



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109063360 B

(45) 授权公告日 2022. 10. 04

(21) 申请号 201810937697.3

(22) 申请日 2018.08.16

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109063360 A

(43) 申请公布日 2018.12.21

(73) 专利权人 四川大学  
地址 610000 四川省成都市一环路南一段  
24号  
专利权人 深圳大学

(72) 发明人 莫思特 谢和平 刘天琪 李碧雄  
高明中

(74) 专利代理机构 成都睿道专利代理事务所  
(普通合伙) 51217  
专利代理师 潘育敏

(51) Int. Cl.  
G06F 30/20 (2020.01)  
G06F 113/16 (2020.01)  
G06F 119/08 (2020.01)

(56) 对比文件

- CN 107123348 A, 2017.09.01
- CN 106304436 A, 2017.01.04
- CN 104504610 A, 2015.04.08
- CN 101272041 A, 2008.09.24
- CN 206640274 U, 2017.11.14
- WO 2009049544 A1, 2009.04.23
- 李晓明等. 输电线覆冰自动防御系统建模及其对电网的影响分析.《高电压技术》.2013, (第03期),
- 刘根宁等. 覆冰状态下架空输电线路模型参数变化分析.《电力建设》.2014, (第12期), yusheng zhou等. Analysis of transmission line de-icing using 18kV, 40kHz excitation.《2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection》.2012,

审查员 樊宇

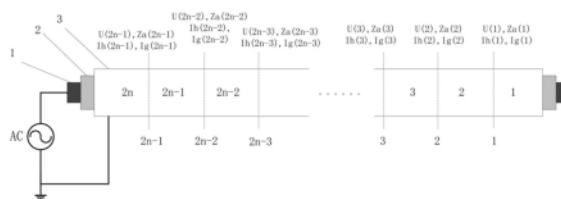
权利要求书4页 说明书8页 附图2页

## (54) 发明名称

嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法

## (57) 摘要

一种嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法。自制热输电导线均匀分为 $2n$ 个任意偶数段单元导线,分段处为节点。导线内导体和外导体之间加有交流电源,交流电源与内导体和外导体连接,与外导体连接的电源端为参考点。每个单元导线上内导体和外导体流过的电流相等。分析方法包括对分布参数进行计算,对节点电压、节点电流、单元导线制热材料电阻参数进行计算分析,并进行单元导线内外导体电阻之和 $R_s$ 、加热材料电阻率、单位导线电感、单位导线电容计算。本发明通过分析、计算导线工作状态,指导输电导线的设计和运行,有利于分析电能质量,有利于电网安全稳定运行。



1. 一种嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法, 自制热输电导线的内导体和外导体之间嵌有均匀加热材料, 其特征在于:

在自制热输电导线的一端加入交流电源, 为自制热导线提供能源, 交流电源加在内导体和外导体之间;

将长度为 $L_a$ 的自制热输电导线均匀分为任意偶数段, 设总的分段数为 $2n$ , 每段长度为 $L_d$ ,  $L_d = L_a / 2n$ , 分段后的每段导线称为单元导线; 单元导线编号用自然数表示, 为 $1, 2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n$ 的整数;

导线分段处用虚线表示, 虚线称为节点, 节点编号用自然数表示, 为 $1, 2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n-1$ 的整数, 节点共 $2n-1$ 个;

选择 $2n-1$ 个节点中任一节点编号, 设编号为 $i$ , 选择 $2n$ 个单元导线中任一单元导线, 设编号为 $i$ ,

交流电源电压用 $U_{in}$ 表示, 外导体为电位参考点; 每个单元导线上内导体和外导体流过的电流相等, 设节点编号为 $i$ 的单元导线内导体和外导体流过的节点电流用 $I_g(i)$ 表示; 节点编号为 $i$ 的单元导线内导体节点电压用 $U(i)$ 表示; 节点编号为 $i$ 的单元导线上加热材料流过的节点加热材料电流为 $I_h(i)$ ; 以编号为 $i$ 的节点为界, 到1号单元导线之间的导线在节点 $i$ 处内导体外导体之间的节点综合阻抗用 $Z_a(i)$ 表示,  $Z_a(i)$ 与单元导线电容、单元导线加热材料电阻的并联阻抗称为节点综合并联阻抗, 用 $Z(i)$ 表示;

自制热输电导线交流加热参数优化时, 对如下分布参数进行计算:

各单元导线加热材料电阻 $R_h$ , 各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗 $Z_{RC}$ , 各单元导线导体电感与单元导线内外导体电阻之和 $R_s$ 串联后的阻感串联阻抗 $Z_L$ , 节点综合阻抗 $Z_a(i)$ , 节点电流 $I_g(i)$ , 节点电压 $U(i)$ , 节点加热材料电流 $I_h(i)$ , 节点综合并联阻抗 $Z(i)$ , 节点功率计算;

对自制热导线运行参数优化选择:

交流电源电压 $U_{in}$ 和内、外导体之间测量的单元导线加热材料电阻 $R_h$ 的优化选择;

完成单元导线内外导体电阻之和 $R_s$ 计算、单元导线加热材料电阻率计算、单元导线导体电感计算和单元导线电容计算;

制热导线运行参数计算步骤是:

第一步: 设置最大电流 $I_{max}$ , 最小电源电压 $U_{min}$ , 单元导线制热材料功率 $W_{min}$ , 每次计算电压递增 $U_{step}$ ;

