对象,未加过电压保护措施。设置随机单次分闸时间A相0.0239,B相0.0259,C相为0.0269,分闸后操作过电压最大幅值为3.9p.u.。

[0080] 电力系统中线路合闸通常分为两种情况:即计划性的操作合闸和自动重合闸,由于初始条件的差别,由于线路电压在合闸前后发生突变,变化的电磁暂态过程使自动重合闸过电压的情况更为严重。如果来考虑三相合闸不同时所引起的相互影响以及空载长线路的电容效应等,实际出现的过电压幅值会受到一系列因素的影响,主要为:(1)合闸相位,合闸时电源电压的瞬时值取决于它的相位θ,相位的不同直接影响过电压的幅值;(2)线路上残压的变化,其极性和大小,多过电压幅值影响也较大。在自动重合过程中,由于绝缘子存在一定的泄漏阻抗电阻,大于有0.5的间歇期,线路残压会下降10%~30%;(3)线路损耗,线路上的电阻和过电压较高时线路上产生的电晕都能构成能量的损耗,消耗了过渡过程的能量,使得过电压降低。

[0081] 计划性合闸操作产生的最大过电压为2.0倍(过电压幅值与稳态工频电压幅值之比)。合闸空载长线路的分布参数等值电路分析可知,其基波分量振幅A1能较稳态分量振幅A大,在某种情况下,这种过电压的倍数可能大于2。由于回路中存在的损耗,实测的过电压的最大倍数为1.9~1.96倍,通常为1.65~1.85倍。计划性合闸分闸操作过电压以切除厂电所在的线路为分析对象,未加过电压保护措施。

[0082] 根据计划性合闸操作的情况,线路上没有残余电荷,初始电压$U_c(0)=0$。如果是自动重合闸的情况,线路上有一定的残余电荷和初始电压,重合闸时振荡将更加激烈。自动重合闸是线路发生跳闸故障后,有自动装置控制而进行的合闸操作。设断路器重合闸之前,线路残余电压已下降30%,考虑最严重的情况,即重合闸时电源电压为-Uph(相电压),则重合闸时暂态过程中的过电压为$-Uph+[-Uph-(1-0.3)\times1.4Uph]=-2.98Uph$,即接近3倍。在实际过程中,由于在重合闸时电源电压不一定在峰值,也不一定与线路残余电压极性刚好相反,过电压要低一些。

[0083] 电力系统发生短路后,断路器分闸开断短路电流。断路器触头分离后,触头间产生电弧。电弧电压过零瞬间,电弧熄灭,触头上产生暂态恢复电压。电压恢复过程中,首先出现在弧隙间的具有瞬态恢复电压utr(TRV)。瞬间恢复电压存在的时间很短,只有十几微秒至几毫秒。瞬态电压消失后,弧隙出现的是由工频电源决定的电压,称为工频恢复电压upr。影响瞬态恢复电压的主要因素有:工频恢复电压的幅值,线路中的电感、电容和电阻的大小以及它们的分布情况,线路长度,开断时的电弧特性等。

[0084] 在电力系统运行中,切除空载变压器、电抗器以及空载电机等,都是电力系统中常见的操作。正常运行时,空载变压器、电抗器以及空载电动机表现为一个电感负载。因此,切除空载变压器、电抗器以及空载电动机就是开断小的电感性电流,这时可能会出现很高的电压。仿真以切除空载变压器模型为分析对象,仿真研究断路器动作后瞬间的暂态现象,所以模型中没有考虑水力发电机的模型。

[0085] 图14和图15为抑制过电压措施变压器两侧电压仿真波形,断路器切除空载变压器产生的过电压幅值较大,在高低压两侧的幅值分别到达39.86kV(4.64p.u.)和246.53kV(2.39p.u.)。这种过电压持续时间不长,需要采用金属氧化锌避雷器等设备加以限制。

[0086] 切除空载变压器是切除变压器的空载电流,其值一般为变压器的额定电流的

0.2%～4%,有效值通常为几安到几十安,断路器的灭弧能力在空载电流过零之前就将其强制熄弧而被切断,产生截流现象,则在工频电压作用下,流过空载变压器的电流i为流过励磁电感的电流i_L;

[0087] 若空载电流$i=I_0$时发生截断,此时电源电压为U_0,则切断瞬间在电感和电容中所储存的能量为:

[0088]
$$W_L=\frac{1}{2}LI_0^2$$
$$W_C=\frac{1}{2}CU_0^2$$

[0089] 其中,C表示变压器电容,L表示空载变压器的激磁电感;

[0090] 在L、C构成的振荡回路中发生电磁振荡,在某一瞬间,全部电磁能量均变成为电场能量,此时电容C上出现最大电压U_{max},根据能量守恒定律得:

[0091]
$$\frac{1}{2}CU_{\max}^2=\frac{1}{2}LI_0^2+\frac{1}{2}LU_0^2$$
$$U_{\max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

[0092] 若截流瞬间电容上所存储的能量$\frac{1}{2}CU_0^2$,则:

[0093]
$$U_{\max}=\sqrt{\frac{L}{C}I_0^2+U_0^2}$$

[0094] 若截流瞬间I_0值越大,空载变压器的激磁电感L越大,则磁场能量越大;电容越小,同样的磁场能量转化到电容上,产生的过电压越高。一般情况下,I_0值虽然不大,但由于变压器的特征阻抗值很大,故能产生很高的过电压。实际过程要复杂很多,断路器的性能,变压器的参数、中性点接地方式以及与变压器相连的电缆线段都会对切除空载变压器过电压产生影响。基于以上分析对断路器、变压器、电缆等根据实际参数搭建。

[0095] 10kV真空断路器在进行分闸操作时,因截流重燃常伴随着幅值频率极高的过电压,但可以产生频率幅值极高的过电压,需寻找合适的措施加以抑制。目前主流的过电压抑制设备主要有避雷器、阻容吸收器等,两者对过电压的抑制原理有所不同。本节考虑避雷器伏安特性高低、阻容吸收器电容值大小以及两种保护设备安装位置和数量对分闸重燃过电压的抑制效果。

[0096] 避雷器对分闸重燃过电压的影响为:

