



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104569552 B

(45)授权公告日 2018.02.06

(21)申请号 201510011605.5

(22)申请日 2015.01.09

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104569552 A

(43)申请公布日 2015.04.29

(73)专利权人 南方电网科学研究院有限责任公
司

地址 510080 广东省广州市越秀区东风东
路水均岗6、8号

专利权人 华南理工大学

(72)发明人 李书勇 郭琦 饶宏 崔柳
黄立滨 蔡泽祥 梁益

(74)专利代理机构 广州市华学知识产权代理有
限公司 44245

代理人 罗观祥

(51)Int.Cl.

G01R 19/00(2006.01)

G01R 19/165(2006.01)

(56)对比文件

- CN 2854618 Y, 2007.01.03,
- CN 201277997 Y, 2009.07.22,
- CN 102590708 A, 2012.07.18,
- CN 102570419 A, 2012.07.11,
- CN 101290337 A, 2008.10.22,
- CN 101242098 A, 2008.08.13,
- CN 103618300 A, 2014.03.05,
- CN 103675607 A, 2014.03.26,
- CN 101860020 A, 2010.10.13,
- CN 102882193 A, 2013.01.16,
- US 2012/0086459 A1, 2012.04.12,
- KR 10-1312353 B1, 2013.10.14,

审查员 赵娟娟

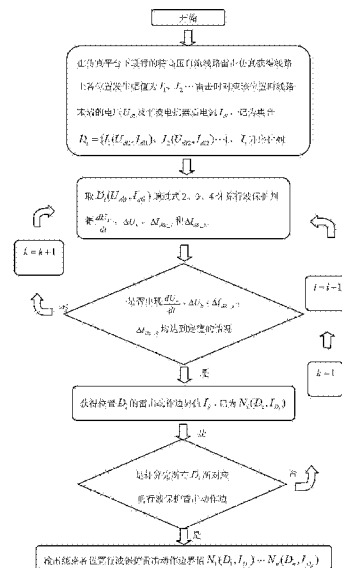
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

特高压直流输电线路行波保护雷击动作边
界值确定方法

(57)摘要

本发明公开了特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法。该方法按一定顺序排列,在线路上不同位置进行不同雷电流幅值的雷击仿真时得到的数据后,根据行波保护判据实际算法依次计算出各情况下判据,再以此判断行波保护动作情况,最后确定出不同位置下能令行波保护动作的最小雷电流幅值。本发明特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法是基于小步长仿真数据的特高压直流输电线路行波保护电压电流判据的计算方法,实现了按线路位置确定行波保护雷击动作边界值。



1. 特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法,其特征在于包括如下步骤:

1) 按照到行波保护安装处的距离由近到远,将特高压直流输电线路作用点分别标记为 $N_1、N_2 \cdots N_i \cdots N_n$,则各个作用点到行波保护安装处的距离为 $D_1、D_2 \cdots D_i \cdots D_n$;

2) 在各作用点进行雷电流幅值分别为 $I_1、I_2 \cdots I_k \cdots I_m$ 的特高压直流输电线路雷击仿真, $5kA \leq I_k \leq 35kA$,幅值间隔 $1-5kA$, k 为 $1、2 \cdots m$;记录每次仿真时线路末端的电压 U_{d1} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d1} ,点 N_i 的仿真数据记集合 $D_i = \{I_1(U_{d11}, I_{d11}) \cdots I_m(U_{d1m}, I_{d1m})\}$, I 按照幅值从小到大排列; $I_1(U_{d11}, I_{d11})$ 为作用点 N_i 处发生雷电流幅值 I_1 时的线路末端的电压 U_{d11} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d11} ;如此类推;

3) 计算作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$,电压变化量 ΔU_k 、整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量 $\Delta I_{d1_I_k}$,并判断行波保护出口情况;

所述行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 通过如下步骤得到:

(1) 用当前时刻电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与前150个时刻电压采样值 $U_{dl_T_{i-150}}$ 按照式6进行差分,得到当前时刻的电压变化率 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$,其中下标 T_i 表示时刻, ΔT 取 $150\mu s$;

$$\frac{dU_{T_i}}{dt} = \frac{U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-150}}}{\Delta T} \quad \text{式 6}$$

(2) 在当前 T_i 时刻下,取 T_i 以前的 $T_{i-150}、T_{i-300}、T_{i-450}、T_{i-600}、T_{i-750}$ 时刻以及 T_i 时刻的电压变化率计算值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-150}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-300}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-450}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-600}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-750}}}{dt}$ 进行比较,取其中的最大值记为 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$,作为当前时刻电压变化率;

(3) 重复以上步骤(1)至(2),直到所有时刻电压变化率 $\frac{dU}{dt}$ 构成了计算作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$;

所述电压变化量 ΔU_k 通过如下方法确定:

A) 取当前时刻的线路末压电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与其以前的 $T_{i-150}、T_{i-300}、T_{i-450}、T_{i-600}、T_{i-750}$ 这5个时刻的线路末端电压采样值进行比较,则比较 $U_{dl_T_i}、U_{dl_T_{i-150}}、U_{dl_T_{i-300}}、U_{dl_T_{i-450}}、U_{dl_T_{i-600}}、U_{dl_T_{i-750}}$,然后取其最大值记为 $Max U_{dl_T_i}$;