第二步: 计算根据式(3-10)计算中间节点的节点电压 $U(n)$ ;

第三步: 计算根据式(3-11)计算单元导线加热材料电阻 $R_h$ ;

第四步: 根据式(3-2) - (3-9)计算分布参数,

第五步: 判断节点编号为1的单元导线功率 $W_a(1)$ 是否大于 $0.9W_{min}$ , 是: 进入第六步, 否, 进入第八步;

第六步: 判断 $I_g(2n-1)$ 是否小于 $I_{max}$ , 是: 进入第七步, 否, 进入第八步;

第七步: 判断 $U(2n-1)$ 是否大于 $U_{min}$ , 是: 运算结束; 否, 进入第八步;

第八步:  $U(n) = U(n) + U_{step}$ , 进入第三步,

$U_{in} = U(2n-1) + I_g(2n-1) Z_L$ ;

上述计算得到的 $U_{in}$ 和 $R_h$ 为优化的输入电源和单元导线制热材料电阻;

在将自制热输电导线均匀分为每段长度为 $L_d$ 的 $2n$ 个单元导线中,离电源最近的单元导线编为 $2n$ 号,离电源最远的单元导线变为1号,1号单元导线与 $2n$ 号之间单元导线编号按序列依次递增,分别编号为 $2,3,4,\dots,2n-3,2n-2,2n-1$ ;

离电源最近的节点编号为 $2n-1$ ,离电源最远的节点编号为1;从节点1开始往电源方向的节点编号依次递增,分别为 $2,3,4,\dots,2n-4,2n-3,2n-2$ 。

2.如权利要求1所述的嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法,其特征在于:自制热输电导线交流加热参数分析时,参数计算是:

各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗为 $Z_{RC}$ ,则有,

$$\left. \begin{aligned} X_c &= -\frac{1}{314C} \\ Z_{RC} &= \frac{R_h X_c^2 + jR_h^2 X_c}{R_h^2 + X_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中, $X_c$ 为单元导线容抗, $C$ 为单元导线电容值,单位为法拉,

各单元导线内外导体电阻和为 $R_s$ ,与单元导线导体电感串联后的阻感串联阻抗为 $Z_L$ ,则有,

$$\left. \begin{aligned} X_L &= 314L \\ Z_L &= R_s + jX_L \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

式中, $X_L$ 为单元导线感抗; $L$ 为单元导线导体电感值,单位为亨利;

当节点编号 $i=1$ 时,有,

$$\left. \begin{aligned} Z(1) &= Z_{RC} \\ Z_a(1) &= Z_L + Z(1) \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

当节点编号 $i=2,3,4,\dots,2n-1$ 时,节点综合阻抗 $Z_a(i)$ 为,

$$\left. \begin{aligned} Z(i) &= \frac{Z_{RC} Z_a(i-1)}{Z_{RC} + Z_a(i-1)} \\ Z_a(i) &= Z_L + Z(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

设交流电源的电压为 $U_{in}$ ,节点电流 $I_g(i)$ 为,

$$I_g(i) = \begin{cases} \frac{U_{in}}{Z_a(i)} & i = 2n-1 \\ I_g(i+1) - \frac{U(i+1)}{Z_{RC}} & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-6)$$

各节点电压计算方法如式(3-7)所示,

$$U(i) = \begin{cases} U_{in} - I_g(i) Z_L & i = 2n-1 \\ U(i+1) - I_g(i) Z_L & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-7)$$

节点加热材料电流为,

$$I_h(i) = \frac{U(i)}{R_h} \quad (3-8)$$

节点功率计算方法,

$$\left. \begin{aligned} W_g(i) &= R_s |I_g(i)|^2 \\ W_h(i) &= R_h |I_h(i)|^2 \\ W_a(i) &= W_g(i) + W_h(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

式中,  $W_g(i)$  为编号为  $i$  的单元导线内导体和外导体功率和,  $W_h(i)$  为编号为  $i$  的单元导线加热材料功率,  $W_a(i)$  为编号为  $i$  的单元导线总功率。

3. 如权利要求1所述的嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法, 其特征在于: 运行参数分析:

设内导体和外导体允许流过最大电流为  $I_{\max}$ ; 最小电源电压  $U_{\min}$ ;

选择中间节点为初始值参数计算节点, 设单元导线制热材料功率为  $W_{\min}$ , 则单元导线加热材料电阻为  $R_h$ , 设每次计算电压递增为  $U_{\text{step}}$ ,

设中间节点的节点电压  $U(n)$  为最小电压  $U_{\min}$  的 0.8 倍, 即:

$$U(n) = 0.8U_{\min}, \quad (3-10)$$

单元导线制热材料电阻为:

$$R_h = \frac{(0.8U_{\min})^2}{W_{\min}} \quad (3-11)。$$

4. 如权利要求1所述的嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法, 其特征在于: 单元导线内外导体电阻和  $R_s$  计算、单元导线加热材料电阻率计算、单元导线导体电感计算和单元导线电容计算是: 嵌入均匀材料的自制热输电导线中,  $r_1$  表示内导体的半径,  $r_2$  表示加热材料包裹钢芯后的半径,  $r_3$  表示外导体包裹嵌入材料后整个导线的半径,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  的单位为米;

内导体横截面积用  $S_r$  表示, 单位为平方米, 外导体横截面积用  $S_w$  表示, 单位为平方米; 则:

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \pi r_1^2 \\ S_w &= \pi r_3^2 - \pi r_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

