

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 4 月 7 日 (07.04.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/068074 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 31/08 (2006.01) **G01R 31/12** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/136201
- (22) 国际申请日: 2020 年 12 月 14 日 (14.12.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202011052977.X 2020年9月29日 (29.09.2020) CN
- (71) 申请人: 山东大学(SHANDONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 国网上海市电力公司(STATE GRID SHANGHAI MUNICIPAL ELECTRIC POWER COMPANY) [CN/CN]; 中国上海市浦东新区源深路1122号, Shanghai 200122 (CN)。

(72) 发明人: 石访(SHI, Fang); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 张恒旭(ZHANG, Hengxu); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 谢伟(XIE, Wei); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 方陈(FANG, Chen); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 张林林(ZHANG, Linlin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 华斌(HUA, Bin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 刘舒(LIU, Shu); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 徐凯(XU, Kai); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 朱征(ZHU, Zheng); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。

(54) Title: EARLY WARNING METHOD AND SYSTEM FOR SLOWLY DEVELOPING PERMANENT FAULT

(54) 发明名称: 一种缓慢发展型永久性故障预警方法和系统

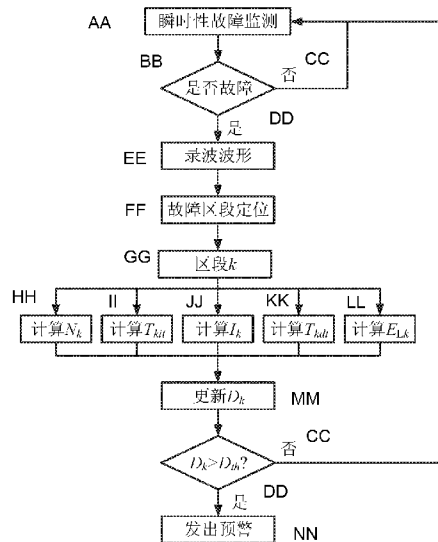


图 1

AA Transient fault monitoring
BB Whether a fault occurs
CC No
DD Yes
EE Recorded waveform
FF Fault section positioning
GG Section k
HH, II, JJ, KK, LL Calculate
MM Update
NN Issue an early warning

(57) Abstract: An early warning method and system for a slowly developing permanent fault. Said method comprises: acquiring the recorded waveform of each transient fault before a permanent fault occurs in a line; determining a fault section by means of the recorded waveform, and extracting a key feature quantity; calculating the insulation degradation value of each transient fault according to the key feature quantity; accumulating the insulation degradation values obtained multiple times in the same fault section, to acquire an accumulated insulation degradation value; and when the accumulated insulation degradation value exceeds an insulation degradation threshold, issuing an early warning. The present invention acquires the recorded waveform of each transient fault before a permanent fault occurs, extracts a fault key feature quantity, determines the insulation degradation degree of a line by means of the extracted key feature quantity, and then issues an early warning according to the insulation degradation degree.

历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。
时志雄(SHI, Zhixiong); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 魏新迟(WEI, Xinchí); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 鲍伟(BAO, Wei); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司(JINAN SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国山东省济南市经十路17703号华特广场B308室, Shandong 250061 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种缓慢发展型永久性故障预警方法和系统, 方法包括: 获取线路发生永久性故障前的各次瞬时性故障的录波波形; 通过录波波形判断故障区段, 并提取关键特征量; 依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值; 将同一故障区段多次获得的绝缘劣化值进行累积, 获取累积绝缘劣化值; 当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时, 发出预警。获取永久故障发生前的各次瞬时性故障录波波形, 并提取故障关键特征量, 通过提取的关键特征量判断线路的绝缘劣化程度, 进而根据绝缘劣化程度发出预警。

一种缓慢发展型永久性故障预警方法和系统

技术领域

本公开涉及一种缓慢发展型永久性故障预警方法和系统。

背景技术

本部分的陈述仅仅是提供了与本公开相关的背景技术信息，不必然构成在先技术。

配电线路直接连接用户，直接影响着生活生产的各方面，在电力系统中有着极其重要的作用，由于承担着分配电能的职责，配电网覆盖面较大，具有多馈线、多分支、拓扑多变、点多面广等特点，运行环境相对较恶劣，非常容易发生故障，统计数据表明大部分线路故障属于瞬时性故障。

对于一条配电线路来说，当单相瞬时接地故障多次发生在一相同位置时，每次故障都会在接地点释放能量，破坏接地点处的线路绝缘。尽管这种故障是暂时的，故障持续时间大多从几毫秒至数分钟不等，但每次故障发生后线路的绝缘都会产生不同程度的劣化，这样多次的积累会使该线路的绝缘劣化达到极限，最终在某次接地后集中爆发形成永久性故障，这种故障模式可总结为缓慢发展型永久性故障，缓慢发展型永久性故障模式也符合实际中很多的故障情景。

如何对缓慢发展型永久性故障进行预警，从而避免永久性故障的发生是极其重要的。

发明内容

本公开为了解决上述问题，提出了一种缓慢发展型永久性故障预警方法和系统，获取永久故障发生前的各次瞬时性故障录波波形，并提取故障关键特征量，通过提取的关键特征量判断线路的绝缘劣化程度，进而根据绝缘劣化程度发出预警。

