



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109997287 B

(45) 授权公告日 2021. 10. 29

(21) 申请号 201780071944.X

(22) 申请日 2017.06.15

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109997287 A

(43) 申请公布日 2019.07.09

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.05.21

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/CN2017/088417 2017.06.15

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/227467 EN 2018.12.20

(73) 专利权人 ABB电网瑞士股份公司
地址 瑞士巴登

(72) 发明人 刘凯

(74) 专利代理机构 北京市汉坤律师事务所
11602

代理人 王菲 张涛

(51) Int.Cl.
H02H 7/26 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 103762564 A, 2014.04.30
CN 103474980 A, 2013.12.25
CN 101839958 A, 2010.09.22

审查员 曹小丽

权利要求书2页 说明书10页 附图3页

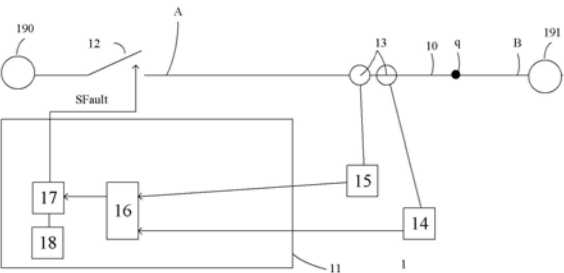
(54) 发明名称

用于故障方向检测的方法和控制系统

(57) 摘要

提供了一种用于检测AC电力系统的传输线路(10)的故障方向的方法和使用该方法的控制系统。该方法包括:针对一系列时间点,对传输线路(10)的一个端部处的三相的电流值和电压值进行采样;针对一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电压值样本来计算三相的瞬时对称电压分量;针对一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电流值样本来计算三相的瞬时对称电流分量;针对一系列时间点中的至少两个时间点,各自基于计算出的瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量来计算能量方向要素;在考虑到计算出的能量方向要素的情况下标识故障方向;以及生成指示所标识的故障方向的故障方向信号。仿真结果表明,基于瞬时对称电压分量和瞬时对称电流分量而计算的能量方向要素的曲线图针对前向或反向故障呈现

出不同特性。考虑到这种差异,通过在每个采样时间点计算能量方向要素,可以准确地标识故障方向信息。



1. 一种用于检测AC电力系统的传输线路的故障方向的方法,包括:

针对一系列时间点,对所述传输线路的一个端部处的三相的电流值和电压值进行采样;

针对所述一系列时间点中的每个时间点,基于所述一系列时间点中的相应时间点的电压值样本来计算所述传输线路上的补偿点处的所述三相的瞬时对称电压分量;

针对所述一系列时间点中的每个时间点,基于所述一系列时间点中的相应时间点的电流值样本来计算所述端部处的所述三相的瞬时对称电流分量;

针对所述一系列时间点中的至少两个时间点,各自基于计算出的所述补偿点处的所述瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的所述端部处的所述瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量,来计算能量方向要素;

在考虑到计算出的所述能量方向要素的情况下标识所述故障方向;以及
生成指示所标识的所述故障方向的故障方向信号。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括:

针对所述一系列时间点,基于用于所述传输线路的时域集总参数微分方程、根据所述电流值样本和所述电压值样本来计算所述传输线路上的所述补偿点处的所述三相的瞬时电压值;以及

所述瞬时对称电压分量的所述计算基于针对所述一系列时间点中的相应时间点的计算出的所述瞬时电压值。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

在计算出的所述能量方向要素小于第一预定值的情况下,所述故障方向被标识为前向;以及

在计算出的能量方向要素大于第二预定值的情况下,所述故障方向被标识为反向。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中:

所述第一预定值和所述第二预定值中的任何一个预定值等于零。

5. 根据权利要求3所述的方法,其中:

所述第一预定值被设置为负;以及

所述第二预定值被设置为正。

6. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

所述对称电压分量是指所述AC电力系统的所述三相的零序电压分量;以及

所述对称电流分量是指所述AC电力系统的所述三相的零序电流分量。

7. 根据权利要求1或2所述的方法,其中:

所述对称电压分量是指所述AC电力系统的所述三相的负序电压分量;以及

所述对称电流分量是指所述AC电力系统的所述三相的负序电流分量。

8. 一种用于检测AC电力系统的传输线路的故障方向的控制系统,包括:

采样电路,被配置为针对一系列时间点对所述传输线路的一个端部处的三相的电流值和电压值进行采样;