B) 将 $Max U_{dl_T_i}$ 与 $U_{dl_T_{i-750}}$ 作差后的值记为当前时刻的电压变化量 ΔU_{T_i} ,根据式7将 ΔU_{T_i} 与电压变化量整定值 ΔU_{set} 进行比较;

$$\Delta U_{T_i} = Max U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-750}} \quad \text{式 7}$$

C) 根据比较结果,若 ΔU_{T_i} 大于整定值 ΔU_{set} ,则电压变化量判据出口;

D) 下一个时刻的 $\Delta U_{T_{i+1}}$ 值计算则将上述步骤中计算所用的数据由 T_i 时对应的值改为 T_{i+1} 时对应的值;如此重复以上步骤A)至C),得到的是不同时刻的 ΔU_{T_i} 值,所有 ΔU_{T_i} 构成的图像即为电压变化量判据 ΔU_k ;

基于采样时序,整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 的计算及出口依据为:

所述整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 通过如下步骤得到:

a) 取当前时刻以前的第1200个时刻的电流采样值 $I_{dl_T_i-1200}$ 作为当前时刻的电流采样值;

b) 使其与它当前时刻前1350时刻的电流采样值 $I_{dl_T_i-1350}$ 作如式8的差分,获得当前时刻的

电流变化率 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$, ΔT 取150 μ s;

$$\frac{dI_{T_i}}{dt} = \frac{I_{dl_T_i-1200} - I_{dl_T_i-1350}}{\Delta T} \quad \text{式 8}$$

c) 对 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$ 进行如式9的定积分处理后获得整流侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_i_R}$,然后将 $\Delta I_{dl_T_i_R}$

进行如式10的定积分处理后获得逆变侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_i_I}$;

$$\Delta I_{dl_T_i_R} = \int_{-2}^{1.99} \frac{dI_{T_i}}{d\tau} dt \quad \text{式 9}$$

$$\Delta I_{dl_T_i_I} = \int_{-2}^{1.99} \Delta I_{dl_T_i_R} dt \quad \text{式 10}$$

d) 分别将 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 与其定值 ΔI_{d1_Rset} 比较,将 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 与其定值 ΔI_{d1_Iset} 比较,大于整定值的那一侧保护出口;

e) 下一个时刻的 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 值及 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 值计算时,将上述步骤中计算所用的数据T下标i进行 $i = i+1$ 替换进行同样的计算;如此重复步骤a)至d),所有 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 构成的图像即为整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} ;所有 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 构成的图像即为整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} ;

4) 若存在 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ 大于行波保护电压变化率定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 的情况,则认为该数据下的电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 满足判据定值,此时 $\frac{dU_k}{dt}$ 出口;与 $\frac{dU_k}{dt}$ 出口同样方法判断 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和

ΔI_{d1k_R} 出口,判断作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 、电压变化量 ΔU_k 、整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量 $\Delta I_{d1_I_k}$ 的行波保护出口情况后,则更换下一个 I_k 对应的数据,重复步骤3),直到首先出现某个 I_k 能令 $\frac{dU_k}{dt}$ 、 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和 ΔI_{d1k_R} 同时达到保护定值时,该值为特高压直流输电线路位置 D_i 处的行波保护雷击动作边界值 I_{D_i} ;

5) 更换下一个点 N_i 的仿真数据集 D_i ,重复步骤3)、4),直到所有点N全部计算完毕为止;

6) 得到输出线路各位置行波保护雷击动作边界值 $N_1(D_1, I_{D_1})$ 、 $N_2(D_2, I_{D_2}) \dots$

$N_n(D_n, I_{D_n})$ 。

2. 根据权利要求1所述的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法, 其特征在于, 所述的行波保护安装处为特高压直流输电线路的线路末端。

特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种边界值确定方法,特别是涉及一种特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法。

背景技术

[0002] 行波保护是基于电流变化量 ΔI 、电压变化量 ΔU 以及电压变化率 $\frac{dU}{dt}$ 实现的一种线路保护。特高压直流输电线路确定后,其行波保护电压变化率定值也随之确定。特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值是指能令行波保护动作的最小雷电流幅值 I , 确定该值有利于提高特高压直流线路行波保护雷击可靠性。由于利用行波解析理论求解故障处雷电流参数的数学模型复杂,求解过程困难。目前获得该参数的手段是通过结合雷击特高压直流输电线路末端线路末端的雷电录波、行波保护电压电流判据采样值以及保护动作信息分析得到。关于利用雷击线路数值仿真确定特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值的方法并未见有。

[0003] 当前对于行波保护的雷击动作边界值确定主要依靠大量分析以往运行中遇到的雷击事件雷电录波及其行波保护采样信息、结合保护出口情况后,结合运行经验给定使行波保护动作的雷电流幅值 I , 且认为该值对于全线路发生雷击时均有效。

[0004] 目前关于特高压直流输电线路雷击行波保护动作边界值的确定方法存在以下3个不足点:

[0005] 1) 决定行波保护动作的判据除了与雷电流幅值大小有关以外也与雷击点到保护安装处距离 D 相关,现有方法尚未提及该因素的影响。

[0006] 2) 由于雷电录波数据是经过行波色散及衰减后测量获得的,故目前方法所得行波保护雷击动作边界值 I 不能真实反映实际雷电流幅值大小。

[0007] 3) 用于雷击事件具有很大的随机性,由实际运行所得数据确定的边界值并不一定是能令行波保护动作的最小雷电流幅值。

[0008] 综上所述,由目前方法获得的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值描述上并不完整,数值上并不精确。

发明内容

[0009] 本发明目的在于克服现有技术存在的问题,提供一种数值准确的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法。