本公开的第一目的是，提出一种缓慢发展型永久性故障预警方法，包括：
获取线路发生永久性故障前的各次瞬时性故障的录波波形；
通过录波波形判断故障区段，并提取关键特征量；
依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值；
将同一故障区段多次获得的绝缘劣化值进行累积，获取累积绝缘劣化值；
当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时，发出预警。

进一步的，关键特征量，包括，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子。

进一步的，一段时间内瞬时性故障发生的次数与绝缘劣化程度呈正相关；两次瞬时性故障之间的间隔与绝缘劣化程度呈负相关；暂态零模电流幅值与绝缘劣化程度呈正相关；故障持续时间与绝缘劣化程度呈正相关；零序电流低频带能量因子与绝缘劣化程度呈负相关。

进一步的，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值和故障持续时间，从获取的录波波形中直接获取。

进一步的，对获取的录波波形进行频带分解获得各子频带能量，根据第一个子频带能量与各子频带能量之和的比值获取零序电流低频带能量因子。

进一步的，计算各次瞬时性故障的绝缘劣化值时，考虑关键特征量与绝缘劣化程度的相关关系。

进一步的，绝缘劣化值越大说明绝缘劣化程度越严重。

进一步的，绝缘劣化阈值，根据具体配电网实际运行经验确定。

本公开的第二目的是，提出一种缓慢发展型永久性故障预警系统，包括，检测模块、控制器和报警模型，通过检测模块获取瞬时性故障的录波波形，控制器接收检测模块获取的录波波形后，提取录波波形的关键特征量，依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值，将多次获得的绝缘劣化值进行累积，获取累积绝缘劣化值，当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时，发送报警信息至报警模块进行报警。

进一步的，控制器从录波波形中提取的关键特征量，包括，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子。

与现有技术相比，本公开的有益效果为：

- 1、本公开利用永久故障发生前的各次瞬时性故障录波波形，获取故障关键特征量，通过提取的关键特征量计算了线路的累积绝缘劣化值，根据累积绝缘劣化值判断绝缘劣化程度，并发出预警，实现了对缓慢发展型永久性故障的预警。

2、本公开仅获取瞬时性故障录波波形，即可完成对缓慢发展型永久性故障的预警，而无需额外对其他故障特征进行检测，也无需大量安装额外的其他故障特征检测和处理装置，降低了运营成本，更符合实际应用的要求。

附图说明

构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。

图 1 为本公开缓慢发展型永久性故障预警方法的故障预警流程；

图 2 为本公开累积绝缘劣化值变化曲线；

图 3(a)为实施例 1 中某缓慢发展型永久性故障瞬时故障 1 频谱能量分布图；

图 3(b)为实施例 1 中某缓慢发展型永久性故障瞬时故障 2 频谱能量分布图；

图 3(c)为实施例 1 中某缓慢发展型永久性故障瞬时故障 3 频谱能量分布图；

图 4 为单相接地故障分量模网络图；

图 5 为瞬时单相接地故障等值电路；

图 6 为绝缘劣化不同时期的线路参数变化图。

具体实施方式：

下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

实施例 1

对架空线路来说，其上设备众多，有较大概率发生瞬时接地故障，例如雷击、绝缘部件闪络、瞬时放电、树枝等异物短时触碰等都会导致配电线路瞬时接地故障的发生，根据实际故障统计，在某架空线为主的配电网中，20 次永久性接地故障里有 7 次曾在故障前发生不同程度的瞬时故障，其中有 2 次在永久性故障前

的三天内分别发生了多达 15 次和 16 次的瞬时性接地，有 1 次在永久性故障前一小时内发生了 7 次瞬时性接地，再如某变电站，6 次永久性接地故障前 72 小时内曾有瞬时接地现象发生，最多的有 16 次瞬时性故障发生。对电缆线路来说，现代电缆的绝缘层主要为交联聚乙烯，通常认为其绝缘水平较高且绝缘击穿不可逆，一旦击穿则不可恢复，在电缆故障的实际统计中，也发现了相当部分的瞬时故障，如电缆中间接头和终端的故障、电缆本体的瞬时击穿现象，在某电缆故障案例中，内部持续 100 分钟的永久性接地故障发生前，检测到有 8 次瞬时性接地故障发生。

可以看出对于一条配电线路来说，当单相瞬时接地故障多次发生在一相同位置时，每次故障都会在接地点释放能量，破坏接地点处的线路绝缘。尽管这种故障是暂时的，故障持续时间大多从几毫秒至数分钟不等，大多小于 1s，但每次故障发生后线路的绝缘都会产生不同程度的劣化，这样多次的积累会使该线路的绝缘劣化达到极限，最终在某次接地后集中爆发形成永久性故障，这种故障模式可总结为缓慢发展型永久性接地故障，这种故障模式也符合实际中很多的故障情景。

随着以现代信息技术为基础的电网同步量测系统及调度自动化系统的发展，故障录波装置及配网侧 PMU 等高精度同步量测装置进一步覆盖配电网各重要节点，调度中心能够获取到的有统一同步时标的精确信息越来越多，早期绝缘放电的各电气量的实际变化波形也能以时间序列的形式得到记录，其中蕴含着反映系统运行状态的丰富信息。