[0097] 避雷器的安装位置在断路器a、b两侧,将仿真结果记录于表2并做对比。可以看出重燃期间,分闸过电压的幅值受限于避雷器的非线性与断口绝缘强度,重燃结束之后的分闸过电压则仅受限于避雷器的非线性。伏安特性曲线越低,其抑制效果更强。

[0098] 表2避雷针安装位置对比结果表

[0099]

安装位置	低伏安特性避雷器		高伏安特性避雷器	
	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV
a	65.10	46.87	62.39	36.82
b	64.09	41.05	60.71	33.84

[0100] 单一的避雷器只能限制某一处的过电压,为了同时限制USR和UST,需要在位置a和b同时加装两支低伏安特性避雷器。图17所示为仿真电压波形,USR和UST幅值分别为31.62kV(3.69p.u.)和28.37kV(3.31p.u.),较未加抑制措施时分别下降了51.5%和45.9%;虽然避雷器可以较好地限制过电压幅值,却不能降低振荡频率与上升陡度。

[0101] 总体而言,避雷器能够限制过电压幅值,伏安特性越低,抑制效果越好,安装位置存在影响,具有保护范围,需采用低伏安特性避雷器安装在a和b两处,由于避雷器的非线性特性,在面对幅值较高的分闸重燃过电压时抑制效果明显,在面对幅值不高的合闸预击穿过电压时限制并不明显。

[0102] 与分闸仿真类似,改变安装位置,得到两种避雷器抑制合闸过电压的仿真结果如表3所示:

[0103] 表3避雷器抑制合闸过电压的仿真结果表

[0104]

安装位置	低伏安特性避雷器		高伏安特性避雷器	
	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV
a	19.05	16.46	18.98	15.87
b	19.05	16.46	19.10	15.64

[0105] 结论如下:相比于分闸重燃过电压,避雷器对合闸预击穿的抑制效果并不显著,尤其是高伏安特性避雷器。与分闸仿真类似,伏安特性与安装位置依旧影响抑制效果,伏安特性曲线越低,抑制效果越强,单一避雷器只能限制对应安装处的电压。为了同时限制USR和UST,在位置a和b同时加装两支低伏安特性避雷器。图19为仿真电压波形,USR和UST幅值分别为17.30kV(2.02pu)和15.36kV(1.79pu),较未加抑制措施时分别下降了10.1%和7.2%。预击穿结束之后,USR和UST波形均有一个高频分量叠加在工频之上,频率约在20kHz,这是因为合闸之后三相负载侧与电源侧均接通,此时振荡频率由负载侧与电源侧电感电容同时决定。

[0106] 阻容吸收器不仅可以限制过电压幅值,还可以降低振荡频率与上升陡度,电容值大小与抑制效果呈正相关但存在饱和效应,与避雷器类似,安装位置亦存在影响,但单一的阻容吸收器比单一的避雷器抑制效果更好。阻容吸收器的接入改变了高频回路的振荡参数,对重燃和预击穿过电压均有着出色的抑制效果。

[0107] 将阻容吸收器分别安装在位置a、b,得到仿真结果如表4所示。从总体上来看,阻容吸收器对分闸重燃过电压的幅值有良好的抑制效果,它的接入改变了高频振荡回路,使得高频电流的时间常数$\tau=RC$会增大,电流过零时刻延长,触头开距增大,从而减少了重燃概率,抑制了过电压的发展,限制了过电压的幅值。纵向比较,电容值直接影响过电压的抑制

效果,电容值与抑制效果强弱呈正相关且存在饱和效应,由于工艺限制,难以同时满足小体积与大电容,因此选取0.10μF/100Ω的阻容吸收器。横向比较,安装位置影响抑制效果,单一阻容吸收器安装a、b位置时难以抑制USR,而在同时安a、b位置抑制USR和UST,此时有较好的抑制效果。

[0108] 表4阻容吸收器仿真结果表

[0109]

安装位置	0.05μF/100 Ω		0.10μF/100 Ω		0.15μF/100 Ω	

[0110]

	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV
a	19.05	16.46	18.98	15.87	18.98	15.87
b	19.05	16.46	19.10	15.64	19.10	15.64

[0111] 在位置a、b位置同时加装两支0.10μF/100Ω阻容吸收器,USR和UST幅值分别为32.74kV(3.82p.u.)和27.36kV(3.19p.u.),抑制效果略强于单一阻容吸收器安装在a和b位置。此外,阻容吸收器不仅能够通过吸收电容降低振荡频率与上升陡度,而且能通过吸收电阻率加快振荡衰减,USR的高频分量振荡频率由4.36kHz变为1.80k Hz。

[0112] 阻容吸收器对合闸重燃过电压的影响与分闸仿真类似,改变安装位置,得到3种阻容吸收器抑制合闸过电压的仿真结果如表5所示:

[0113] 表5阻容吸收器抑制合闸过电压的仿真结果表

[0114]

安装位置	0.05μF/100 Ω		0.10μF/100 Ω		0.15μF/100 Ω	
	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV	UsR/kV	UsT/kV
a	18.43	13.44	18.21	12.47	18.04	12.18
b	18.96	13.13	18.74	12.19	18.61	11.95

[0115] 相比于避雷器,阻容吸收器在面对幅值不高的合闸过电压依旧有着出色的抑制效果,不仅可以限制幅值,同时还能降低振荡频率与上升陡度。电容值与安装位置对抑制效果的影响规律与分闸仿真中类似。在位置a和b同时加装两支0.10μF/100Ω阻容吸收器,此时USR和UST的幅值分别为14.97kV(1.75p.u.)和12.01kV(1.40p.u.),较未加抑制措施时分别下降了27.2%和37.0%。对比避雷器,阻容吸收器不仅能够很好的限制幅值,还能降低振荡频率,加速衰减,首次预击穿后1ms以内,振荡频率由原来3.74k Hz降低到1.65k Hz,且在预击穿结束后,叠加在工频之上的高频振荡分量衰减非常迅速。