[0010] 本发明利用电磁暂态仿真软件进行特高压直流线路雷击仿真,根据获得所需数据进而确定特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值;本发明可根据实际需要选取线路上的参考点确定该点的行波保护雷击动作边界值 I , 对该值作了更完整的描述。本发明在事先确定雷电流幅值 I 的前提下进行特高压直流输电线路雷击仿真,可以将线路末端雷电录波数据与雷击时的雷电流幅值对应。本发明利用数值仿真方法可获得更连续的雷击数据,

所确定的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值更精确。

[0011] 本发明目的通过如下技术方案实现：

[0012] 1、特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法，包括如下步骤：

[0013] 1) 按照到行波保护安装处的距离由近到远，将特高压直流输电线路作用点分别标记为 $N_1、N_2 \cdots N_i \cdots N_n$ ，则各个作用点到行波保护安装处的距离为 $D_1、D_2 \cdots D_i \cdots D_n$ ；

[0014] 2) 在各作用点进行雷电流幅值分别为 $I_1、I_2 \cdots I_k \cdots I_m$ 的特高压直流输电线路雷击仿真， $5kA \leq I_i \leq 35kA$ ，幅值间隔 $1-5kA$ ， i 为 $1、2 \cdots m$ ；记录每次仿真时线路末端的电压 U_{d1} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d1} ，点 N_i 的仿真数据记集合 $D_i = \{I_1(U_{d11}, I_{d11}) \cdots I_m(U_{d1m}, I_{d1m})\}$ ， I 按照幅值从小到大排列； $I_1(U_{d11}, I_{d11})$ 为作用点 N_i 处发生雷电流幅值分别为 I_1 时的线路末端的电压 U_{d11} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d11} ；如此类推；

[0015] 3) 计算作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 、电压变化量 ΔU_k 、整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量 $\Delta I_{d1_I_k}$ ，并判断其出口情况；

[0016] 所述行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 通过如下步骤得到：

[0017] (1) 用当前时刻电压采样值 $U_{d1_T_i}$ 与前150个时刻电压采样值 $U_{d1_T_{i-150}}$ 按照式6进行差分，得到当前时刻的电压变化率 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$ ，其中下标 T_i 表示时刻， ΔT 取 $150\mu s$ ；

$$[0018] \quad \frac{dU_{T_i}}{dt} = \frac{U_{d1_T_i} - U_{d1_T_{i-150}}}{\Delta T} \quad \text{式6}$$

[0019] (2) 在当前 T_i 时刻下，取 T_i 以前的 $T_{i-150}、T_{i-300}、T_{i-450}、T_{i-600}、T_{i-750}$ 时刻以及 T_i 时刻的电压变化率计算值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-150}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-300}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-450}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-600}}}{dt}、\frac{dU_{T_{i-750}}}{dt}$ 进行比较，取其中的最大值记为 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ ，作为当前时刻电压变化率；

[0020] (3) 重复以上步骤(1)至(2)，直到所有时刻电压变化率 $\frac{dU}{dt}$ 构成了计算作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ ；

[0021] 所述电压变化量 ΔU_k 通过如下方法确定：

[0022] A) 取当前时刻的线路末压电压采样值 $U_{d1_T_i}$ 与其以前的 $T_{i-150}、T_{i-300}、T_{i-450}、T_{i-600}、T_{i-750}$ 这5个时刻的线路末端电压采样值进行比较，则比较 $U_{d1_T_i}、U_{d1_T_{i-150}}、U_{d1_T_{i-300}}、U_{d1_T_{i-450}}、U_{d1_T_{i-600}}、U_{d1_T_{i-750}}$ ，然后取其最大值记为 $Max U_{d1_T_i}$ ；

[0023] B) 将 $Max U_{d1_T_i}$ 与 $U_{d1_T_{i-750}}$ 作差后的值记为当前时刻的电压变化量 ΔU_{T_i} ，根据式7将 ΔU_{T_i} 与电压变化量整定值 ΔU_{set} 进行比较；

$$[0024] \quad \Delta U_{T_i} = Max U_{d1_T_i} - U_{d1_T_{i-750}} \quad \text{式7}$$

[0025] C) 根据比较结果,若 ΔU_{T_i} 大于整定值 ΔU_{set} ,则电压变化量判据出口;

[0026] D) 下一个时刻的 $\Delta U_{T_{i+1}}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为T下标为 $i = i+1$ 时的值;如此重复以上步骤A)至C),得到的是不同时刻的 ΔU_{T_i} 值,所有 ΔU_{T_i} 构成的图像即为电压变化量判据 ΔU_k ;

[0027] 基于采样时序,整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 的计算及出口依据为:

[0028] 所述整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 通过如下步骤得到:

[0029] a) 取当前时刻以前的第1200个时刻的电流采样值 $I_{dl_T_{i-1200}}$ 作为当前时刻的电流采样值;

[0030] b) 使其与它当前时刻前1350时刻的电流采样值 $I_{dl_T_{i-1350}}$ 作如式8的差分,获得当前时刻的电流变化率 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$, ΔT 取150 μ s;

$$[0031] \quad \frac{dI_{T_i}}{dt} = \frac{I_{dl_T_{i-1200}} - I_{dl_T_{i-1350}}}{\Delta T} \quad \text{式8}$$