因此对永久性故障发生前的各次瞬时性故障录波数据进行分析，找到故障早期特征，得到故障特征-时空分布响应特性，进而分析判断线路的绝缘水平，适时给出报警信号，对缓慢发展型永久性接地故障提出预警方法，从而避免永久故障的发生是极其重要的。

分析永久性故障总体发展规律可知，永久性故障的形成是一个缓慢发展的过程，在发生永久性故障前，往往会发生瞬时性故障接地，此时元件会有间歇性放电-击穿的物理演化过程。通过对电缆、架空线及绝缘子及等主要设备的绝缘老化及故障形成进行分析得到配电线路永久性故障的总体发展规律。

配电网电力设备在运行电压及热应力、外机械力、受潮等环境条件的长期作用下，其绝缘呈现出一个缓慢劣化的过程。对于电缆、绝缘子内部等固体绝缘来说，在运行电压下一般不会被击穿，需要考虑的是在瞬时过电压作用下绝缘可能击穿，但瞬时过电压持续时间不长，在几秒后便会消失，此后电网将恢复正常运行。对于电力设备的外绝缘、油绝缘和气体绝缘来说，由于中低压配电网为小电流接地系统，故障电流较小且消弧线圈会抑制瞬时电弧，即使在运行电压下可能发生瞬时性击穿，在故障电流高频过零点时电弧也会熄灭，再考虑到故障点杂质和水分被电弧加热而烧毁和烘干，电弧可自然熄灭不会重燃。劣化初期，单相接地故障有明显地电弧接地特征，当再次出现过电压及各种恶劣运行条件时，绝缘薄弱点可能被继续击穿并进一步损坏绝缘，不稳定地电弧接地也逐渐向金属性接地发展，最终发生永久性单相接地。在这一过程中，总体上瞬时绝缘击穿次数呈上升态势，两次瞬时性故障间隔时间也呈缩短趋势。

在对绝缘劣化形成的电树枝导致的绝缘电阻和分布电容变化规律研究的相关工作中还发现，劣化前期会出现分布电容波动并不断增加而劣化中后期会出现等效电阻逐渐减小的现象，电阻的下降和电容的增加与绝缘劣化形成水树枝的程度一致且绝缘的相对介电常数和绝缘电阻均呈现非线性变化，如图 6 所示。可以看出在线路绝缘的劣化过程中，一般伴有等效分布电容的增加和绝缘电阻的下降，即在缓慢发展型永久性接地故障的瞬时性故障发展阶段过渡电阻呈下降趋势。

配电网中其他各种故障大多均由单相接地故障发展而来，单相接地故障发生后，一是非故障相电压升高至线电压，在其绝缘薄弱点处单相故障很可能发展成为两相乃至三相故障，特别是间歇性电弧接地会使非故障相出现高达 3.5p.u. 的电弧接地过电压而造成跳闸，二是对于断路器等开关设备，还会因为接地电弧与非故障相接触导致两相及三相短路，造成线路跳闸使故障范围扩大。

分析瞬时性接地故障原理可知，我国配电网运行方式大部分为中性点经消弧线圈接地，在发生瞬时单相接地故障时，系统的过渡过程可通过在故障点附加一个零序电压源来等效，实际数据表明在谐振接地配电网中线路网络阻尼率，即故障接地点有功电流与容性电流之比很小，忽略接地点的有功电流不会影响分析结果，以此作为接下来分析的简化条件，在图 4 单相接地故障分量模网络图基础上

得到瞬时单相接地故障等值电路如图 5 所示, 图中 L 是两线模回路电感之和, 约等于线路正序电感值的两倍, R 为两线模回路电阻的和, 近似为线路正序电阻值的两倍, R_r 表示零序等值电阻, 为故障接地点所形成的电弧通道中的等效过渡电阻, C_0 为零模电容, $3L_L$ 表示消弧线圈电感值, u_k 表示故障点附加的零序电源电压, 开关 S 闭合相当于瞬时接地故障发生。根据动态电路分析理论, 借助 Laplace 变换及反变换对等值电路的电容和电感电流进行推导, 如式 (1)、(2) 所示。

$$i_C = I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin\omega_f t - \cos\varphi \cos\omega_f t \right) e^{-\delta t} + I_{Cm} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$i_L = I_{Lm} \cos\varphi e^{-t/\tau_L} - I_{Lm} \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中, I_{Cm} —单相接地故障点流过的容性电流幅值, $I_{Cm} = U_m \omega C_0$; ω_f —暂态电流自由震荡角频率; δ —暂态电容电流衰减系数; ω —电源电压角频率; I_{Lm} —回路中电感电流幅值; φ —故障相电压初相角; τ_L —电感回路时间常数。

其中 i_C 为电容回路电流, 式 (1) 中第一项为暂态电容电流分量, 具有高频自由震荡性质, 是由于回路中含有电感和电容而产生的, 因为回路中同时还有电阻, 第一项会逐渐衰减, 最终回路中只有稳态电容电流分量, 也就是式 (1) 中第二项。 i_L 为电感回路电流, 由于该回路没有电容仅含有电感和电阻, 所以式 (2) 中第一项暂态电感电流为衰减直流分量, 第二项为稳态电感电流分量。