控制器,被配置为:

针对所述一系列时间点中的每个时间点,基于所述一系列时间点中的相应时间点的电压值样本来计算所述传输线路上的补偿点处的所述三相的瞬时对称电压分量;

针对所述一系列时间点中的每个时间点,基于所述一系列时间点中的相应时间点的电流值样本来计算所述端部处的所述三相的瞬时对称电流分量;

存储电路,被配置为记录计算出的所述瞬时对称电压分量和计算出的所述瞬时对称电流分量;

其中:

所述控制器还被配置为:

针对所述一系列时间点中的至少两个时间点,各自基于计算出的所述补偿点处的所述瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的所述端部处的所述瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量,来计算能量方向要素;

在考虑到计算出的所述能量方向要素的情况下,标识所述故障方向;以及
生成指示所标识的所述故障方向的故障方向信号。

9. 根据权利要求8所述的控制系统,其中:

所述控制器还被配置为:

针对所述一系列时间点,基于所述传输线路的时域集总参数微分方程、根据所述电流值样本和所述电压值样本来计算所述传输线路上的所述补偿点处的所述三相的瞬时电压值;以及

所述瞬时对称电压分量的计算基于针对所述一系列时间点中的相应时间点的计算出的所述瞬时电压值。

10. 根据权利要求8或9所述的控制系统,其中:

在计算出的所述能量方向要素小于第一预定值的情况下,所述故障方向被标识为前向;以及

在计算出的所述能量方向要素大于第二预定值的情况下,所述故障方向被标识为反向。

11. 根据权利要求10所述的控制系统,其中:

所述第一预定值和所述第二预定值中的任何一个预定值等于零。

12. 根据权利要求10所述的控制系统,其中:

所述第一预定值被设置为负;以及

所述第二预定值被设置为正。

13. 根据权利要求8或9所述的控制系统,其中:

所述对称电压分量是指所述AC电力系统的所述三相的零序电压分量;以及

所述对称电流分量是指所述AC电力系统的所述三相的零序电流分量。

14. 根据权利要求8或9所述的控制系统,其中:

所述对称电压分量是指所述AC电力系统的所述三相的负序电压分量;以及

所述对称电流分量是指所述AC电力系统的所述三相的负序电流分量。

用于故障方向检测的方法和控制系统

技术领域

[0001] 本发明涉及检测AC电力系统中的故障,并且更具体地涉及AC电力系统中的故障方向检测。

背景技术

[0002] AC电力系统已经广泛用于供应、传输和使用电力。它可能在诸如短路、发电损耗、负载损耗、开路或其任何组合的干扰期间遇到稳定性问题。这些问题的解决方案之一是采用在故障方向信号的帮助下触发的以高速进行操作的保护继电器。

[0003] 传统上,可以基于AC电力系统的传输线路的端部处的故障分量的本地测量结果来检测故障方向。这种故障方向检测机构的一个示例被公开在“Principle and Property Research of the Energy Directional Protection”,He Benteng、Jin Huafeng和Li Ju, Proceedings of the CSEE, Vol.17No.3, 1997年5月。

[0004] 然而,在电源近似于AC电压源的强系统的条件下,即使AC电力系统发生故障,在耦合到电源的传输线路的端部处也保持AC电压。结果表明,根据传输线路的端部处的电压测量结果而确定的电压故障分量对于故障方向标识可能是不显著的。

[0005] 因此,传统的解决方案至少对于强AC电力系统中的故障方向的检测具有灵敏度很差的缺点。这最终可能导致故障AC电力系统中的断路器无法跳闸。

发明内容

[0006] 根据本发明的一个方面,提供了一种用于检测AC电力系统的传输线路的故障方向的方法,该方法包括:针对一系列时间点,对传输线路的一个端部处的三相的电流值和电压值进行采样;针对一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电压值样本来计算三相的瞬时对称电压分量;针对一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电流值样本来计算三相的瞬时对称电流分量;针对一系列时间点中的至少两个时间点,基于计算出的瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量来计算能量方向要素;在考虑到计算出的能量方向要素的情况下标识故障方向;以及生成指示所标识的故障方向的故障方向信号。