[0032] c) 对 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$ 进行如式9的定积分处理后获得整流侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_i_R}$,然后将 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 进行如式10的定积分处理后获得逆变侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_i_I}$;

$$[0033] \quad \Delta I_{dl_T_i_R} = \int_{-2}^{1.99} \frac{dI_{T_i}}{d\tau} dt \quad \text{式9}$$

$$[0034] \quad \Delta I_{dl_T_i_I} = \int_{-2}^{1.99} \Delta I_{dl_T_i_R} dt \quad \text{式10}$$

[0035] d) 分别将 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 与其定值 ΔI_{d1_Rset} 比价,将 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 与其定值 ΔI_{d1_Iset} 比较,大于整定值的那一侧保护出口;

[0036] e) 下一个时刻的 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 值及 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 值计算时,将上述步骤中计算所用的数据T下标 i 进行 $i = i+1$ 替换进行同样的计算;如此重复步骤a)至d),所有 $\Delta I_{dl_T_i_R}$ 构成的图像即为整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} ;所有 $\Delta I_{dl_T_i_I}$ 构成的图像即为整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} ;

[0037] 4) 若存在 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ 大于行波保护电压变化率定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 的情况,则认为该数据下

的电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 满足判据定值;若此时判据 $\frac{dU_k}{dt}$ 、 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和 ΔI_{d1k_R} 均不出口,则更

换下一个 I_k 对应的数据,重复步骤3),直到首先出现某个 I_k 能令 $\frac{dU_k}{dt}$ 、 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和 ΔI_{d1k_R} 同时达到保护定值时,该值为特高压直流输电线路位置 D_i 处的行波保护雷击动作边界值 I_{D_i} ;

[0038] 5) 更换下一个点 N_i 的仿真数据集 D_i , 重复步骤3)、4), 直到所有点 N 全部计算完毕为止;

[0039] 6) 得到输出线路各位置行波保护雷击动作边界值 $N_1(D_1, I_{D_1})$ 、 $N_2(D_2, I_{D_2}) \dots N_n(D_n, I_{D_n})$ 。相对于现有技术, 本发明具有如下优点:

[0040] 1) 本发明特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法, 是基于小步长仿真数据的特高压直流输电线路行波保护电压电流判据的计算方法, 实现了按线路位置确定行波保护雷击动作边界值。

[0041] 2) 本发明的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法为行波保护雷击动作边界值的确定提供了一种更准确的方法, 对于运行人员及时提高行波保护雷击可靠性, 减少行波保护保护的不正确动作, 保障交直流互联电网的安全稳定运行具有重要意义。

附图说明

[0042] 图1为特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法的电压判据逻辑图。

[0043] 图2为特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法的电流判据逻辑图。

[0044] 图3为现有技术实际采样时序原理图。

[0045] 图4本发明采样时序原理图。

[0046] 图5为特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界确定方法实现流程图。

具体实施方式

[0047] 为更好地理解本发明, 下面结合附图对本发明作进一步的说明, 但本发明的实施方式不限如此。

[0048] 在电磁暂态仿真软件中已经实现特高压直流输电线路雷击仿真的前提下, 本发明按一定顺序排列, 在线路上不同位置进行不同雷电流幅值的雷击仿真时得到的数据后, 根据行波保护判据实际算法依次计算出各情况下判据, 再以此判断行波保护动作情况, 最后确定出不同位置下能令行波保护动作的最小雷电流幅值。

[0049] 特高压直流输电线路行波保护电压电流判据除了与雷电流幅值 I 相关外, 也与雷击点到行波保护安装处距离 D 成负相关关系。发生特高压直流输电线路雷击时, 从行波保护电压、电流判据所出现的峰值随距离 D 的变化趋势仿真图可见, 两个判据所现峰值随距离 D 的变化明显, 因此, 确定特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值时必须考虑雷击点到行波保护安装处距离 D 的影响, 故对于该项数据更完整的描述应该是线路上某距离 D_i 下发生雷击时可能令行波保护动作的最小雷电流幅值 I_{D_i} 。

[0050] 1、图1给出了特高压直流输电线路行波保护电压判据主要算法及其出口过程。如图1所示, 计算电压变化率判据 $\frac{dU}{dt}$ 、电压变化量判据 ΔU 时, 以线路末端电压采样值 U_{d1} 作为原始参数输入, 其中保护采样频率为 $150\mu s$ 。

[0051] 电压变化率判据 $\frac{dU}{dt}$ 的计算及其出口原则为:

[0052] 1) 用当前时刻电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与上一时刻电压采样值 $U_{dl_T_{i-1}}$ 按照式1进行差分, 得到值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$ 表示当前时刻的电压变化率, 其中下标 T_i 表示时刻, ΔT 取 $150\mu s$ 。

$$[0053] \quad \frac{dU_{T_i}}{dt} = \frac{U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-1}}}{\Delta T} \quad \text{式1}$$

[0054] 2) 在当前 T_i 时刻下, 取 T_i 前5个时刻 (包括 T_i 时刻) 的电压变化率计算值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-1}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-2}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-3}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-4}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-5}}}{dt}$ 进行比较, 取其中的最大值记为 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$, 作为当前时刻与电压变化率整定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 比较的值。

[0055] 3) 根据比较结果, 若 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ 大于整定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 则电压变化率判据出口。

[0056] 4) 下一个时刻的 $\frac{dU_{T_{i+1}}}{dt}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为 T 下标为 i

$= i+1$ 时的值。如此重复以上步骤1) 至3) 即是电压变化率判据 $\frac{dU}{dt}$ 的计算。

[0057] 电压变化量判据 ΔU 的计算及其出口原则为:

[0058] 1) 取当前时刻的线路末压电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与其前5个时刻的线路末端电压采样值进行比较, 则比较 $U_{dl_T_i}$ 、 $U_{dl_T_{i-1}}$ 、 $U_{dl_T_{i-2}}$ 、 $U_{dl_T_{i-3}}$ 、 $U_{dl_T_{i-4}}$ 、 $U_{dl_T_{i-5}}$, 然后取其最大值记为 $Max U_{dl_T_i}$ 。

[0059] 2) 将 $Max U_{dl_T_i}$ 与 $U_{dl_T_{i-5}}$ 作差后的值记为当前时刻的电压变化量 ΔU_{T_i} , 则有式2。将 ΔU_{T_i} 与电压变化量整定值 ΔU_{set} 进行比较。

$$[0060] \quad \Delta U_{T_i} = Max U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-5}} \quad \text{式2}$$

[0061] 3) 根据比较结果, 若 ΔU_{T_i} 大于整定值 ΔU_{set} 则电压变化量判据出口 (满足要求)。

[0062] 4) 下一个时刻的 $\Delta U_{T_{i+1}}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为 T 下标为 i $= i+1$ 时的值。如此重复以上步骤1) 至3) 即是电压变化量判据 ΔU 的计算。

[0063] 2、行波保护电流判据确定

[0064] 图2给出了特高压直流输电线路行波保护电流判据主要算法及其出口过程。如图2所示, 电流变化量判据 ΔI 又分为整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1k_R} 和逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1k_I} , 确定时以线路末端安装的平波电抗器后侧的电流采样值 I_{d1} 作为原始参数输入, 其中保护采样频率为 $150\mu s$ 。

[0065] 整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 的计算及出口原则为:

[0066] 1) 取当前时刻以前的第8个时刻的电流采样值 $I_{dl_T_{i-8}}$ 作为当前时刻的电流采样值。

[0067] 2) 使其与它之前的电流采样值 $I_{dl_T_{i-9}}$ (即当前时刻以前的第9个时刻的电流采样值) 作如式3的差分, 获得当前时刻的电流变化率 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$, ΔT 取 $150\mu s$ 。

$$[0068] \quad \frac{dI_{T_i}}{dt} = \frac{I_{dl_T_{i-8}} - I_{dl_T_{i-9}}}{\Delta T} \quad \text{式3}$$

[0069] 3) 对 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$ 进行如式4的定积分处理后获得整流侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_{i-R}}$, 然后将 $\Delta I_{dl_T_{i-R}}$ 进行如式5的定积分处理后获得逆变侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_{i-I}}$ 。

$$[0070] \quad \Delta I_{dl_T_{i-R}} = \int_{-2}^{1.99} \frac{dI_{T_i}}{d\tau} dt \quad \text{式4}$$

$$[0071] \quad \Delta I_{dl_T_{i-I}} = \int_{-2}^{1.99} \Delta I_{dl_T_{i-R}} dt \quad \text{式5}$$

[0072] 4) 分别将 $\Delta I_{dl_T_{i-R}}$ 与其定值 ΔI_{dl_Rset} 比价, 将 $\Delta I_{dl_T_{i-I}}$ 与其定值 ΔI_{dl_Iset} 比较, 大于整定值的那一侧保护出口。

[0073] 5) 下一个时刻的 $\Delta I_{dl_T_{i-R}}$ 值及 $\Delta I_{dl_T_{i-I}}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为 T 下标为 $i = i+1$ 时的值。如此重复步骤1) 至4) 即是整流侧电流变化量判据 ΔI_{dl_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{dl_I} 的计算。

[0074] 3、避免采样随机性的判据计算方法

[0075] 现有技术特高压直流输电线路行波保护采样值计算时序如图3所示, 其中 T_i 、 $T_{i+1} \dots$ 表示用于计算的数值所在时刻点前后间隔 $0.15ms$, 则实际工程中对一次能造成行波保护动作的雷击, 可能由于保护采样的随机性而未能体现其危害。本发明中计算保护判据时, 为了避免采样随机性, 在小步长仿真中获得时间间隔为 $1\mu s$ 的仿真数据前提下, 运用下图4所标示的采样方法, 即在采样间隔 $0.15ms$ 中添加149个数据, 尽可能多地获得不同的采样情况。

[0076] 基于仿真采样时序的电压变化率 $\frac{dU}{dt}$ 通过如下方法得到:

[0077] 1) 用当前时刻电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与前150个时刻电压采样值 $U_{dl_T_{i-150}}$ 按照式6进行差分, 得到值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$ 表示当前时刻的电压变化率, 其中下标 T_i 表示时刻, ΔT 取 $150\mu s$;

[0078] $\frac{dU_{T_i}}{dt} = \frac{U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-150}}}{\Delta T}$ 式6

[0079] 2) 在当前 T_i 时刻下, 取 T_i 以前的 T_{i-150} 、 T_{i-300} 、 T_{i-450} 、 T_{i-600} 、 T_{i-750} 时刻 (包括 T_i 时刻)

的电压变化率计算值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-150}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-300}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-450}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-600}}}{dt}$ 、 $\frac{dU_{T_{i-750}}}{dt}$; 进行比较, 取

其中的最大值记为 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ ，作为当前时刻与电压变化率整定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 比较的值。

[0080] 4) 根据比较结果,若 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$ 大于整定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 则电压变化率判据出口。