(1) 单元导线内外导体电阻和  $R_s$  计算:

设内导体电阻率为  $\rho_r$ , 设外导体电阻率为  $\rho_w$ , 电阻率单位为欧姆·米;

$$R_s = L_d \left( \frac{\rho_r}{S_r} + \frac{\rho_w}{S_w} \right) \quad (3-13)$$

(2) 单元导线加热材料电阻率计算:

设编号为  $i$  的单元导线加热材料电阻率为  $\rho_h(i)$ , 电阻率单位为欧姆·米;

$$\rho_h(i) = \frac{\pi R_h (r_1 + r_2) L_d}{r_2 - r_1}, \quad i=2, 3, 4, \dots, 2n-1 \quad (3-14)$$

(3) 单元导线导体电感计算:

$\mu_r$ : 内导体导磁率, 单位: 亨每米; 内导体电感为  $L_r$ ;

$$L_r = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \rho_r}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_1 \sqrt{50}} \quad (3-15)$$

$\mu_w$ :外导体导磁率,单位:亨每米;外导体电感为 $L_w$ ;

$$L_w = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_w \rho_w}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_2 \sqrt{50}} \quad (3-16)$$

单元导线导体电感: $L$ =内导体电感+外导体电感= $L_r+L_w$ ;

(4) 单元导线电容计算

单元导线电容计算方法如式(3-17)所示:

$$C = L_e \cdot \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3-17)$$

式中, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ;  $\epsilon_r$ 为发热材料相对等效介电常数;  $\epsilon_0$ 为真空介电常数。

## 嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法

### (一) 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力输电线的在线融冰方法,特别是一种嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法。

### (二) 背景技术

[0002] 随着社会经济的发展,在不断增加电力负荷应用的环境下,对裸露在外的电力线路要求愈来愈高。而在寒冷的冬季,不少地区的线路都会结冰,造成线路的损坏。当结冰超过线路的承受力时,就会发生断线等严重事故。所以,冬季的电力输电线除冰是必不可少,十分重要的。在现有技术中,融冰技术在不断提高。申请号CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》和申请号CN201810370549.8《嵌入绝缘导热材料的自制热导体和制热设备及其实现方法》公开了两种不同类型的输电线路在线融冰方法,对现有融冰技术有极大提高。但是上述专利文件没有说明在线防冰融冰的工作参数计算方法,特别是自制热输电导线交流加热参数的计算方法。

### (三) 发明内容

[0003] 本发明的目的是针对CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》,对一种嵌入均匀加热材料的自制热输电导线实施防冰和融冰作业的工作状态进行分析,在实施防冰和融冰作业时,计算分析导线工作状态,使得导线防冰融冰工作可控,并有助于电网的稳定性分析。本发明的“制热”和“加热”,与专利CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》中的“加热”,具有相同的含义;本发明中 $314$ 是指 $50$ 赫兹与 $2\pi$ 的乘积,对于交流电源为 $60\text{HZ}$ 的地区,计算时,用 $376.8$ 取代 $314$ ,

[0004] 本发明的目的是这样达到的:

[0005] 一种嵌入均匀材料的自制热输电导线交流加热参数优化方法,自制热输电导线的内导体和外导体之间嵌有均匀加热材料,其特征在于:

[0006] 在自制热输电导线的一端加入交流电源,为自制热导线提供能源,交流电源加在内导体和外导体之间;

[0007] 将长度为 $L_a$ 的自制热输电导线均匀分为任意偶数段,设总的分段数为 $2n$ ,每段长度为 $L_d$ , $L_d=L_a/2n$ ,分段后的每段导线称为单元导线。单元导线编号用自然数表示,为 $1, 2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n$ 的整数。

[0008] 导线分段处用虚线表示,虚线称为节点,节点编号用自然数表示,为 $1, 2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n-1$ 的整数,节点共 $2n-1$ 个。

[0009] 选择 $2n-1$ 个节点中任一节点编号,设编号为 $i$ ,选择 $2n$ 个单元导线中任一单元导线,设编号为 $i$ ,

[0010] 交流电源电压用 $U_{in}$ 表示,外导体为电位参考点;每个单元导线上内导体和外导体流过的电流相等,设节点编号为 $i$ 的单元导线内导体和外导体流过的节点电流用 $I_g(i)$ 表示;节点编号为 $i$ 的单元导线内导体电压用 $U(i)$ 表示;节点编号为 $i$ 的单元导线上加热材料

流过的节点加热材料电流为 $I_h(i)$ ；以编号为 $i$ 的节点为界，到1号单元导线之间的导线在节点 $i$ 处内导体外导体之间的节点综合阻抗用 $Z_a(i)$ 表示。 $Z_a(i)$ 与单元导线电容、单元导线加热材料电阻的并联阻抗称为节点综合并联阻抗，用 $Z(i)$ 表示；

[0011] 自制热输电导线交流加热参数优化时，对如下分布参数进行计算：

[0012] 各单元导线制加材料电阻 $R_h$ ，各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗 $Z_{RC}$ ，各单元导线导体电感与单元导线内外导体电阻之和 $R_s$ 串联后的阻感串联阻抗 $Z_L$ ，节点综合阻抗 $Z_a(i)$ ，节点电流 $I_g(i)$ ，节点电压 $U(i)$ ，节点加热材料电流 $I_h(i)$ ，节点功率计算。