[0007] 根据本发明的另一方面,提供一种用于检测AC电力系统的传输线路的故障方向的控制系统,该控制系统包括:采样电路,被配置为针对一系列时间点对传输线路的一个端部处的三相的电流值和电压值进行采样;控制器,被配置为:针对该一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电压值样本来计算三相的瞬时对称电压分量;针对一系列时间点中的每个时间点,基于一系列时间点中的相应时间点的电流值样本来计算三相的瞬时对称电流分量。该控制系统还包括:存储电路,被配置为记录计算出的瞬时对称电压分量和计算出的瞬时对称电流分量;其中:控制器还被配置为:针对一系列时间点中的至少两个时间点,各自基于计算出的瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计

算出的瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量来计算能量方向要素；在考虑到计算出的能量方向要素的情况下标识故障方向；以及生成指示所标识的故障方向的故障方向信号。

[0008] 仿真结果表明，基于瞬时对称电压分量和瞬时对称电流分量而计算的能量方向要素的曲线图针对前向或反向故障呈现出不同特性。考虑到这种差异，通过在每个采样时间点计算能量方向要素，可以准确地标识故障方向信息。

附图说明

[0009] 将参考附图中示出的优选示例性实施例在下文中更详细地解释本发明的主题，在附图中：

[0010] 图1示出了根据本发明的实施例的AC电力系统；

[0011] 图2示出了传输线路系统的示例RLC模型；

[0012] 图3示意性地示出了根据本发明的实施例的用于A相的电容性电流路径的图；

[0013] 图4示意性地示出了根据本发明的实施例的传输线路的单线路图；

[0014] 图5示出了三相传输线路图；以及

[0015] 图6示出了根据本发明的实施例的在前向故障状况和反向故障状况下的能量方向要素的模拟结果。

[0016] 附图中使用的附图标记及其含义在附图标记列表中以摘要形式列出。原则上，相同的部件在附图中具有相同的附图标记。

具体实施方式

[0017] 尽管本发明易于进行各种修改和替换形式，但是其具体实施例在附图中以示例的方式示出并且将在本文中详细描述。然而，应当理解，附图及其详细描述并非旨在将本发明限于所公开的特定形式，相反，其目的是涵盖落入由所附权利要求限定的本发明的精神和范围内的所有修改、等同物和替代物。注意，标题仅用于组织目的，并不意味着用于限制或解释说明书或权利要求。此外，注意，“可以”一词在本申请中以允许的意义使用（即，具有潜力，能够），而不是与强制性意义（即，必须）使用。术语“包括”及其派生词表示“包括但不限于”。术语“连接”表示“直接或间接连接”，并且术语“耦合”表示“直接或间接连接”。

[0018] 图1示出了根据本发明的实施例的AC电力系统。如图1所示，AC电力系统1包括在其两个端部A和B处限定的传输线路10。关于传输线路10的第一端部A和第二端部B中的一个，取第一端部A作为示例，反向故障被定义为针对传输线路10的相对侧的AC电力系统1的一部分发生的故障；并且，前向故障被定义为与传输线路10在同一侧的AC电力系统1的一部分发生的故障。在故障的情况下，保护继电器11可以断开AC电力系统的受影响部分，例如通过电力断路器12，其中前向故障被标识。

[0019] 提供第一AC电源190以连接到电力断路器12，电力断路器12还与传输线路10的第一端部A连接。

[0020] 为此目的，在第一端部A和第二端部B中的一个端部处在测量点13处（例如在第一端部A一侧）提供保护继电器11。在测量点13处出现的电信号（诸如三相的电流和电压信号）由电流互感器14和电压互感器15进行变换，并且被馈送到保护继电器11并且由其采样电路

16进行采样。

[0021] 保护继电器11通过其采样电路16在一系列时间点的A/D转换来对电流和电压信号进行采样,并且通过其控制器17对由此生成的电流和电压采样值进行故障方向标识以便能够检测故障方向,而无论是前向还是反向。在发生前向故障时,可能是相与地之间的单相短路故障、任何两相之间的相间短路故障、两相中的任一相与地之间的两相到地短路故障、以及三相之间的三相短路故障。

[0022] 如果保护继电器11例如通过其控制器17标识故障方向,则由控制器17生成指示所标识的故障方向的前向故障信号 S_{fault} ,该信号用于启动到电力断路器12的跳闸信号,以便允许所述电力断路器断开其开关触点并且将受短路影响的部分与能量供应网络的其余部分断开。