[0081] 5) 下一个时刻的 $\frac{dU_{T_{i+1}}}{dt}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为T下标为 $i = i+1$ 时的值。如此重复以上步骤1)至3)即是电压变化率判据 $\frac{dU}{dt}$ 的计算。

[0082] 基于本发明的采样时序的电压变化量判据 ΔU 的计算及其出口原则为:

[0083] 1) 取当前时刻的线路末压电压采样值 $U_{dl_T_i}$ 与其以前的 T_{i-150} 、 T_{i-300} 、 T_{i-450} 、 T_{i-600} 、 T_{i-750} 这5个时刻的线路末端电压采样值进行比较,则比较 $U_{dl_T_i}$ 、 $U_{dl_T_{i-150}}$ 、 $U_{dl_T_{i-300}}$ 、 $U_{dl_T_{i-450}}$ 、 $U_{dl_T_{i-600}}$ 、 $U_{dl_T_{i-750}}$, 然后取其最大值记为 $Max U_{dl_T_i}$ 。

[0084] 2) 将 $Max U_{dl_T_i}$ 与 $U_{dl_T_{i-750}}$ 作差后的值记为当前时刻的电压变化量 ΔU_{T_i} , 则有式7。将 ΔU_{T_i} 与电压变化量整定值 ΔU_{set} 进行比较。

$$[0085] \quad \Delta U_{T_i} = Max U_{dl_T_i} - U_{dl_T_{i-750}} \quad \text{式7}$$

[0086] 3) 根据比较结果,若 ΔU_{T_i} 大于整定值 ΔU_{set} 则电压变化量判据出口。

[0087] 4) 下一个时刻的 $\Delta U_{T_{i+1}}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为T下标为 $i = i+1$ 时的值。如此重复以上步骤1)至3)即是电压变化量判据 ΔU 的计算。

[0088] 基于本发明的采样时序的整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 的计算及出口原则为:

[0089] 1) 取当前时刻以前的第1200个时刻的电流采样值 $I_{dl_T_{i-1200}}$ 作为当前时刻的电流采样值。

[0090] 2) 使其与它当前时刻前1350时刻的电流采样值 $I_{dl_T_{i-1350}}$ 作如式8的差分,获得当前时刻的电流变化率 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$, ΔT 取 $150\mu s$ 。

$$[0091] \quad \frac{dI_{T_i}}{dt} = \frac{I_{dl_T_{i-1200}} - I_{dl_T_{i-1350}}}{\Delta T} \quad \text{式8}$$

[0092] 3) 对 $\frac{dI_{T_i}}{dt}$ 进行如式9的定积分处理后获得整流侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_{i_R}}$, 然后将 $\Delta I_{dl_T_{i_R}}$ 进行如式10的定积分处理后获得逆变侧电流变化量判据 $\Delta I_{dl_T_{i_I}}$ 。

$$[0093] \quad \Delta I_{dl_T_{i_R}} = \int_{-2}^{1.99} \frac{dI_{T_i}}{dt} dt \quad \text{式9}$$

$$[0094] \quad \Delta I_{dl_T_{i_I}} = \int_{-2}^{1.99} \Delta I_{dl_T_{i_R}} dt \quad \text{式10}$$

[0095] 4) 分别将 $\Delta I_{d1_T_i_R}$ 与其定值 ΔI_{d1_Rset} 比价, 将 $\Delta I_{d1_T_i_I}$ 与其定值 ΔI_{d1_Iset} 比较, 大于整定值的那一侧保护出口。

[0096] 5) 下一个时刻的 $\Delta I_{d1_T_i_R}$ 值及 $\Delta I_{d1_T_i_I}$ 值计算则以令将上述步骤中计算所用的数据改为T下标为 $i = i+1$ 时的值。如此重复步骤1) 至4) 即是整流侧电流变化量判据 ΔI_{d1_R} 及逆变侧电流变化量判据 ΔI_{d1_I} 的计算。

[0097] 综上, 本发明所用计算行波保护各判据时的核心思想是将前后两次计算判据的区间从 $150\mu s$ 缩小至 $1\mu s$, 相当于对仿真数据做逐点扫描。

[0098] 一种特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法, 如图5所示, 包括如下步骤:

[0099] 1). 按照到行波保护安装处的距离由近到远, 将特高压直流输电线路作用点分别标记为 $N_1, N_2 \dots N_i \dots N_n$, 则各个作用点到行波保护安装处的距离为 $D_1, D_2 \dots D_i \dots D_n$; 优选行波保护安装处为特高压直流输电线路的线路末端;

[0100] 2). 在各作用点进行雷电流幅值分别为 $I_1, I_2 \dots I_k \dots I_m$ 的特高压直流输电线路雷击仿真, $5kA \leq I \leq 35kA$, 幅值间隔 $1-5kA$, 可根据精度要求改变幅值间隔, 记录每次仿真时线路末端的电压 U_{d1} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d1} , 点 N_i 的仿真数据记集合 $D_i = \{I_1 (U_{d11}, I_{d11}) \dots I_m (U_{d1m}, I_{d1m})\}$, I 按照幅值从小到大排列; $I_1 (U_{d11}, I_{d11})$ 为作用点 N_i 处发生雷电流幅值分别为 I_1 时的线路末端的电压 U_{d11} 和线路末端安装的平波电抗器后侧的电流 I_{d11} ; 如此类推;

[0101] 3) 计算作用点 N_i 在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 、电压变化量 ΔU_k 、整流侧电流变化量 $\Delta I_{d1_R_k}$ 及逆变侧电流变化量 $\Delta I_{d1_I_k}$, 并判断其出口情况;