两部分分量叠加可得到接地点故障总电流, 如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} i &= i_C + i_L \\ &= I_{Cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin\omega_f t - \cos\varphi \cos\omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] + I_{Lm} [\cos\varphi e^{-t/\tau_L} - \cos(\omega t + \varphi)] \\ &= (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + [I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin\omega_f t - \cos\varphi \cos\omega_f t \right) e^{-\delta t} + I_{Lm} \cos\varphi e^{-t/\tau_L}] \\ &= i_s + i_t \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 中第一项为总电流的稳态分量, 观察第一项可知, 稳态电流为电容和电感电流稳态分量之差, 两者角频率相同, 均为电源电压角频率, 所以总电流稳态分量的成分单一, 其性质与消弧线圈补偿度有关, 当补偿度大于 1 时, 故障线路首端和接地点会流过较小的感性基波电流; 补偿度小于 1 时, 故障线路和接地点流过的是较小的容性基波电流; 补偿度等于 1 时, 故障线路和接地点基波电

流为零。因此消弧线圈的补偿作用使得稳态分量非常微弱，无法从中得到更多的有关瞬时故障的信息。

第二项为总电流暂态分量，是由电容电流和电感电流的暂态分量叠加而成，二者频率不同，甚至相差较大，所以它们基本不能相互抵消反而更有可能变大，零模电流的暂态性质和接地点过渡阻抗、线路参数之间相互影响、存在紧密联系，虽然并不能直接据此直接评估配电线路的绝缘状态，但是从这一关系可以发现，通过提取瞬时故障后零模电流的相关暂态特征量来跟线路绝缘状态进行关联是可行的，据此暂态零模电流被本文选取作为研究配电线路绝缘状态的特征量提取来源。

接下来对暂态零模电流进行具体分析，暂态零模电流表达式为：

$$i_t = I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin\omega_f t - \cos\varphi \cos\omega_f t \right) e^{-\delta t} + I_{Lm} \cos\varphi e^{-t/\tau_L} \quad (4)$$

1) 故障初始相角

多数情况下，配电网中线路某处因绝缘击穿而引起的瞬时性接地故障常发生于相电压接近于最大值的瞬间，即故障初始相角 $\varphi = \pi/2$ 的时刻，此时暂态零模电流分量可表示为：

$$i_t' = I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin\omega_f t e^{-\delta t} \quad (5)$$

即发生瞬时性接地故障时暂态零模电流分量中不包含感性分量，只有震荡衰减的容性分量。

2) 过渡电阻与暂态电流振荡频率

暂态电流自由震荡角频率 ω_f 是由容性分量的振荡频率决定，考虑实际配电网参数后，其计算公式为：

$$\omega_f = 2\pi f_c = \sqrt{\left(\frac{3R_r + R}{2R} \right)^2 - \frac{1}{LC_0}} = \sqrt{\frac{1}{LC_0} - \left(\frac{3R_r + R}{2R} \right)^2} \quad (6)$$

对一个谐振接地配电网来说，配电线路参数 R 、 L 、 C_0 可以近似看作是固定的，而过渡阻抗的变化范围则较大，因而暂态电流自由震荡角频率主要取决于过渡阻抗，过渡电阻的变化会引起暂态电流振荡频率的变化。考虑到配电的实际参

数, 过渡电阻的增大会使故障信号的频谱能量分布向低频带方向移动, 即过渡电阻变大, 暂态零模电流高频带的含量会变少。

3) 过渡电阻与暂态零模电流幅值

在实际配电网中单相接地故障时, 架空线路的故障暂态零模电流振荡频率 ω_f 约在 300Hz~1500Hz 的范围内, 电缆线路由于其电感远小于架空线路而分布电容大于架空线路, 故障暂态零模电流振荡频率 ω_f 范围一般为 1500Hz~3000Hz, 因此故障暂态零模电流振荡频率 ω_f 的值远大于工频频率 ω 。故障暂态零模电流的幅值大小主要由 ω_f/ω 的比值决定而且幅值与振荡频率成正比关系, 振荡频率 ω_f 与过渡电阻相关, 因此过渡电阻在改变振荡特性的同时也改变了暂态零模电流的幅值大小, 过渡电阻越大, 暂态零模电流的幅值越小。

基于分别对永久性接地故障规律及瞬时性接地故障原理的分析, 对缓慢发展型永久性接地故障的特点做出总结:

1) 瞬时性接地故障一般为单相接地故障

实际配电网中, 三相线路的绝缘劣化程度不会完全一致, 因此瞬时性故障总是在绝缘最薄弱点发生, 形成单相接地, 因此瞬时性故障一般均为单相接地故障。

2) 接近发生永久性故障时, 瞬时性故障发生频率及持续时间呈上升趋势

当线路绝缘的劣化加重时, 绝缘强度变的不容易恢复, 在发生瞬时性故障时电弧燃烧的持续时间变长, 且该线路变的更容易建立电弧, 这又会进一步加剧绝缘劣化, 这一过程不断发展最终绝缘完全损坏。接近发生永久性故障时, 瞬时性故障发生频率及持续时间呈上升趋势。