[0023] 下文中说明的解决方案用于基于来自采样电路16的电流和电压采样值使用传输线路10上的补偿点q(如图1所示)处的电压故障分量和电流故障分量进行故障方向标识,它们是由传输线路的时域集总参数微分方程原理来建立的,因此在下文中首先对这一点进行简要说明。补偿点可以是传输线路的中点或其他预设点。时域集总参数模型可以是例如RLC模型或RL模型。在下文中,RLC模型被用于说明本发明的示例。此外,本领域技术人员应当理解,作为替代方案,这些解决方案可以直接使用由采样电路16提供的电压值样本和电流值样本。

[0024] RLC模型是集总参数模型之一,并且是用于本发明中的电气线路的示例等效模型。RLC模型包括电阻器、电感器和电容器。换言之,整个传输线路可以由包含电阻器、电感器和电容器的等效电路表示。出于说明性目的,参考图2来描述用于传输线路系统的示例RLC模型。

[0025] 如图2所示,RLC模型是标准PI型线路模型。起点处的电压用 V_s 表示,并且终点处的电压用 V_r 表示;测量点处的电压和电流分别用 u 和 i 表示,设定点的电压用 u_q 表示。起点与终点之间的传输线路可以等效于串联连接的电阻器和电感器以及分别连接到传输线路的起点和终点的两个电容器 C_1 和 C_2 。

[0026] 保护区的阻抗可以在基频域中用 Z_{set} 表示

$$[0027] \quad Z_{\text{set}} = R + jX \quad (1)$$

[0028] 其中 Z_{set} 表示保护区的阻抗, R 表示传输线路的等效电阻器的电阻,并且 X 表示传输线路的等效电感器的电感。应当理解,尽管图2将RLC模型示出为PI型RLC模型,但是本发明不限于此。RLC模型还可以是任何其他形式的RLC模型、T型RLC模型、Tau型RLC模型或其一些修改版本。此外,传输线路系统还可以使用进一步简化的RL模型。

[0029] 在本发明的一些实施例中,其可以擦除相电流中的电容性电流。也就是说,在获取相电流之后,可以从所获取的相电流中去除到地的电容性电流和相之间的电容性电流中的至少一个。

[0030] 出于说明目的,图3示意性地示出了根据本发明的实施例的用于A相的电容性电流路径的图。如图3所示,对于A相,A相的线路到地存在电容 C_{PG} ,A相的线路与B相的线路之间存在第一电容 C_{PP} ,并且A相的线路与C相的线路之间存在第二电容 C_{PP} 。与电容 C_{PG} 、第一 C_{PP} 和第二 C_{PP} 相关的电容性电流分别由 i_{ag} 、 i_{ab} 、 i_{ac} 表示。电流 i_{ag} 、 i_{ab} 、 i_{ac} 可以通过以下方程获取:

$$[0031] \quad i_{ag} = C_{PG} \times \frac{du_a}{dt} \quad (2)$$

$$[0032] \quad i_{ab} = C_{PP} \times \frac{du_{ab}}{dt} \quad (3)$$

$$[0033] \quad i_{ac} = C_{PP} \times \frac{du_{ac}}{dt} \quad (4)$$

[0034] 其中 u_a 表示A相的相电压; u_{ab} 表示相电压 u_a 与相电压 u_b 之间的电压差,即, $u_{ab}=u_a-u_b$; u_{ac} 表示相电压 u_a 与相电压 u_c 之间的电压差,即, $u_{ac}=u_a-u_c$ 。因此,通过去除电容性电流影响来表示A相的电流的电流 i_a' 可以基于以下方程来确定。

$$[0035] \quad i_a' = i_a - (C_{PG} \times \frac{du_a}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{ab}}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{ac}}{dt}) \quad (5)$$

[0036] 类似地,电流 i_b' 、 i_c' 可以通过分别去除B相和C相的电容性电流影响来表示相电流,并且它们可以如下确定:

$$[0037] \quad i_b' = i_b - (C_{PG} \times \frac{du_b}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{ba}}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{bc}}{dt}) \quad (6)$$

$$[0038] \quad i_c' = i_c - (C_{PG} \times \frac{du_c}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{ca}}{dt} + C_{PP} \times \frac{du_{cb}}{dt}) \quad (7)$$