[0102] 所述行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 通过如下步骤得到:

[0103] (1) 用当前时刻电压采样值 $U_{d1_T_i}$ 与前150个时刻电压采样值 $U_{d1_T_{i-150}}$ 按照式6进行差分, 得到当前时刻的电压变化率 $\frac{dU_{T_i}}{dt}$, 其中下标 T_i 表示时刻, ΔT 取 $150\mu s$;

$$[0104] \quad \frac{dU_{T_i}}{dt} = \frac{U_{d1_T_i} - U_{d1_T_{i-150}}}{\Delta T} \quad \text{式6}$$

[0105] (2) 在当前 T_i 时刻下, 取 T_i 以前的 $T_{i-150}, T_{i-300}, T_{i-450}, T_{i-600}, T_{i-750}$ 时刻以及 T_i 时刻的电压变化率计算值 $\frac{dU_{T_i}}{dt}, \frac{dU_{T_{i-150}}}{dt}, \frac{dU_{T_{i-300}}}{dt}, \frac{dU_{T_{i-450}}}{dt}, \frac{dU_{T_{i-600}}}{dt}, \frac{dU_{T_{i-750}}}{dt}$ 中的最大值记为 $Max \frac{dU_{T_i}}{dt}$, 作为当前时刻电压变化率;

[0106] (3) 重复以上步骤 (1) 至 (2), 直到所有时刻电压变化率 $\frac{dU}{dt}$, 构成了计算作用点 N_i

在发生雷电流幅值为 I_k 情况下的行波保护电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$;

[0107] 4) 若存在 $\text{Max} \frac{dU_{T_i}}{dt}$ 大于行波保护电压变化率定值 $\frac{dU_{set}}{dt}$ 的情况, 则认为该数据下的电压变化率 $\frac{dU_k}{dt}$ 满足判据定值; 若此时判据 $\frac{dU_k}{dt}$ 、 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和 ΔI_{d1k_R} 均不出口, 则更换下一个 I_k 对应的数据, 重复步骤3, 直到首先出现某个 I_k 能令 $\frac{dU_k}{dt}$ 、 ΔU_k 、 ΔI_{d1k_I} 和 ΔI_{d1k_R} 同时达到保护定值时, 则认为该它是特高压直流输电线路位置 D_i 处的行波保护雷击动作边界值 I_{D_i} ;

[0108] 5) 更换下一个点 N_i 的仿真数据集合 D_i , 重复步骤3)、4), 直到所有点 N 全部计算完毕为止;

[0109] 6) 输出线路各位置行波保护雷击动作边界值 $N_1(D_1, I_{D_1})$ 、 $N_2(D_2, I_{D_2})$ 、 \dots 、 $N_n(D_n, I_{D_n})$ 。

[0110] 本发明特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法是基于小步长仿真数据的特高压直流输电线路行波保护电压电流判据的计算方法, 实现了按线路位置确定行波保护雷击动作边界值。

[0111] 本发明的特高压直流输电线路行波保护雷击动作边界值确定方法为行波保护雷击动作边界值的确定提供了一种更准确的方法, 对于运行人员及时提高行波保护雷击可靠性, 减少行波保护保护的不正确动作, 保障交直流互联电网的安全稳定运行具有重要意义。