3) 故障暂态零模电流中蕴含着丰富的瞬时性接地有关信息

绝缘劣化而引起的瞬时性接地故障常发生于初始相角 $\varphi=\pi/2$ 附近, 零模电流中暂态分量主要含震荡衰减的容性分量且比稳态分量大得多, 适合作为研究线路绝缘状态的数据来源。

4) 过渡电阻引发暂态零模电流频谱变化和幅值变化

绝缘劣化过程中发生的故障, 过渡电阻呈下降趋势, 这一变化会引起暂态电流振荡频率的变化, 使频谱能量分布向高频段移动, 且过渡电阻在改变振荡特性的同时也改变了暂态零模电流的幅值大小, 使暂态零模电流的幅值变大。

基于上述研究, 在该实施例, 提出了一种缓慢发展型永久性故障预警方法,

包括:

(一) 获取永久性故障前的各次瞬时性故障的录波波形;

(二) 从获取的录波波形中定位故障区段, 并提取关键特征量, 关键特征量, 包括, 一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子;

a. 一段时间内瞬时性故障发生的次数 N_k

设定一段固定时间长度的窗口, 在窗口沿时间轨迹滑动的过程中, 考察时间窗口内瞬时性故障发生次数, 瞬时性故障发生越频繁, 则线路绝缘受到的破坏越严重, 距永久性接地故障发生也就越近, 与绝缘劣化程度呈正相关。

b. 两次故障之间的间隔 T_{kit}

考察第 k 条线路本次瞬时性故障与上一次瞬时性故障之间的时间间隔, 与绝缘劣化程度呈负相关, 在绝缘接地故障频率上升, 线路绝缘破坏加重的过程中, 该时间间隔会越来越短。

c. 暂态零模电流幅值 I_k

暂态零模电流幅值一定程度上反映了故障点接地阻抗的大小, 也间接反映了绝缘劣化的程度, 与绝缘劣化程度呈正相关, 暂态零模电流幅值越大, 绝缘劣化程度越高, 该次瞬时性故障越严重。

d. 故障持续时间 T_{kdt}

故障持续时间越长, 该次瞬时性接地故障的强度越大, 则绝缘破坏越严重, 线路绝缘水平下降程度越大, 与绝缘劣化程度呈正相关。

e. 零序电流低频带能量因子 E_{Lk}

定义低频带能量在总能量中的占比为零序电流低频带能量因子, 线路绝缘劣化过程中, 常伴随绝缘电阻的下降和等效分布电容的增加, 零序电流的在各频带的能量分布与瞬时故障的强度有关, 零序电流低频带能量因子越小, 则过渡电阻越小, 绝缘劣化越严重, 与绝缘劣化程度呈负相关。

除零序电流低频带能量因子外, 其他四个特征均可依据瞬时性故障录波数据直接计算, 而零序电流低频带能量因子需先对录波波形进行频带分解后再计算。利用小波包变换对零序电流进行等宽频带分解, 也就是让信号通过高低通组合形成的共轭正交滤波器组, 不断将上一层的信号继续细分至不同的频段上, 滤波器

每作用在信号上一次，采样间隔就增加一倍，数据点减半。若信号的采样频率为 f_s ，则由采样定理，Nyquist频率为 $f_s/2$ ， n 层分解后频段带宽为 $f_s/2/2^n=f_s/2^{n+1}$ ，第 j 个子频段的频率范围可以表示为：

$$\left[\frac{f_s}{2^{n+1}}(j-1), \frac{f_s}{2^{n+1}}j \right] \quad j = 1, 2, \dots, 2^n \quad (7)$$

记信号 x_k 进行 n 层分解后第 j 个子频段的系数为 $C_j^n(m)$ ， m 为各子频带下的系数个数，则各子频带能量为：

$$e_j = \sum_m [C_j^n(m)]^2 \quad (8)$$

通过合理设置分解层数 n ，使工频50Hz出现在 $j=1$ 频段且避免三次、五次谐波和工频混叠，则可得零序电流低频带能量因子 E_{Lk} 为：

$$E_{Lk} = \frac{e_1}{\sum_j e_j} \quad (9)$$

（三）依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值，并将同一故障区段，多次获得的绝缘劣化值进行累积，获取累积绝缘劣化值；

将各关键特征量按其于绝缘劣化程度的相关关系构造为绝缘劣化值函数 D ， D 越大说明绝缘劣化程度越严重。线路 k 的累积劣化值 D_k^p 定义为历史劣化值 D_k^{p-1} 与本次瞬时性故障造成的劣化值 D_k' 之和，如式（10）所示：

$$D_k^p = D_k^{p-1} + D_k' = D_k^{p-1} + \frac{T_{kdt}^p I_k^p N_k^p}{E_{Lk}^p T_{kit}^p} \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

$$D_k^0 = 0$$

利用瞬时性故障的录波波形计算各特征量后更新绝缘劣化值函数，获得的累积绝缘劣化值变化曲线如图2所示。

本公开，除通过关键特征量与绝缘劣化程度间的相关性关系构造函数外，也可基于样本训练的神经网络方法获得关键特征量与绝缘劣化程度间的映射关系，并通过引入权重区别不同关键特征量对绝缘劣化程度的贡献。