[0039] 其中 u_b 表示B相的电压; u_c 表示C相的电压; u_{ba} 表示相电压 u_b 与相电压 u_a 之间的电压差,即, $u_{ba}=u_b-u_a$; u_{ca} 表示相电压 u_c 与相电压 u_a 之间的电压差,即, $u_{ca}=u_c-u_a$; u_{bc} 表示相电压 u_b 与相电压 u_c 之间的电压差,即, $u_{bc}=u_b-u_c$; u_{cb} 表示相电压 u_c 与相电压 u_b 之间的电压差,即, $u_{cb}=u_c-u_b$ 。

[0040] 因此,在本发明的实施例中,可以使用已经减去电容性电流的电流 i_a' 、 i_b' 、 i_c' ,而不是原始采样电流 i_a 、 i_b 、 i_c 。如果从相电流中擦除电容性电流,则可以进一步减小传输模型。出于说明目的,图4示意性地示出了根据本发明的实施例的传输线路的单线路图。图4类似于图2所示的模型,但是电阻器R和电感器L被详细示出,并且因为电容性电流从相电流中去除,在起点和终点处连接的电容器被移除。

[0041] 基于如图4所示的单线路图,可以基于微分方程来确定设定点处的电压 u_q ,诸如:

$$[0042] \quad u_q(t) = u(t) - R * i(t) - L * \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

[0043] 其中 $u(t)$ 表示测量点处的电压; $i(t)$ 表示测量点处的电流,R表示集总参数模型中的电阻器的电阻值,并且L表示集总参数模型中的电感器的电感值,并且 $di(t)/dt$ 表示电流 $i(t)$ 的微分值。如果考虑离散时间系统域,例如在时刻k的采样点,则下面的方程(8')可以用于表示方程(8)中的计算。

$$[0044] \quad u_{q_k} = u_k - (R \cdot i_k + L \cdot \frac{di_k}{dt}) \quad (8')$$

[0045] 其中 u_{q_k} 表示设定点处的电压; u_k 表示测量点处的电压; i_k 表示测量点处的电流,并且 L 表示集总参数模型(例如,RLC模型)中的电感器的电感; R 表示集总参数模型(例如,RLC模型)中的电阻器的电阻; di_k/dt 表示电流 i_k 的微分值($di_k = i_k - i_{k-1}$; dt = 给定采样率下的采样间隔; i_{k-1} 表示在离散时间域中在时刻 k 之前的时刻 $k-1$ 的测量电流)。

[0046] 图5示出了三相传输线路图。如图5所示, L_s 是相电感, L_m 是相之间的互感,并且 k 是采样时间点。利用三线路图,可以通过进一步考虑相之间的互感而基于方程(8)来确定电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 。例如,电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 可以基于微分方程来确定,诸如:

$$[0047] \quad \begin{cases} u_{q_a_k} = u_{a_k} - \left[R \cdot i_{a_k} + L_s \cdot \frac{di_{a_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{b_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{c_k}}{dt} \right] \\ u_{q_b_k} = u_{b_k} - \left[R \cdot i_{b_k} + L_s \cdot \frac{di_{b_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{a_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{c_k}}{dt} \right] \\ u_{q_c_k} = u_{c_k} - \left[R \cdot i_{c_k} + L_s \cdot \frac{di_{c_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{a_k}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{b_k}}{dt} \right] \end{cases} \quad (9)$$

[0048] 其中 u_{a_k} 、 u_{b_k} 和 u_{c_k} 分别表示测量点处的A相、B相和C相的线电压; i_{a_k} 、 i_{b_k} 和 i_{c_k} 分别表示测量点处的A相、B相和C相的电流; L_s 表示A相、B相和C相的相电感;并且 L_m 表示A相、B相和C相的相之间的电感。

[0049] 由于相间电压是一个相与另一相之间的电压差,因此相间电压 $u_{q_ab_k}$ 、 $u_{q_bc_k}$ 和 $u_{q_ca_k}$ 可以进一步根据基于方程(9)而确定的相电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 来确定。例如,电压 $u_{q_ab_k}$ (即,设定点处的A相与B相之间的电压)可以通过下式来确定:

$$[0050] \quad \begin{aligned} u_{q_ab_k} &= u_{q_a_k} - u_{q_b_k} = u_{ab_k} - [R \cdot i_{ab_k} + (L_s - L_m) \cdot \frac{di_{ab_k}}{dt}] \\ &= u_{ab_k} - [R \cdot i_{ab_k} + L \cdot \frac{di_{ab_k}}{dt}] \end{aligned} \quad (10)$$