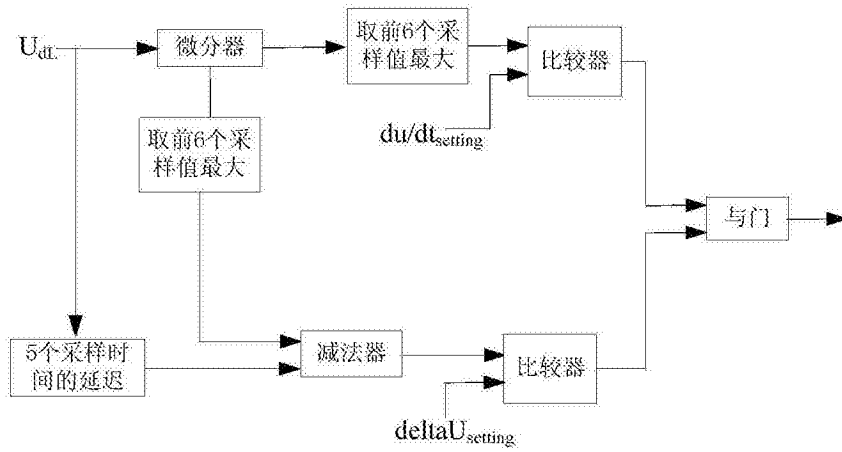


图1

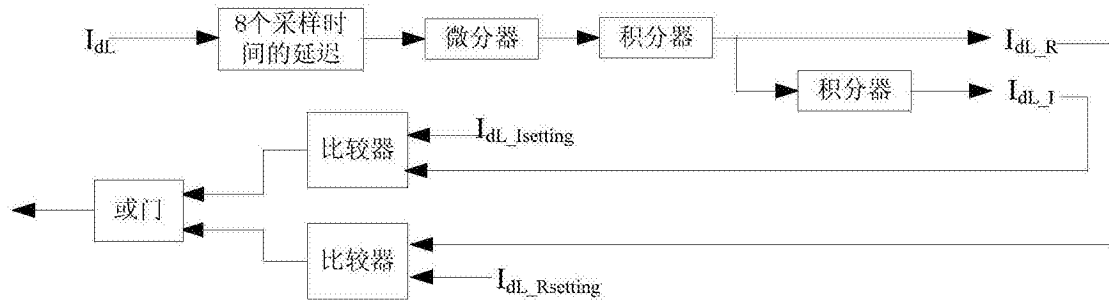


图2

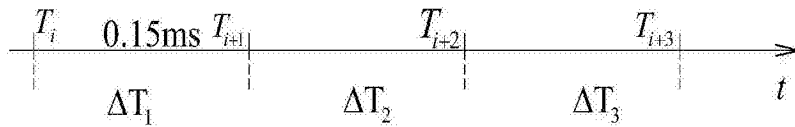


图3

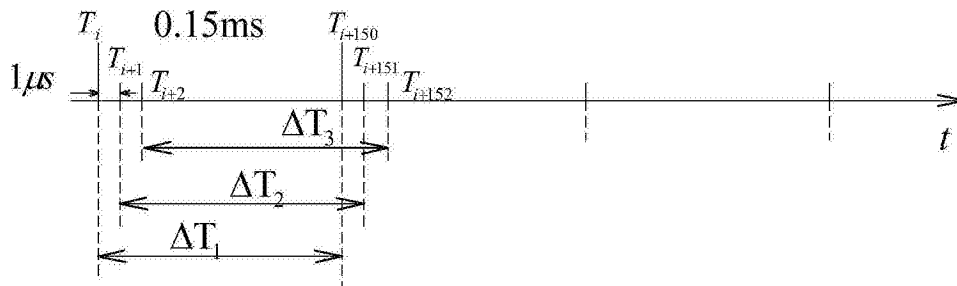


图4

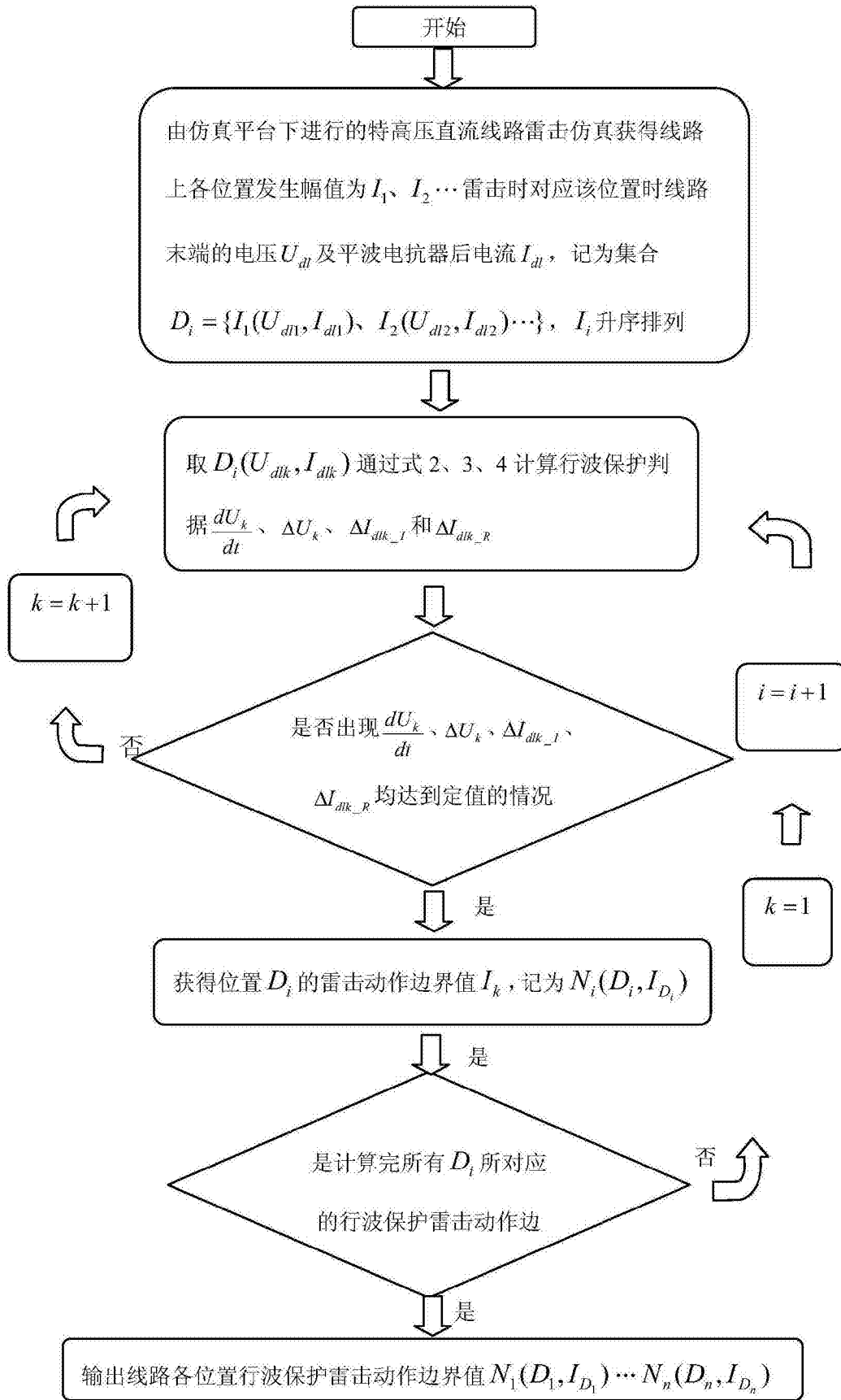


图5