（四）当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时，发出预警，绝缘劣化阈值，

根据具体配电网实际运行经验确定。

在某缓慢发展型永久性故障案例中各次瞬时性故障频谱能量分布如图 3 (a)-3 (c) 所示, 永久性故障之前曾发生过三次瞬时性故障。

本公开在分析永久性故障发展规律及瞬时性接地故障原理, 对缓慢发展型永久性接地故障的特点做出总结的基础上, 从瞬时性故障发生频率和瞬时性故障强度两方面提取了早期瞬时性故障放电波形的关键特征集, 并用提取的关键特征量对缓慢发展型永久性接地故障中绝缘劣化过程进行了良好反映, 从而预测了缓慢发展型永久性故障。

本公开的预警方法是基于配电网故障录波装置信号处理机制所设计的, 不会出现因为需要大量安装额外的其他故障特征检测和处理装置带来的运营成本过多增加的问题, 更符合于实际应用的要求。

实施例2

在该实施例中, 提出一种缓慢发展型永久性故障预警系统, 包括, 检测模块、控制器和报警模型, 检测模块获取瞬时性故障的录波波形, 控制器接收检测模块获取的录波波形后, 提取录波波形的关键特征量, 依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值, 并将多次获得的绝缘劣化值进行累积, 获取累积绝缘劣化值, 当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时, 发送报警信息至报警模块进行报警。

控制器从录波波形中提取的关键特征量, 包括, 一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子。

以上仅为本申请的优选实施例而已, 并不用于限制本申请, 对于本领域的技术人员来说, 本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内, 所作的任何修改、等同替换、改进等, 均应包含在本申请的保护范围之内。

上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述, 但并非对本公开保护范围的限制, 所属领域技术人员应该明白, 在本公开的技术方案的基础上, 本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本公开的保护范围以内。

- 1、一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，包括：
获取线路发生永久性故障前的各次瞬时性故障的录波波形；
通过录波波形判断故障区段，并提取关键特征量；
依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值；
将同一故障区段多次获得的绝缘劣化值进行累积，获取累积绝缘劣化值；
当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时，发出预警。
- 2、如权利要求1所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，关键特征量，包括，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子。
- 3、如权利要求2所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，一段时间内瞬时性故障发生的次数与绝缘劣化程度呈正相关；两次瞬时性故障之间的间隔与绝缘劣化程度呈负相关；暂态零模电流幅值与绝缘劣化程度呈正相关；故障持续时间与绝缘劣化程度呈正相关；零序电流低频带能量因子与绝缘劣化程度呈负相关。
- 4、如权利要求2所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值和故障持续时间，从获取的录波波形中直接获取。
- 5、如权利要求2所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，对获取的录波波形进行频带分解获得各子频带能量，根据第一个子频带能量与各子频带能量之和的比值获取零序电流低频带能量因子。
- 6、如权利要求1所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，计算各次瞬时性故障的绝缘劣化值时，考虑关键特征量与绝缘劣化程度的相关关系。
- 7、如权利要求1所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，绝缘劣化值越大说明绝缘劣化程度越严重。
- 8、如权利要求1所述的一种缓慢发展型永久性故障预警方法，其特征在于，绝缘劣化阈值，根据具体配电网实际运行经验确定。
- 9、一种缓慢发展型永久性故障预警系统，其特征在于，包括，检测模块、

控制器和报警模型，通过检测模块获取瞬时性故障的录波波形，控制器接收检测模块获取的录波波形后，提取录波波形的关键特征量，依据关键特征量计算各次瞬时性故障时的绝缘劣化值，将多次获得的绝缘劣化值进行累积，获取累积绝缘劣化值，当累积绝缘劣化值超过绝缘劣化阈值时，发送报警信息至报警模块进行报警。

10、如权利要求 9 所述的一种缓慢发展型永久性故障预警系统，其特征在于，所述控制器从录波波形中提取的关键特征量，包括，一段时间内瞬时性故障发生的次数、两次瞬时性故障之间的间隔、暂态零模电流幅值、故障持续时间和零序电流低频带能量因子。