[0051] 其中 u_{ab_k} 、 i_{ab_k} 分别表示测量点处的A相与B相之间的电压和电流; R 和 L 表示相线路的正序电阻和电感, L 等于 L_s 和 L_m 的差值,即, $L = L_s - L_m$ 。

[0052] 在方程(10)中, R 和 L 是正序电阻和电感, $L = L_s - L_m$ 。类似地,也可以计算电压 $u_{q_bc_k}$ 和 $u_{q_ca_k}$ 。根据微分方程(10),相间电压 $u_{q_ab_k}$ 、 $u_{q_bc_k}$ 和 $u_{q_ca_k}$ 可以通过微分方程(11)来确定。

[0053] 方程(11)总结了这三个相间环路电压的计算,方程(11)中的 R 和 L 是正序电阻和电

感:

$$[0054] \quad \begin{cases} u_{q_ab_k} = u_{ab_k} - (R \cdot i_{ab_k} + L \cdot \frac{d i_{ab_k}}{dt}) \\ u_{q_bc_k} = u_{bc_k} - (R \cdot i_{bc_k} + L \cdot \frac{d i_{bc_k}}{dt}) \\ u_{q_ca_k} = u_{ca_k} - (R \cdot i_{ca_k} + L \cdot \frac{d i_{ca_k}}{dt}) \end{cases} \quad (11)$$

[0055] 其中 u_{ab_k} 、 i_{ab_k} 分别表示测量点处的A相与B相之间的电压和电流; u_{bc_k} 、 i_{bc_k} 分别表示测量点处的B相与C相之间的电压和电流; u_{ca_k} 、 i_{ca_k} 分别表示测量点处的C相与A相之间的电压和电流; R 和 L 表示相线路的正序电阻和电感, L 等于 L_s 和 L_m 的差值,即, $L=L_s-L_m$ 。

[0056] 因此,可以确定相电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 以及相间电压 $u_{q_ab_k}$ 、 $u_{q_bc_k}$ 和 $u_{q_ca_k}$ 。应当理解,虽然相电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 以及相间电压 $u_{q_ab_k}$ 、 $u_{q_bc_k}$ 和 $u_{q_ca_k}$ 被描述为分别基于方程(9)和(11)来确定,但是本发明不是限于这些实施例。实际上,可以使用任何合适形式的微分方程。

[0057] 对于相地环路,补偿点 q 处的电压 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 通过方程(9)来计算。此外,补偿点 q 处的这三个电压可以通过方程(12)来计算,方程(12)中的 R 和 L 是正序电阻和电感,为简单和清楚起见,这里不描述推导过程。

$$[0058] \quad \begin{cases} u_{q_a_k} = u_{a_k} - \left[R \cdot (i_{a_k} + k_R \cdot 3i_{0_k}) + L \cdot \frac{d(i_{a_k} + k_L \cdot 3i_{0_k})}{dt} \right] \\ u_{q_b_k} = u_{b_k} - \left[R \cdot (i_{b_k} + k_R \cdot 3i_{0_k}) + L \cdot \frac{d(i_{b_k} + k_L \cdot 3i_{0_k})}{dt} \right] \\ u_{q_c_k} = u_{c_k} - \left[R \cdot (i_{c_k} + k_R \cdot 3i_{0_k}) + L \cdot \frac{d(i_{c_k} + k_L \cdot 3i_{0_k})}{dt} \right] \\ k_R = \frac{R_0 - R_1}{3R_1} \quad k_L = \frac{L_0 - L_1}{3L_1} \end{cases} \quad (12)$$

[0059] 其中 R_0 表示三相传输线路的零序电阻; R_1 表示三相传输线路的正序电阻; L_0 表示三相传输线的零序电感; L_1 表示三相传输线路的正序电感; i_{0_k} 表示时刻 k 的零序电流; k_R 表示基于 R_0 、 R_1 而确定的因子,如方程(12)所示; k_L 表示基于 L_0 、 L_1 而确定的因子,如方程(12)所示。

[0060] 基于传输线路的时域集总参数微分方程原理,可以针对一系列时间点根据传输线路10的一个端部处的采样电流值和电压值来计算补偿点 q 处的瞬时电压值,包括相地环路电信号的三个瞬时电压值 $u_{q_a_k}$ 、 $u_{q_b_k}$ 和 $u_{q_c_k}$ 以及相间环路电信号的三个瞬时电压值