[0013] 自制热导线运行参数优化选择：包括交流电源电压 $U_{in}$ 和内、外导体之间测量的单元导线加热材料的电阻 $R_h$ 的优化选择。

[0014] 完成单元导线内外导体电阻和 $R_s$ 计算、单元导线加热材料电阻率计算、单元导线导体电感计算和单元导线电容计算。

[0015] 在将自制热输电导线均匀分为每段长度为 $L_d$ 的 $2n$ 个单元导线中，离电源最近的单元导线编为 $2n$ 号，离电源最远的单元导线变为1号，1号单元导线与 $2n$ 号之间单元导线编号按序列依次递增，分别编号为 $2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n-1$ 。

[0016] 离电源最近的节点编号为 $2n-1$ ，离电源最远的节点编号为1；从节点1开始往电源方向的节点编号依次递增，分别为 $2, 3, 4, \dots, 2n-4, 2n-3, 2n-2$ 。

[0017] 自制热输电导线交流加热参数分析时，参数计算是：

[0018] 各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗为 $Z_{RC}$ ，则有，

$$[0019] \quad \left. \begin{aligned} X_c &= -\frac{1}{314C} \\ Z_{RC} &= \frac{R_h X_c^2 + jR_h^2 X_c}{R_h^2 + X_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

[0020] 式中， $X_c$ 为单元导线容抗； $C$ 为单元导线电容值，单位为法拉；

[0021] 各单元导线内外导体电阻和为 $R_s$ ，与单元导线导体电感串联后的阻感串联阻抗为 $Z_L$ ，则有，

$$[0022] \quad \left. \begin{aligned} X_L &= 314L \\ Z_L &= R_s + jX_L \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

[0023] 式中， $X_L$ 为单元导线感抗； $L$ 为单元导线导体电感值，单位为亨利；

[0024] 当节点编号 $i=1$ 时，有，

$$[0025] \quad \left. \begin{aligned} Z(1) &= Z_{RC} \\ Z_a(1) &= Z_L + Z(1) \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

[0026] 当节点编号 $i=2, 3, 4, \dots, 2n-1$ 时，各节点综合阻抗 $Z_a(i)$ 为，

$$[0027] \quad \left. \begin{aligned} Z(i) &= \frac{Z_{RC} Z_a(i-1)}{Z_{RC} + Z_a(i-1)} \\ Z_a(i) &= Z_L + Z(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

[0028] 设交流电源的电压为 $U_{in}$ ，节点电流 $I_g(i)$ 为，

$$[0029] \quad I_g(i) = \begin{cases} \frac{U_{in}}{Z_a(i)} & i = 2n-1 \\ I_g(i+1) - \frac{U(i+1)}{Z_{RC}} & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-6)$$

[0030] 各节点电压计算方法如式(3-7)所示,

$$[0031] \quad U(i) = \begin{cases} U_{in} - I_g(i)Z_L & i = 2n-1 \\ U(i+1) - I_g(i)Z_L & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-7)$$

[0032] 节点加热材料电流为,

$$[0033] \quad I_h(i) = \frac{U(i)}{R_h} \quad (3-8)$$

[0034] 节点功率计算方法,

$$[0035] \quad \left. \begin{aligned} W_g(i) &= R_s |I_g(i)|^2 \\ W_h(i) &= R_h |I_h(i)|^2 \\ W_a(i) &= W_g(i) + W_h(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

[0036] 式中,  $W_g(i)$  为编号为  $i$  的单元导线内导体和外导体功率之和,  $W_h(i)$  为编号为  $i$  的单元导线加热材料功率,  $W_a(i)$  为编号为  $i$  的单元导线总功率。

[0037] 运行参数分析:

[0038] 设内导体和外导体允许流过最大电流为  $I_{max}$ ; 最小电源电压  $U_{min}$ ;

[0039] 选择中间节点为初始值参数计算节点, 设单元导线制热材料功率为  $W_{min}$ , 则单元导线加热材料电阻为  $R_h$ , 设每次计算电压递增为  $U_{step}$ ,

[0040] 设中间节点的节点电压  $U(n)$  为最小电压  $U_{min}$  的 0.8 倍, 即:

$$[0041] \quad U(n) = 0.8U_{min}, \quad (3-10)$$

[0042] 单元导线加热材料电阻为:

$$[0043] \quad R_h = \frac{(0.8U_{min})^2}{W_{min}} \quad (3-11)。$$

[0044] 单元导线内外导体电阻和  $R_s$  计算、加热材料电阻率计算、单元导线电感计算和单元导线电容计算是: 嵌入均匀材料的自制热输电导线中,  $r_1$  表示内导体的半径,  $r_2$  表示加热材料包裹内导体后的半径,  $r_3$  表示外导体包裹嵌入材料后整个导线的半径,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  的单位为米;

[0045] 内导体横截面积用  $S_r$  表示, 单位为平方米, 外导体横截面积用  $S_w$  表示, 单位为平方米;

[0046] 则:

$$[0047] \quad \left. \begin{aligned} S_r &= \pi r_1^2 \\ S_w &= \pi r_3^2 - \pi r_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

[0048] (1) 单元导线内外导体电阻和  $R_s$  计算:

[0049] 设内导体电阻率为  $\rho_r$ , 设外导体电阻率为  $\rho_w$ , 电阻率单位为欧姆·米;



$$[0050] \quad R_s = L_d \left( \frac{\rho_r}{S_r} + \frac{\rho_w}{S_w} \right) \quad (3-13)$$