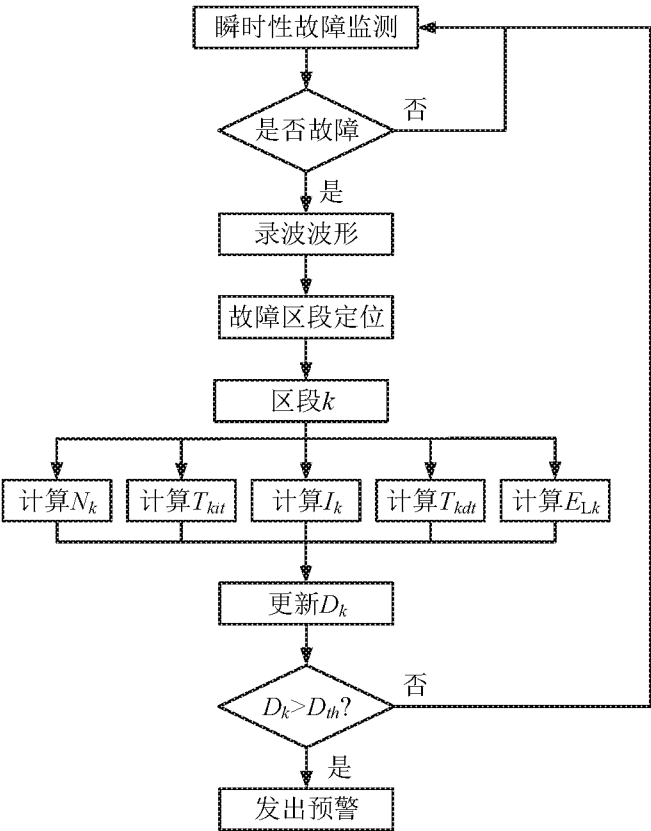


图 1

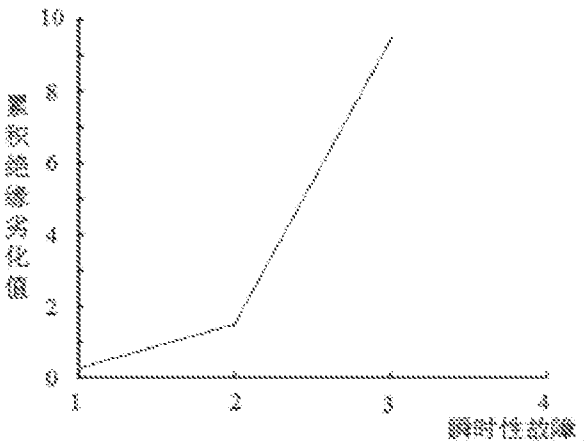


图 2

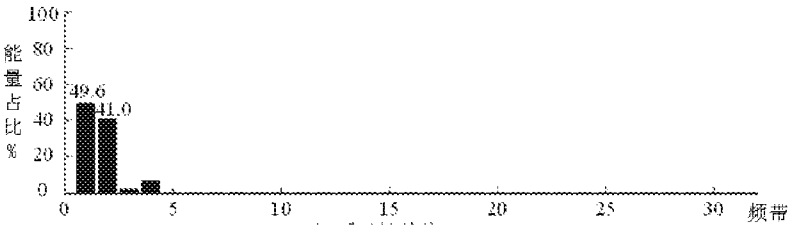


图 3 (a)

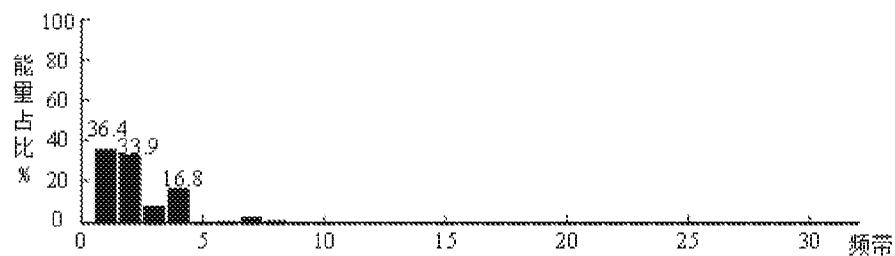


图 3 (b)

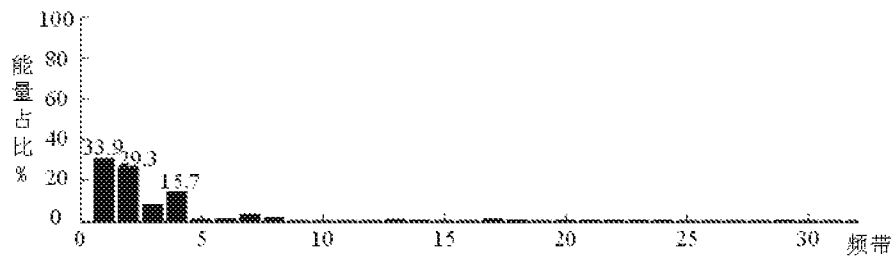


图 3 (c)