[0116] 在变压器空载投入和外部故障被切除后,变压器的电压恢复时,可能会产生很大的冲击励磁电流,通常称为励磁涌流。变压器铁芯的非线性是产生励磁涌流的原因。励磁涌流具有以下特点:(1)含有很大的非周期分量,使其波形偏于时间轴的一侧,在开始瞬间衰减很快;(2)含有大量的高次谐波分量,主要是二次谐波,对于三相变压器,其中有一相的二次谐波分量可超过基波分量的60%以上。(3)起始的数个波形出现间断,其间断角不小于80,甚至可达到120以上。

[0117] S3:基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

[0118] 过电压危及电气设备的安全运行,改进真空断路器的触头材料仅能改善截流过电压的或然率,对过电压起抑制作用。因此设置专用保护设备是必须的。目前,通常采用下列两种保护设备:一种是用于限制过电压同值的避雷器;另一种是用以降低以至消除振荡过电压RC阻容吸收装置。

[0119] 氧化锌(ZnO)避雷器:

[0120] 对于在运行中的10kV发电机其相对地和相对相之间的绝缘所能承受的过电压数值可用电机耐压水平公式进行计算:

[0121] 表示为:

[0122] $$U_s=\sqrt{2}(2U_e+1)\times 0.75\times K$$

[0123] 其中,U_e为发电机的额定电压;K为冲击系数,日本取1.25,其他取1.1~1.4,本分析取1.15;

[0124] 对于10kV的发电机U_s为25.6kV(峰值)。

[0125] 青居水电站10kV系统中性点经消弧线圈接地。当发生单相接地故障时,健全相对地电压升至线电压并允许运行2h。在此情况下氧化锌避雷器所承受的工频电压最大U_{gm}为16.3kV。为了保证氧化锌避雷器的安全运行,其标称电压U_{1mA}必须大于U_{gm}。则10kV氧化锌避雷器通常取U_{1mA}为18.86kV,其中取U_{1mA}为11.3kV。当不带串联间隙时,其通过100A时的电压U_{100A}与U_{1mA}之比约为1:4。可计算得当氧化锌避雷器中流过100A时其上的残压U_c。10kV氧化锌避雷器的U_c为26.4kV。将U_c和U_s的数值进行比较可以看到,两者几乎相等,所以用无串联间隙的氧化锌避雷器保护高压电动机的相对地之间的绝缘是非常勉强的。其可靠性较差。如果采用带串联间隙的氧化锌避雷器,10kV的氧化锌避雷器产生的U_{100A}为21.5kV,$U_c<U_s$,能较好地保护高压电动机相对地之间的绝缘。

[0126] 当首先开断相开断时加在相对地绝缘上的过电压为加在相对相之间绝缘上过电压2/3,当第二、三相开断时,前者仅为后者的1/2。对于星型所示的接线方式而言,当采用无间隙的氧化锌避雷器时,10kV发电机相对地之间的绝缘上U_{1mA}=18.86kV其相对相之间的绝缘为1.5U_{1mA}(28.3kV);电压值超过或接近10kV发电机U_s的数值。如果将氧化锌避雷器流过100A时的残压作为相对地之间绝缘上的电压,则加在相对相之间绝缘上的电压将比发电机U_s值超的更多。由此可见,无串联间隙的氧化锌避雷器对相对相之间的绝缘不起或基本上起不到保护作用。如采用带串联间隙的氧化锌避雷器,可以查得1.5U_{1mA}为30kV。同样它们都超过发电机U_s数值。因此,这些氧化锌避雷器对相对相之间的绝缘也不能起保护作用。

[0127] 进而采用氧化锌避雷器三相四星形接线,不仅具有相对地的保护功能,而且具有相间保护功能。从运行经验看,它能够有效地限制操作过电压.保护器关于电网连接的三个保护单元采用串联放电间隙的设计方案,使保护残压较低,提高了用电设备的安全性。在保护单元中不串联防电间隙,使之不受寄生、杂散电容的影响,保证性能的稳定性。该过电压保护器性能优良、完善,但结构比较复杂,技术要求高,造价相对较高。

[0128] 当阻容吸收装置未接入时,开关ZK开断后C_0与L_0组成一个振荡电路,由于C_0很小,则振荡频率很高,幅值同样很高,当吸收器r1、c1加入后,$C_1>C_0$,C_0可以忽略不计,则此时振荡电路为r1、c1和L_1回路;

[0129] 回路中的震荡频率$f=\dfrac{\omega}{2\pi}$,角频率ω为:

[0130] $\omega^2=\omega_0^2-\delta^2$

[0131] 其中，$\omega_0=\sqrt{\frac{1}{LR}}$，$\delta=\frac{R}{2L}$，当$R>2\sqrt{\frac{L}{C}}$时无振荡衰减波，当$R=R_c=2\sqrt{\frac{L}{C}}$时为临界状态，$R_c$为临界电阻值；

[0132] RC吸收器的工作原理就是用它来改变电路的工作状态，让振荡电路变成无振荡电路，以此来抑制电路的操作过电压。为了消除电路的振荡，吸收器的C_1必须足够大，应使得振荡频率至少接近于工频但又不能太大，否则造成浪费。保护器的r1也必须足够大到接近R_c值也不能太大，因为那样会造成能量浪费并影响RC保护器的作用。

[0133] 真空断路器电路中的L_0和C_0大致有一个范围，可用一种或少数几种规格的RC吸收器，能使绝大多数真空断路器操作过电压振荡的频率接近50HZ。其幅值降至约电源电压峰值2倍以下，从而保证电路安全运行。

[0134] 进一步的，通过仿真分析，可得：在中性点经消弧线圈接地电网中，氧化锌避雷器仅能限制过电压幅值不能改变频率和陡度，存在缺陷，主要能保护相对地绝缘，相间绝缘虽能保护，但方法较繁且价格较高；

[0135] RC阻容吸收装置是一种有效的限制真空开关操作过电压的设备，不但可以降低来波的幅值，也可降低其来波陡度。

[0136] 现场测试结果表明普通型及中性点不接地RC保护器能对绝大多数电路起到保护作用，但对某些少数电路中的保护效果尚显不足.双路RC过电压保护器的试验结果表明能够消除操作过电压振荡，其原因是r1、C_1主要保护相间过电压r1、C_2主要保护对地过电压。