[0051] (2) 单元导线加热材料电阻率计算:

[0052] 设编号为*i*的单元导线加热材料电阻率为 $\rho_h(i)$ ,电阻率单位为欧姆·米;

$$[0053] \quad \rho_h(i) = \frac{\pi R_h (r_1 + r_2) L_d}{r_2 - r_1}, \quad i=2, 3, 4, \dots, 2n-1 \quad (3-14)$$

[0054] (3) 单元导线导体电感计算:

[0055]  $\mu_r$ : 内导体导磁率,单位:亨每米;内导体电感为 $L_r$ ;

$$[0056] \quad L_r = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \rho_r}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_1 \sqrt{50}} \quad (3-15)$$

[0057]  $\mu_w$ : 外导体导磁率,单位:亨每米;外导体电感为 $L_w$ ;

$$[0058] \quad L_w = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_w \rho_w}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_2 \sqrt{50}} \quad (3-16)$$

[0059] 单元导线导体电感: $L$ =内导体电感+外导体电感= $L_r+L_w$ ;

[0060] (4) 单元导线电容计算

[0061] 单元导线电容计算方法如式(3-17)所示:

$$[0062] \quad C = L_e \cdot \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3-17)$$

[0063] 式中, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ;  $\epsilon_r$ 为发热材料相对等效介电常数; $\epsilon_0$ 为真空介电常数。

[0064] 制热导线运行参数计算步骤是:

[0065] 第一步:设置最大电流 $I_{max}$ ,最小电源电压 $U_{min}$ ,单元导线制热材料功率 $W_{min}$ ,每次计算电压递增 $V_{step}$ ;

[0066] 第二步:计算根据式(3-10)计算中间节点的节点电压 $U(n)$ ;

[0067] 第三步:计算根据式(3-11)计算单元导线加热材料电阻 $R_h$ ;

[0068] 第四步:根据式(3-2)-(3-9)计算分布参数,

[0069] 第五步:判断节点编号为1的单元导线功率 $W_a(1)$ 是否大于 $0.9W_{min}$ ,是:进入第六步,否,进入第八步;

[0070] 第六步:判断 $I_g(2n-1)$ 是否小于 $I_{max}$ ,是:进入第七步,否,进入第八步;

[0071] 第七步:判断 $U(2n-1)$ 大于 $U_{min}$ 吗,是:运算结束;否,进入第八步;

[0072] 第八步: $U(n) = U(n) + U_{step}$ ,进入第三步。

[0073]  $U_{in} = U(2n-1) + I_g(2n-1) Z_L$ ;

[0074] 上述计算得到的 $U_{in}$ 和 $R_h$ 为优化的输入电源和单元导线制热材料电阻。

[0075] 本发明的积极效果是:

[0076] 本发明是针对CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》,对一种嵌入均匀加热材料的自制热输电导线实施防冰和融冰作业的工作状态进行分析,在采用交流电源实施防冰和融冰作业时,通过计算分析输电导线工作状态,指导输电导线的设计和运行,有利于施加交流电源的防冰融冰工作指导,有利于分析电能质量,有利于电网安全稳定运行。

#### (四)附图说明

[0077] 图1是将自制热输电导线分段并在内导体和外导体之间加入交流电源后,各导线参数示意图。

[0078] 图2是分布参数计算方法。

[0079] 图3是本发明所用导线的截面示意图。

[0080] 图中,1内导体、2加热材料、3外导体。

#### (五)具体实施方式

[0081] 本发明所涉及的自制热输电导线,是根据专利CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》的方法设计的嵌入均匀加热材料的自融冰导线。所分析的整根自制热输电导线中,加热材料为同样的均匀材料,加热材料属性处处相同,且本申请中,“加热”与“制热”表达同样的意思。

[0082] 将长度为 $L_a$ 的自制热输电导线均匀分为任意偶数段,设总的分段数为 $2n$ ,则每段长度为 $L_d$ ,将分段后的导线称为单元导线。 $L_a$ 为任意长度输电导线, $n$ 为非零的自然数。

$$[0083] \quad L_d = \frac{L_a}{2n} \quad (3-1)$$

[0084] 设单元导线上,内导体两端电阻为 $R_r$ ,外导体两端电阻为 $R_w$ ,单元导线内外导体电阻和为 $R_s$ , $R_s = R_r + R_w$ ;从内导体和外导体之间嵌入制热材料,且从内导体和外导体测量得到的单元导线加热材料电阻为 $R_h$ 。各单元导线电容为 $C$ ,单位为法拉;各单元导线导体电感为 $L$ ,单位为亨利。

[0085] 参见附图1。

[0086] 在自制热输电导线的一端加入交流电源,为自制热导线提供能源,交流电源加在内导体和外导体之间。

[0087] 在将自制热输电导线均匀分为每段长度为 $L_d$ 的 $2n$ 个单元导线中,离电源最近的单元导线编为 $2n$ 号,离电源最远的单元导线编为1号,1号单元导线与 $2n$ 号之间单元导线编号按序列依次递增,分别编号为 $2, 3, 4, \dots, 2n-3, 2n-2, 2n-1$ 。

[0088] 离电源最近的节点编号为 $2n-1$ ,离电源最远的节点编号为1;从节点1开始往电源方向的节点编号依次递增,分别为 $2, 3, 4, \dots, 2n-4, 2n-3, 2n-2$ 。