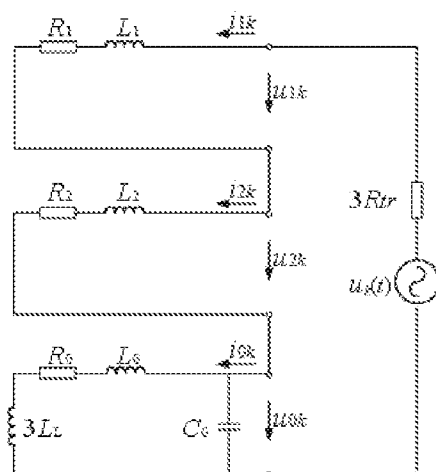


图 4

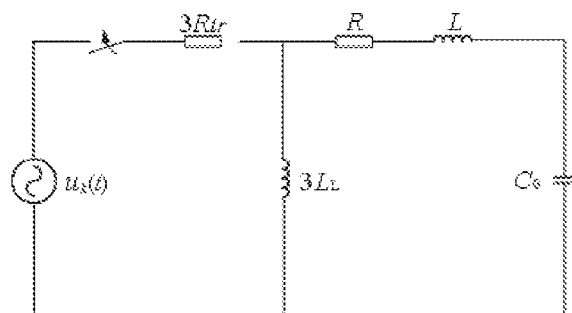


图 5

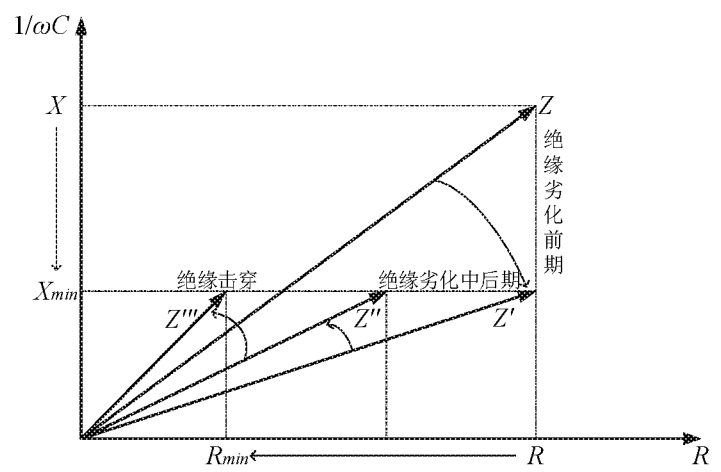


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/136201

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/08(2006.01)i; G01R 31/12(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R 31/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 山东大学, 输电, 配电, 线路, 永久, 瞬时, 故障, 暂时, 暂态, 预警, 录波, 绝缘, 劣化, 相关, 累积, 积累, 累计, 低频带, 能量, 特征, 阈值, failure, insulat+, characteristic, accumulat+, low, threshold, wave, power, energy

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 103954887 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.) 30 July 2014 (2014-07-30) description, paragraphs [0002]-[0007] and [0029]-[0047]	1-10
A	CN 202486278 U (YUNAN GRID CO.,LTD.,QUJING POWER SUPPLY BUREAU) 10 October 2012 (2012-10-10) entire document	1-10
A	CN 103018627 A (FUJIAN POWER CO., LTD. et al.) 03 April 2013 (2013-04-03) entire document	1-10
A	CN 106451378 A (LOGISTICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF PLA.) 22 February 2017 (2017-02-22) entire document	1-10
A	CN 109596948 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID SHANDONG ELECTRIC POWER COMPANY et al.) 09 April 2019 (2019-04-09) entire document	1-10
A	CN 107730148 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF HAINAN POWER GRID CO., LTD.) 23 February 2018 (2018-02-23) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 March 2021

Date of mailing of the international search report

08 May 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/136201

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002243787 A (HITACHI ENG SERVICE CO., LTD.) 28 August 2002 (2002-08-28) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/136201

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	103954887	A	30 July 2014	None	
CN	202486278	U	10 October 2012	None	
CN	103018627	A	03 April 2013	CN 103018627	B 31 December 2014
CN	106451378	A	22 February 2017	None	
CN	109596948	A	09 April 2019	CN 109596948	B 15 December 2020
CN	107730148	A	23 February 2018	None	
JP	2002243787	A	28 August 2002	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/136201

A. 主题的分类

G01R 31/08(2006.01)i; G01R 31/12(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01R 31/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI: 山东大学, 输电, 配电, 线路, 永久, 瞬时, 故障, 暂时, 暂态, 预警, 录波, 绝缘, 劣化, 相关, 累积, 积累, 累计, 低频带, 能量, 特征, 阈值, failure, insulat+, characteristic, accumulat+, low, threshold, wave, power, energy

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 103954887 A (国家电网公司 等) 2014年 7月 30日 (2014 - 07 - 30) 说明书第[0002]-[0007], [0029]-[0047]段	1-10
A	CN 202486278 U (云南电网公司曲靖供电局) 2012年 10月 10日 (2012 - 10 - 10) 全文	1-10
A	CN 103018627 A (福建省电力有限公司 等) 2013年 4月 3日 (2013 - 04 - 03) 全文	1-10
A	CN 106451378 A (中国人民解放军后勤工程学院) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文	1-10
A	CN 109596948 A (国网山东省电力公司电力科学研究院 等) 2019年 4月 9日 (2019 - 04 - 09) 全文	1-10
A	CN 107730148 A (海南电网有限责任公司电力科学研究院) 2018年 2月 23日 (2018 - 02 - 23) 全文	1-10

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 3月 24日

国际检索报告邮寄日期

2021年 5月 8日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

林婷

电话号码 86- (10) -53962439

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	JP 2002243787 A (HITACHI ENG SERVICE CO., LTD.) 2002年 8月 28日 (2002 - 08 - 28) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/136201

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	103954887	A	2014年 7月 30日	无	
CN	202486278	U	2012年 10月 10日	无	
CN	103018627	A	2013年 4月 3日	CN 103018627	B 2014年 12月 31日
CN	106451378	A	2017年 2月 22日	无	
CN	109596948	A	2019年 4月 9日	CN 109596948	B 2020年 12月 15日
CN	107730148	A	2018年 2月 23日	无	
JP	2002243787	A	2002年 8月 28日	无	