[0137] 当使用RC保护器时，加大了网络的电容电流；当单相接地时接地电容电器超过容许值时，系统内会产生弧光接地过电压，幅值可高达3.5倍相电压，持续时间长。因此对电容器额定电压的选择要求更高增大了投资；关于谐波对电容的影响电力系统内的谐波会使RC装置发生电击穿、发热等，由于谐波作用而使RC装置爆炸的事故发生时有发生。

[0138] 则在中性点经消弧线圈接地电网中，氧化锌避雷器仅能限制过电压幅值不能改变频率和陡度，存在缺陷。它主要能保护相对地绝缘，相间绝缘虽能保护，但方法较繁且价格较高。

[0139] 与氧化锌避雷器比较而言RC装置是一种有效的限制真空开关操作过电压的设备。它不但可以降低来波的幅值，也可降低其来波陡度。但它的安装空间尺寸较大，费用高。

[0140] 对于中小型水电发电机组应该选用质量良好的RC保护器和氧化锌避雷器加以并联，尽量布置在机端入口处。氧化锌避雷器可以装在电机真空开关柜内，RC保护器装在电机主引出线处。

[0141] 综上，本发明通过构建精确的水电站10kV系统仿真模型，结合ATP-EMTP软件进行全面的过电压分析，实现了对各类操作过电压的准确预测和有效抑制。该方法不仅提高了系统稳定性和可靠性，降低了设备损坏风险，还优化了保护策略和运行方案，提升了经济效益。同时，结合地表电位时空分布的分析，增强了接地网故障诊断能力，为系统设计和改造提供了科学依据，推动了水电站过电压抑制技术的创新发展。这种系统性的解决方案显著提升了水电站10kV系统的整体性能和安全水平。

[0142] 实施例2

[0143] 参照图1,在第一个实施例的基础之上,本实施例还进一步提供一种基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制系统,包括:

[0144] 构建模块,用于构建水电站仿真模型,分析操作过电压时可能出现的电压异常增加情况,评估其对水电站系统稳定性的影响程度;

[0145] 分析模块,用于通过对操作过电压情况下设备的保护方案进行仿真分析,确定不同设备保护策略;

[0146] 优化模块,用于基于仿真结果,优化水电站运行策略,获取过电压抑制措施。

[0147] 本实施例还提供一种计算机设备,适用于基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法的情况,包括存储器和处理器;存储器用于存储计算机可执行指令,处理器用于执行计算机可执行指令,实现如上述实施例提出的基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法。

[0148] 该计算机设备可以是终端,该计算机设备包括通过系统总线连接的处理器、存储器、通信接口、显示屏和输入装置。其中,该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统和计算机程序。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该计算机设备的通信接口用于与外部的终端进行有线或无线方式的通信,无线方式可通过WIFI、运营商网络、NFC(近场通信)或其他技术实现。该计算机设备的显示屏可以是液晶显示屏或者电子墨水显示屏,该计算机设备的输入装置可以是显示屏上覆盖的触摸层,也可以是计算机设备外壳上设置的按键、轨迹球或触控板,还可以是外接的键盘、触控板或鼠标等。

[0149] 本实施例还提供一种存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现如上述实施例提出的实现基于ATP-EMTP仿真水电站10kV系统过电压抑制方法。

[0150] 本实施例提出的存储介质与上述实施例提出的数据存储方法属于同一发明构思,未在本实施例中详尽描述的技术细节可参见上述实施例,并且本实施例与上述实施例具有相同的有益效果。