[0089] 选择 $2n-1$ 个节点中任一节点编号,设编号为 $i$ ,选择 $2n$ 个单元导线中任一单元导线,设编号为 $i$ ,

[0090] 交流电源电压用 $U_{in}$ 表示,外导体为电位参考点;每个单元导线上内导体和外导体流过的电流相等,设节点编号为 $i$ 的单元导线内导体和外导体流过的节点电流用 $I_g(i)$ 表示;节点编号为 $i$ 的单元导线内导体节点电压用 $U(i)$ 表示;节点编号为 $i$ 的单元导线上加热材料流过的节点加热材料电流为 $I_h(i)$ ;以编号为 $i$ 的节点为界,到1号单元导线之间的导线在节点 $i$ 处内导体外导体之间的节点综合阻抗用 $Z_a(i)$ 表示。 $Z_a(i)$ 与单元导线电容、单元导线加热材料电阻的并联阻抗称为节点综合并联阻抗,用 $Z(i)$ 表示;

[0091] 因为以节点 $i$ 为中心的单元导线参数、节点为 $i$ 的左边单元导线参数、节点为 $i$ 的右边单元导线参数的计算分析参数近似相等,上述参数是以节点 $i$ 为中心的单元导线参数,或节点为 $i$ 的左边单元导线参数,或是节点为 $i$ 的右边单元导线参数。

[0092] 自制热输电导线交流加热参数分析时,对如下分布参数进行计算:

[0093] 各单元导线加热材料电阻 $R_h$ ,各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗 $Z_{RC}$ ,各单元导线电感与单元导线内外导体电阻之和 $R_s$ 串联后的阻感串联阻抗 $Z_L$ ,节点综合阻抗 $Z_a(i)$ ,节点电流 $I_g(i)$ ,各节点电压 $U(i)$ ,节点加热材料电流 $I_h(i)$ ,节点功率计算。

[0094] 自制热导线运行参数优化选择:交流电源电压 $U_{in}$ 和内、外导体之间测量的单元导线加热材料电阻 $R_h$ 的优化选择。

[0095] 自制热输电导线交流加热参数分析时,参数计算是:

[0096] 各单元导线加热材料电阻与单元导线电容并联的阻容并联阻抗为 $Z_{RC}$ ,则有,

$$[0097] \left. \begin{aligned} X_c &= -\frac{1}{314C} \\ Z_{RC} &= \frac{R_h X_c^2 + jR_h^2 X_c}{R_h^2 + X_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

[0098] 式中, $X_c$ 为单元导线容抗; $C$ 为单元导线电容值,单位为法拉;

[0099] 各单元导线内外导体电阻和为 $R_s$ ,与单元导线导体电感串联后的阻感串联阻抗为 $Z_L$ ,则有,

$$[0100] \left. \begin{aligned} X_L &= 314L \\ Z_L &= R_s + jX_L \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

[0101] 式中, $X_L$ 为单元导线感抗; $L$ 为单元导线导体电感值,单位为亨利;

[0102] 当节点编号 $i=1$ 时,有,

$$[0103] \left. \begin{aligned} Z(1) &= Z_{RC} \\ Z_a(1) &= Z_L + Z(1) \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

[0104] 当节点编号 $i=2,3,4,\dots,2n-1$ 时,节点综合阻抗 $Z_a(i)$ 为,

$$[0105] \left. \begin{aligned} Z(i) &= \frac{Z_{RC} Z_a(i-1)}{Z_{RC} + Z_a(i-1)} \\ Z_a(i) &= Z_L + Z(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

[0106] 设交流电源压为 $U_{in}$ ,节点电流 $I_g(i)$ 为,

$$[0107] I_g(i) = \begin{cases} \frac{U_{in}}{Z_a(i)} & i = 2n-1 \\ I_g(i+1) - \frac{U(i+1)}{Z_{RC}} & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-6)$$

[0108] 各节点电压计算方法如式(3-7)所示,

$$[0109] U(i) = \begin{cases} U_{in} - I_g(i) Z_L & i = 2n-1 \\ U(i+1) - I_g(i) Z_L & i = 1, 2, \dots, 2n-2 \end{cases} \quad (3-7)$$

[0110] 节点加热材料电流为,

$$[0111] \quad I_h(i) = \frac{U(i)}{R_h} \quad (3-8)$$

[0112] 节点功率计算方法,

$$[0113] \quad \left. \begin{aligned} W_g(i) &= R_s |I_g(i)|^2 \\ W_h(i) &= R_h |I_h(i)|^2 \\ W_a(i) &= W_g(i) + W_h(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

[0114] 式中,  $W_g(i)$  为编号为  $i$  的单元导线内导体和外导体功率和,  $W_h(i)$  为编号为  $i$  的单元导线加热材料功率,  $W_a(i)$  为编号为  $i$  的单元导线总功率。

[0115] 参见图2。

[0116] 制热导线运行参数计算步骤是:

[0117] 第一步: 设置最大电流  $I_{max}$ , 最小电源电压  $U_{min}$ , 单元导线制热材料功率  $W_{min}$ , 每次计算电压递增  $U_{step}$ ;

[0118] 第二步: 计算根据式 (3-10) 计算中间节点的节点电压  $U(n)$ ;

[0119] 第三步: 计算根据式 (3-11) 计算单元导线加热材料电阻  $R_h$ ;

[0120] 第四步: 根据式 (3-2) - (3-9) 计算分布参数,

[0121] 第五步: 判断节点编号为1的单元导线功率  $W_a(1)$  是否大于  $0.9W_{min}$ , 是: 进入第六步, 否, 进入第八步;

[0122] 第六步: 判断  $I_g(2n-1)$  是否小于  $I_{max}$ , 是: 进入第七步, 否, 进入第八步;

[0123] 第七步: 判断  $V(2n-1)$  大于  $U_{min}$  吗, 是: 运算结束; 否, 进入第八步;

[0124] 第八步:  $U(n) = U(n) + U_{step}$ , 进入第三步。

[0125]  $U_{in} = U(2n-1) + I_g(2n-1) Z_L$ ; 上述计算得到的  $U_{in}$  和  $R_h$  为优化的输入电源和单元导线制热材料电阻。

[0126] 上述最大电流  $I_{max}$ 、最小电源电压  $U_{min}$ 、单元导线制热材料功率  $W_{min}$  和每次计算电压递增  $U_{step}$  的具体值根据不同的导线型号通过实验和仿真分析确定。

[0127] 运行参数分析:

[0128] 设内导体和外导体允许流过最大电流为  $I_{max}$ ; 最小电源电压  $U_{min}$ ;

[0129] 选择中间节点为初始值参数计算节点, 设单元导线制热材料功率为  $W_{min}$ , 则单元导线制热材料的电阻为  $R_h$ , 设每次计算电压递增为  $U_{step}$ ,

[0130] 设中间节点的节点电压  $U(n)$  为最小电压  $U_{min}$  的0.8倍, 即:

$$[0131] \quad U(n) = 0.8U_{min}, \quad (3-10)$$

[0132] 单元导线制热材料电阻为:

$$[0133] \quad R_h = \frac{(0.8U_{min})^2}{W_{min}} \quad (3-11)。$$

[0134] 参见图3。

[0135] 本发明采用的根据CN201610867150.1《一种自融冰导体以及融冰设备》的方法设计的嵌入均匀加热材料的自制热输电导线, 其截面结构如图3所示。

[0136] 其中,  $r_1$  表示内导体的半径,  $r_2$  表示加热材料包裹内导体后的半径,  $r_3$  表示外导体包裹嵌入材料后整个导线的半径,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  的单位为米;

[0137] 内导体横截面积用 $S_r$ 表示,单位为平方米,外导体横截面积用 $S_w$ 表示,单位为平方米;

[0138] 则:

$$[0139] \left. \begin{aligned} S_r &= \pi r_1^2 \\ S_w &= \pi r_3^2 - \pi r_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

[0140] (1) 单元导线内外导体电阻和 $R_s$ 计算:

[0141] 设内导体电阻率为 $\rho_r$ ,设外导体电阻率为 $\rho_w$ ,电阻率单位为欧姆·米;

$$[0142] R_s = L_d \left( \frac{\rho_r}{S_r} + \frac{\rho_w}{S_w} \right) \quad (3-13)$$

[0143] (2) 单元导线加热材料电阻率计算:

[0144] 设编号为 $i$ 的单元导线加热材料电阻率为 $\rho_h(i)$ ,电阻率单位为欧姆·米;

$$[0145] \rho_h(i) = \frac{\pi R_h (r_1 + r_2) L_d}{r_2 - r_1}, \quad i=2, 3, 4, \dots, 2n-1 \quad (3-14)$$

[0146] (3) 单元导线导体电感计算:

[0147]  $\mu_r$ : 内导体导磁率,单位:亨每米;内导体电感为 $L_r$ ;

$$[0148] L_r = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \rho_r}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_1 \sqrt{50}} \quad (3-15)$$

[0149]  $\mu_w$ : 外导体导磁率,单位:亨每米; $L_w$ : 外导体电感 $L_w$ :

$$[0150] L_w = L_d \cdot \sqrt{\frac{\mu_w \rho_w}{4\pi^3}} \frac{1}{2r_2 \sqrt{50}} \quad (3-16)$$

[0151] 单元导线导体电感: $L = \text{内导体电感} + \text{外导体电感} = L_r + L_w$ ;

[0152] (4) 单元导线电容计算

[0153] 单元导线电容计算方法如式(3-17)所示:

$$[0154] C = L_e \cdot \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3-17)$$

[0155] 式中, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ;  $\epsilon_r$ 为发热材料相对等效介电常数; $\epsilon_0$ 为真空介电常数。