[0151] 应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

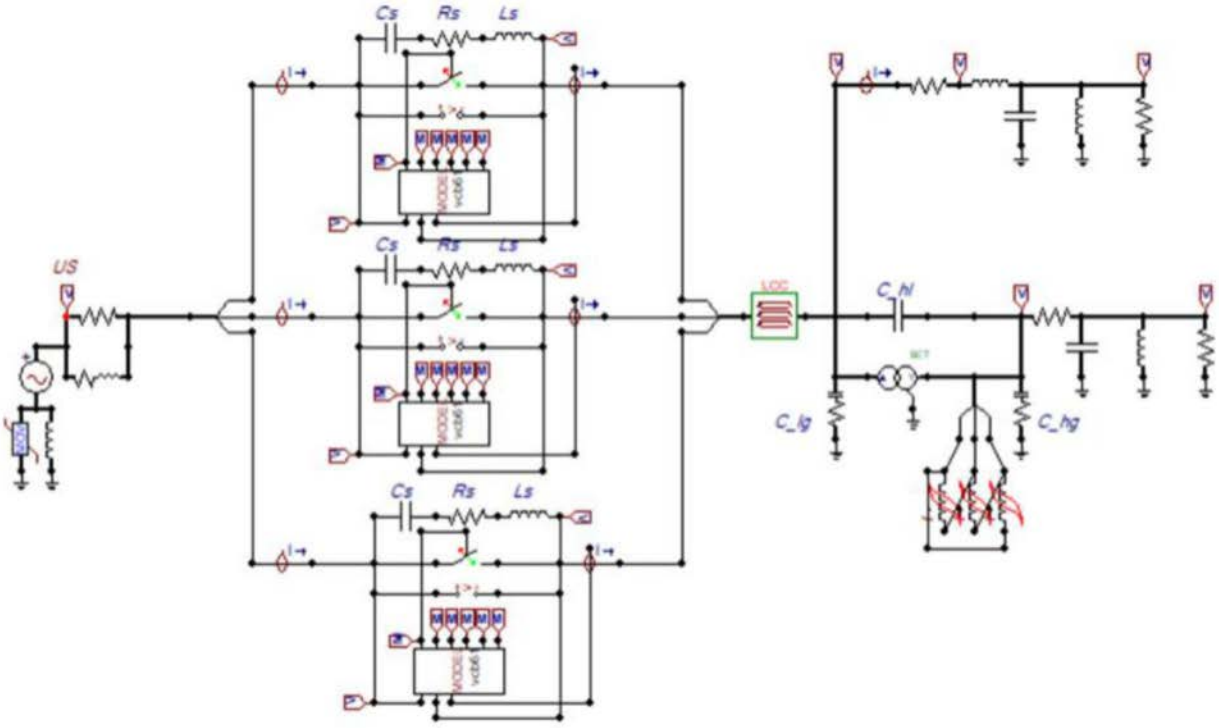


图1

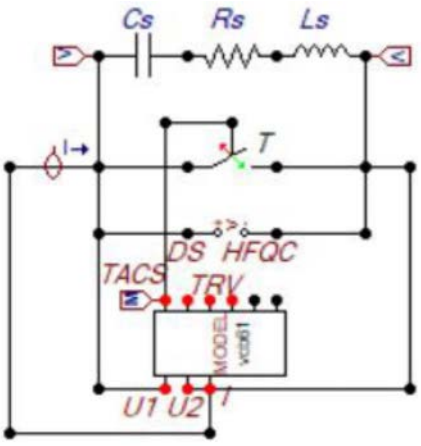


图2

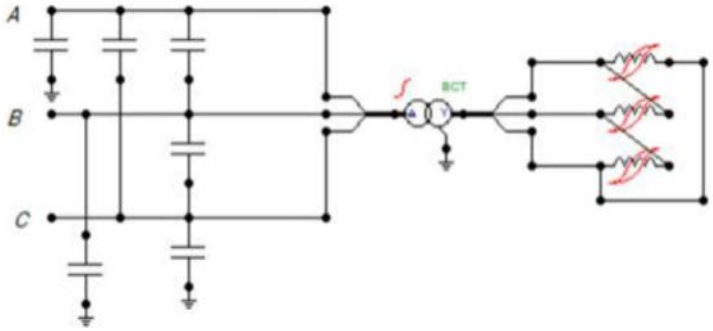

A
B
C
BCT

图3

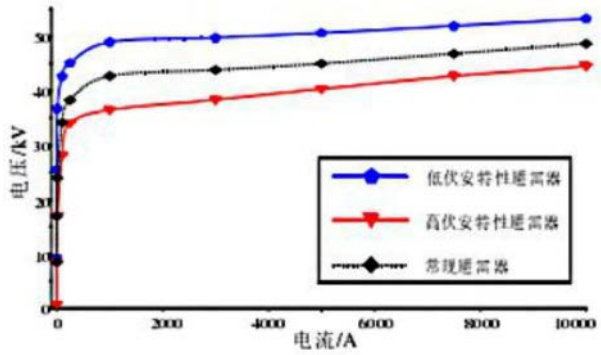

电压/KV
电流/A
0
2000
4000
6000
8000
10000
低伏安特性避雷器
高伏安特性避雷器
常规避雷器

图4

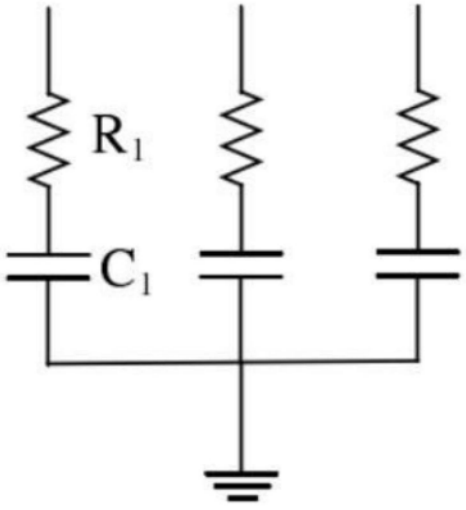

R1
C1

图5

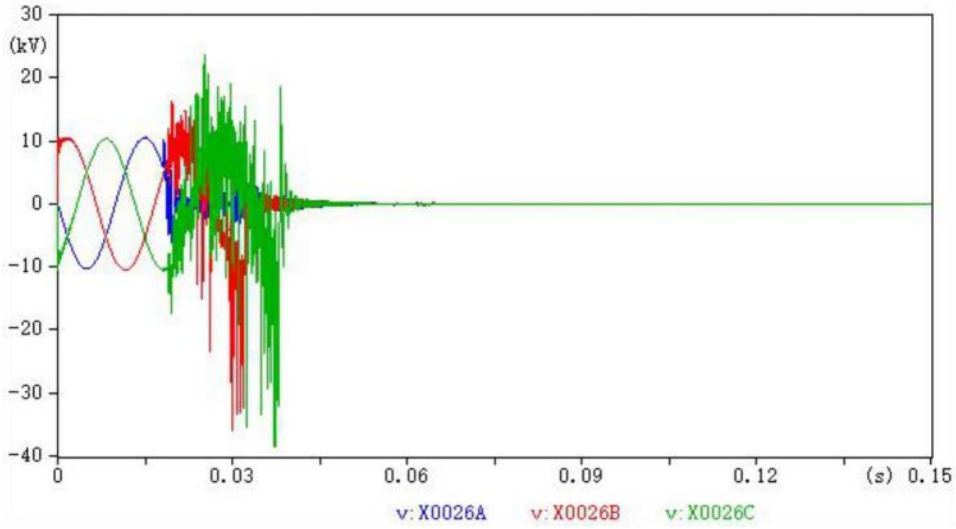

30
(kV)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
0
0.03
0.06
0.09
0.12
(s) 0.15
v:X0026A
v:X0026B
v:X0026C