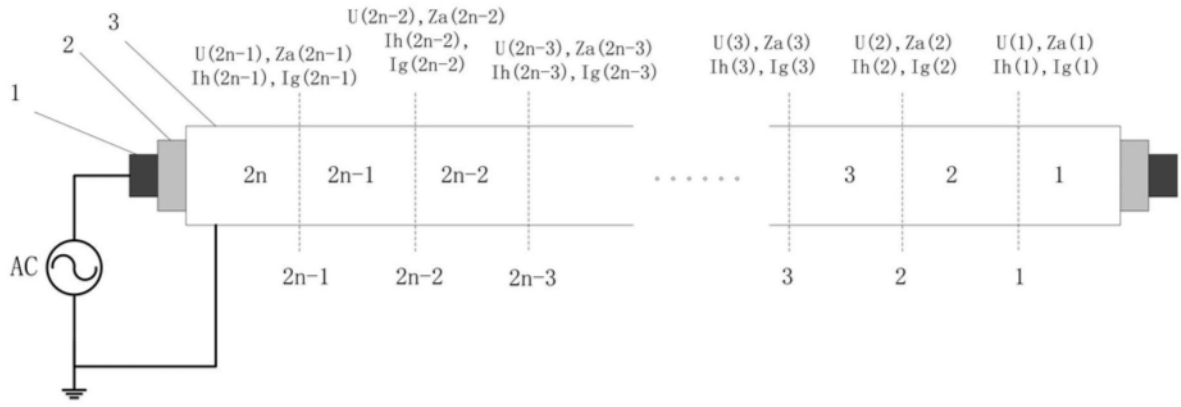


图1

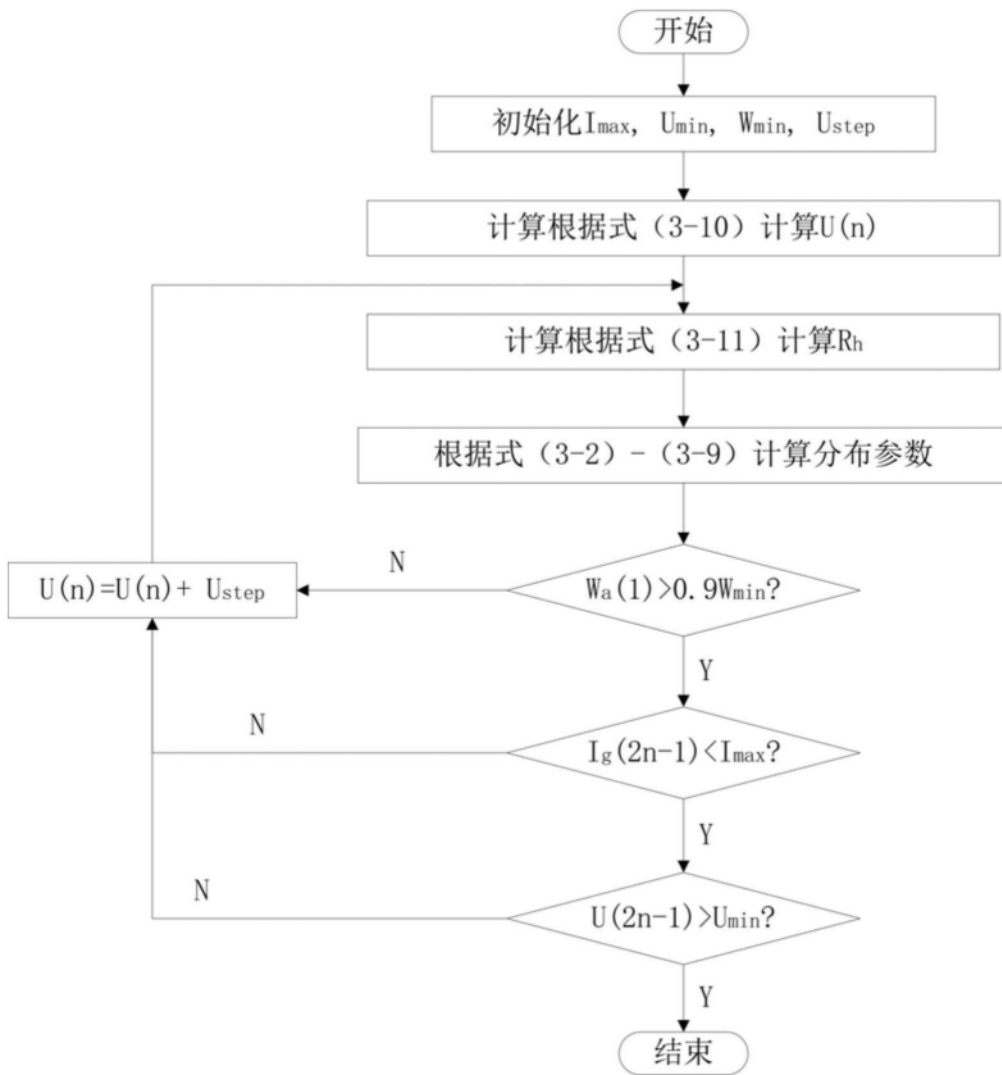


图2

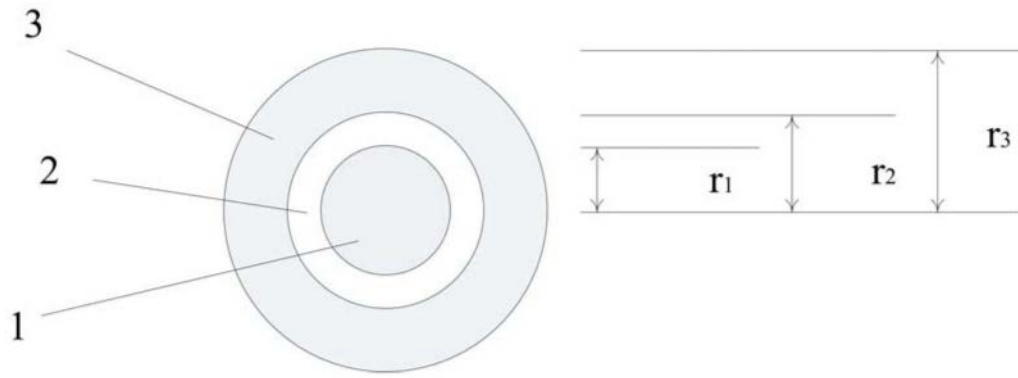


图3