图6

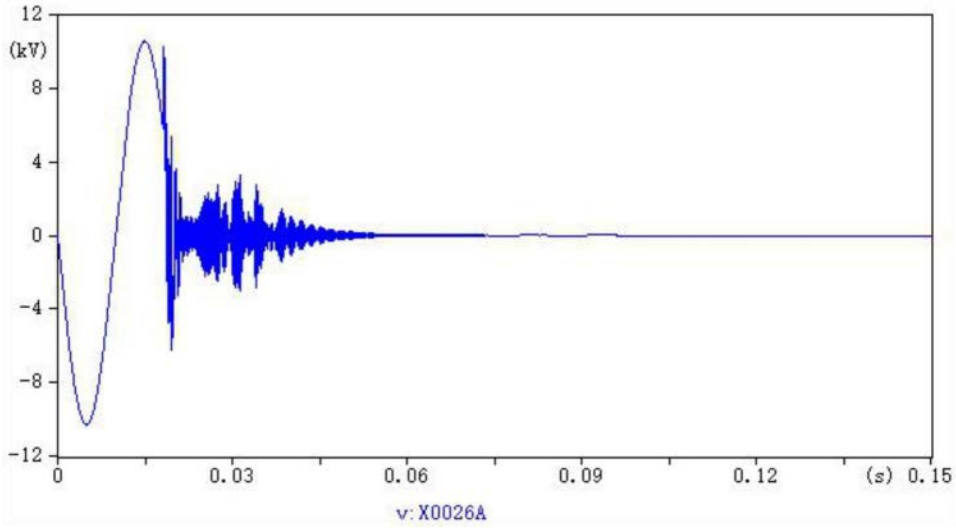

12
(kV)
8
4
0
-4
-8
-12
0
0.03
0.06
0.09
0.12
(s) 0.15
v:X0026A

图7

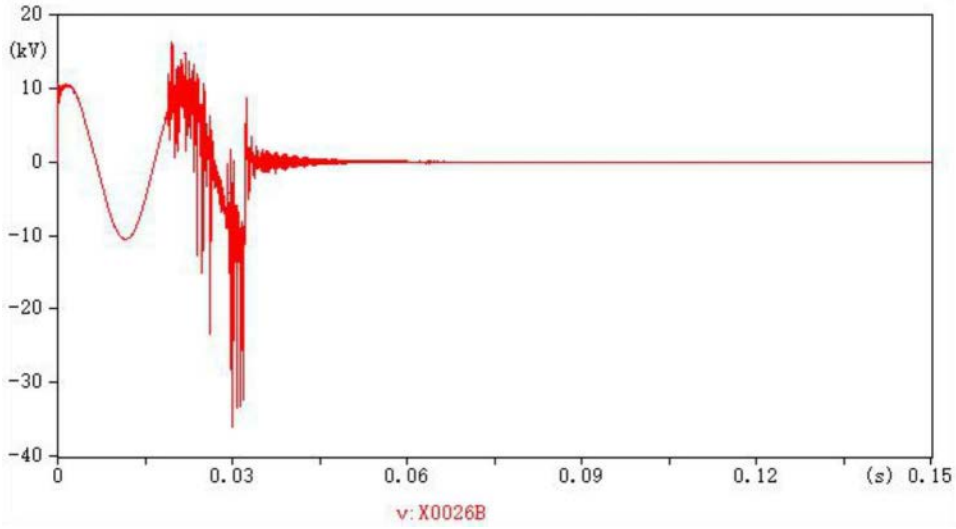

20
(kV)
10
0
-10
-20
-30
-40
0
0.03
0.06
0.09
0.12
(s) 0.15
v:X0026B

图8

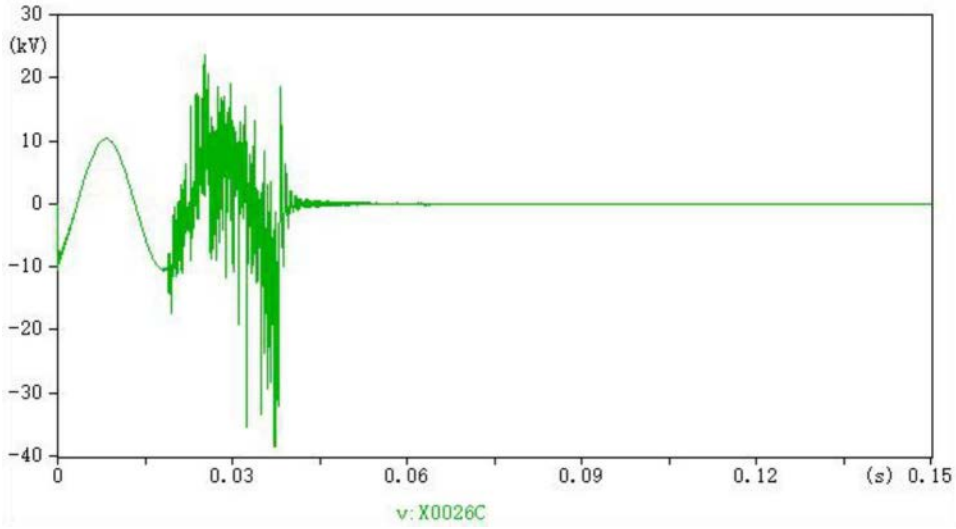

30
(kV)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
0
0.03
0.06
0.09
0.12
(s) 0.15
v:X0026C

图9

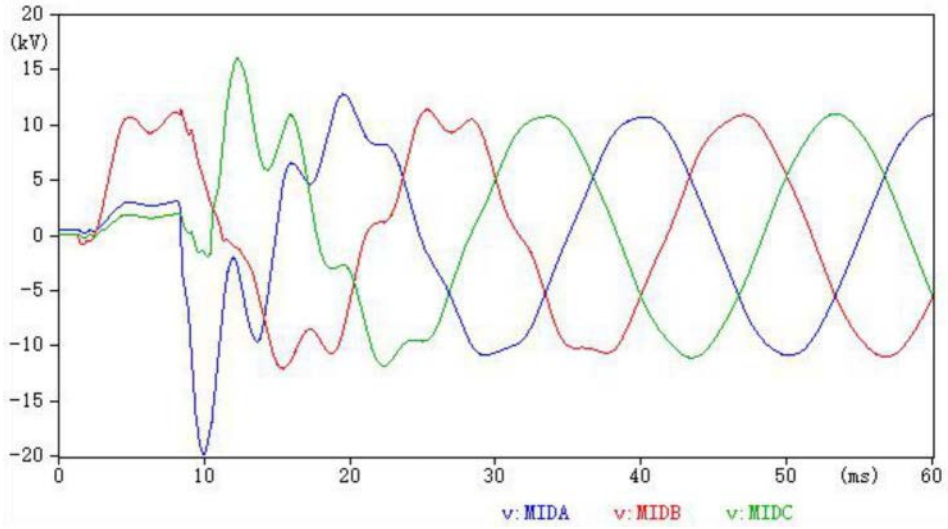

20
(kV)
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
0
10
20
30
40
50
(ms)
60
v:MIDA
v:MIDB
v:MIDC

图10

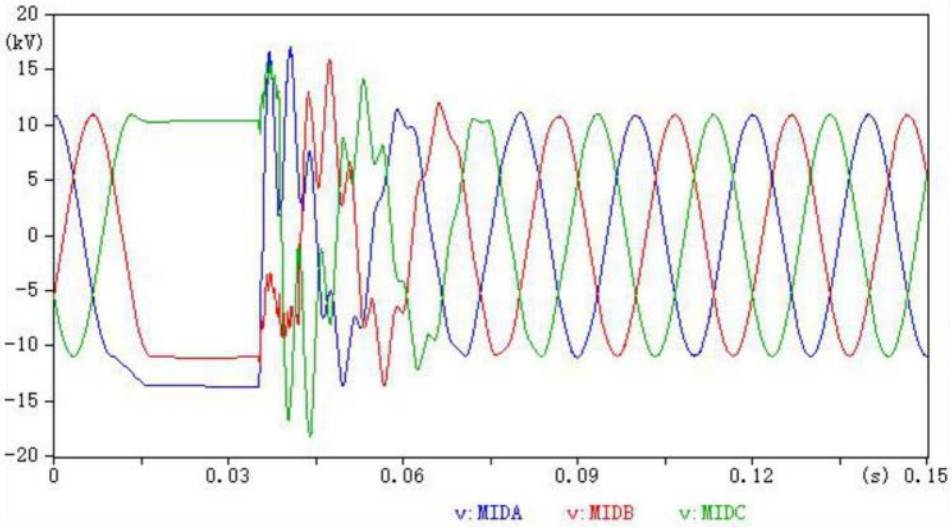

20
(kV)
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
0
0.03
0.06
0.09
0.12
(s)
0.15
v:MIDA
v:MIDB
v:MIDC

图11

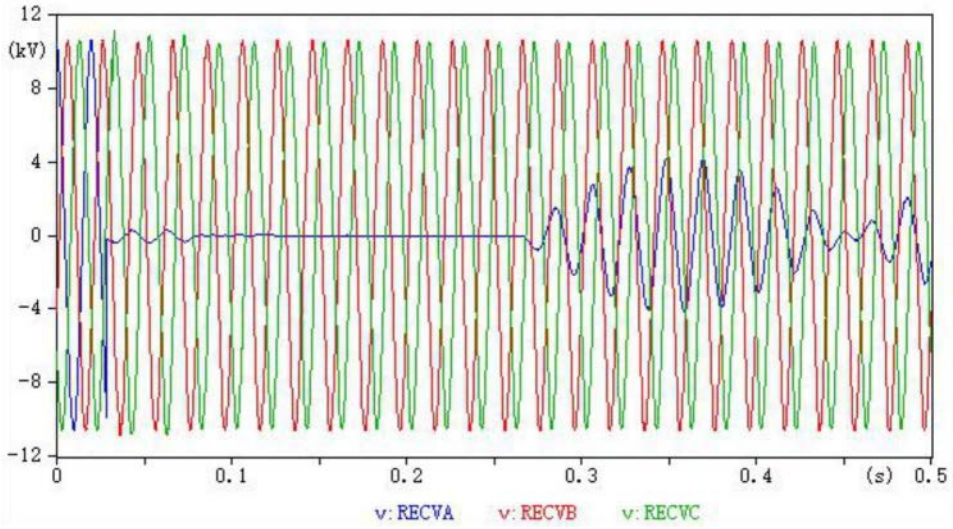

12
(kV)
8
4
0
-4
-8
-12
0
0.1
0.2
0.3
0.4
(s)
0.5
v:RECVA
v:RECVB
v:RECVC

图12

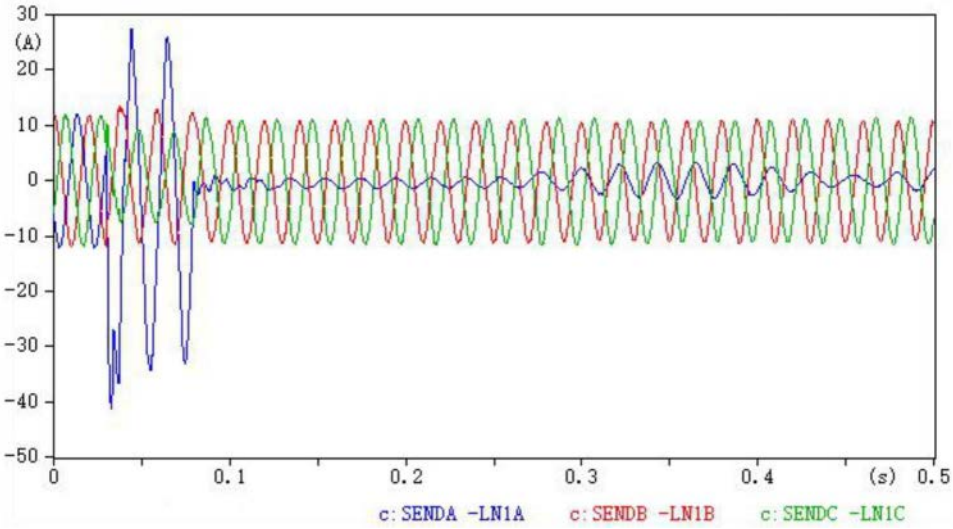

30
(A)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
0
0.1
0.2
0.3
0.4
(s)
0.5
c:SENDA -LN1A
c:SENDB -LN1B
c:SENDC -LN1C

图13

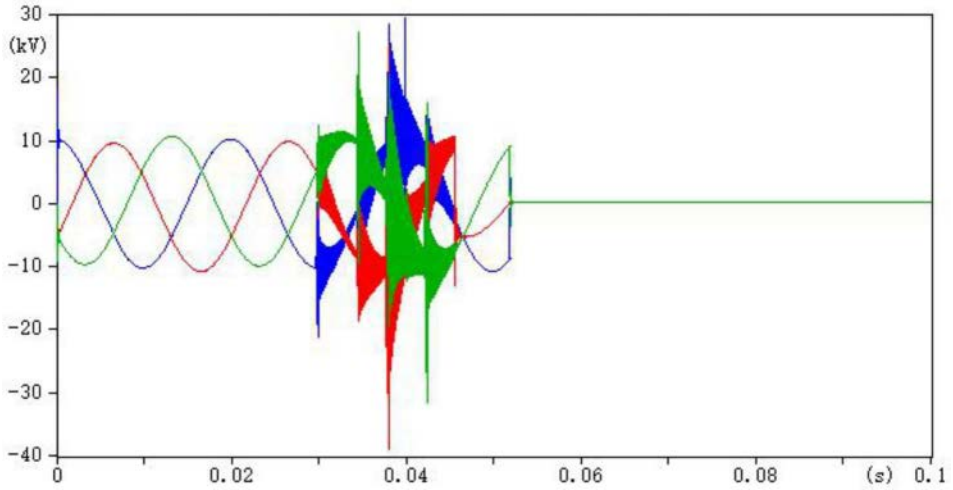

30
(kV)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
0
0.02
0.04
0.06
0.08
(s)
0.1

图14

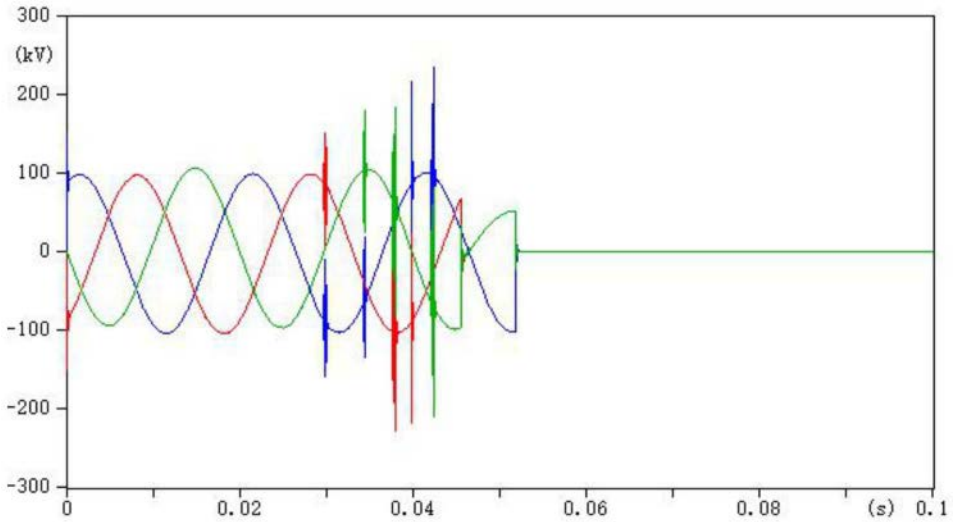

300
(kV)
200
100
0
-100
-200
-300
0
0.02
0.04
0.06
0.08
(s)
0.1

图15

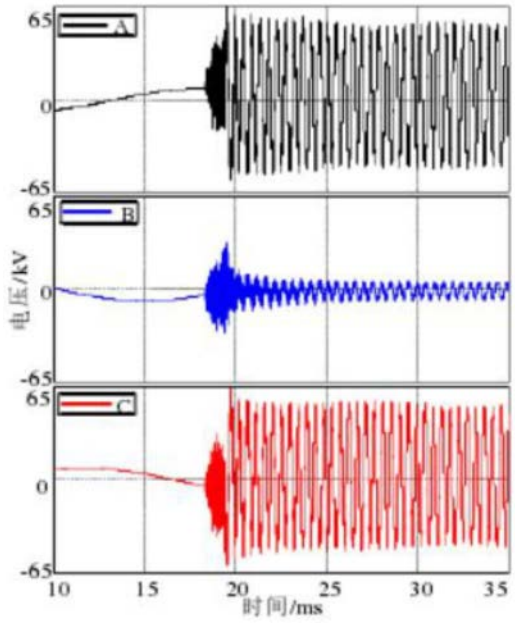

65
A
0
-65
65
B
电压/kV
0
-65
65
C
0
-65
10
15
20
25
30
35
时间/ms

图16

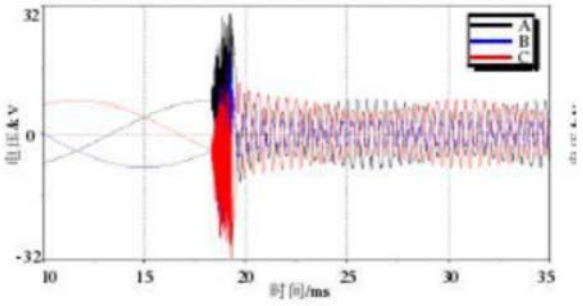

32
A
B
C
电压/kV
0
-32
10
15
20
25
30
35
时间/ms

图17

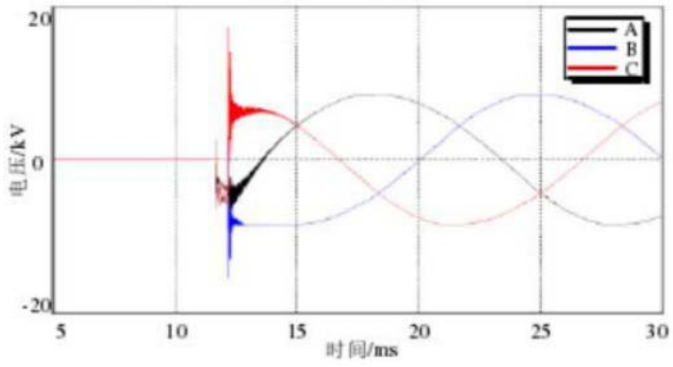

20
A
B
C
电压/kV
0
-20
5
10
15
20
25
30
时间/ms

图18

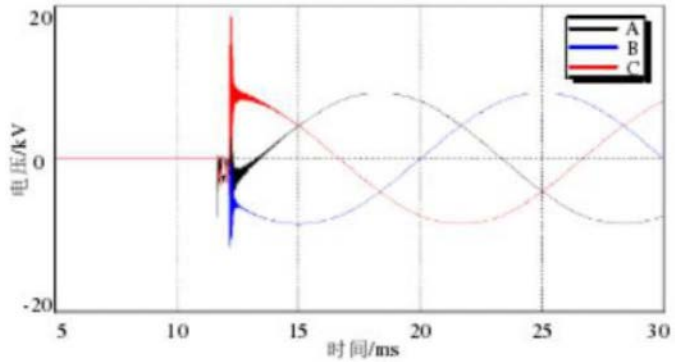


图19