$u_{q_{ab_k}}$ 、 $u_{q_{bc_k}}$ 和 $u_{q_{ca_k}}$ 。即,可以基于在测量点13处测量的采样电信号的值与在补偿点q处的计算出的瞬时电压值之间的关系来建立数学链路。

[0061] 针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个的电压故障分量可以根据如下的方程(13-1)至(13-4)中的任何一个来计算。六个电气环路包括A相到地、B相到地、C相到地、A相到B相、B相到C相、C相到A相。

$$[0062] \quad \Delta u_{q_k} = u_{q_k} + u_{q_k-N/2} \quad (13-1)$$

$$[0063] \quad \Delta u_{q_k} = [u_{q_k} + u_{q_k-N/2}] - [u_{q_k-N} + u_{q_k-3N/2}] \quad (13-2)$$

$$[0064] \quad \Delta u_{q_k} = u_{q_k} - u_{q_k-N} \quad (13-3)$$

$$[0065] \quad \Delta u_{q_k} = [u_{q_k} - u_{q_k-N}] - [u_{q_k-N} - u_{q_k-2N}] \quad (13-4)$$

[0066] 其中 Δu_{q_k} 指示针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个的电压故障分量, u_{q_k} 指示针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个的电压值, N指示采样时刻的数目, 优选地等于AC电力系统的基频周期期间的采样时刻的数目。在特定情况下, 诸如对于A相到地的电气环路, 下标“q_a”可以用于代替方程(13-1)至(13-4)中的“q”, 并且符号“ Δu_{q_k} ”变为“ $\Delta u_{q_{a_k}}$ ”。对于B相到地、C相到地、A相到B相、B相到C相、C相到A相, “ $\Delta u_{q_{b_k}}$ ”、“ $\Delta u_{q_{c_k}}$ ”、“ $\Delta u_{q_{ab_k}}$ ”、“ $\Delta u_{q_{bc_k}}$ ”、“ $\Delta u_{q_{ca_k}}$ ”将用于特定场景。

[0067] 类似地, 针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个电气环路的电流故障分量可以根据如下的方程(14-1)至(14-4)中的任何一个方程来计算。六个电气环路包括A相到地、B相到地、C相到地、A相到B相、B相到C相、C相到A相。

$$[0068] \quad \Delta i_{q_k} = i_{q_k} + i_{q_k-N/2} \quad (14-1)$$

$$[0069] \quad \Delta i_{q_k} = [i_{q_k} + i_{q_k-N/2}] - [i_{q_k-N} + i_{q_k-3N/2}] \quad (14-2)$$

$$[0070] \quad \Delta i_{q_k} = i_{q_k} - i_{q_k-N} \quad (14-3)$$

$$[0071] \quad \Delta i_{q_k} = [i_{q_k} - i_{q_k-N}] - [i_{q_k-N} - i_{q_k-2N}] \quad (14-4)$$

[0072] 其中 Δi_{q_k} 指示针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个电气环路的电流故障分量, i_{q_k} 指示针对采样时刻k的补偿点q处的六个电气环路中的任何一个电气环路的电流值, N指示采样时刻的数目, 优选地等于AC电力系统的基频周期期间的采样时刻的数目。在特定情况下, 诸如对于A相到地的电气环路, 下标“q_a”可以用于代替方程(14-1)至(14-4)中的“q”, 并且符号“ Δi_{q_k} ”变为“ $\Delta i_{q_{a_k}}$ ”。对于B相到地、C相到地、A相到B相、B相到C相、C相到A相, “ $\Delta i_{q_{b_k}}$ ”、“ $\Delta i_{q_{c_k}}$ ”、“ $\Delta i_{q_{ab_k}}$ ”、“ $\Delta i_{q_{bc_k}}$ ”、“ $\Delta i_{q_{ca_k}}$ ”将用于特定场景。

[0073] 实施例I

[0074] 下面是描述通过使用针对一系列时间点的在传输线路上的补偿点q处的三相的计算出的瞬时电压值 $u_{q_{a_k}}$ 、 $u_{q_{b_k}}$ 、 $u_{q_{c_k}}$ 和针对该一系列时间点的传输线路上的三相的瞬时电流值 i_{a_k} 、 i_{b_k} 、 i_{c_k} 来检测传输线路的故障方向的实施例。

[0075] 采样电路16适于针对一系列时间点对传输线路10的一个端部A处的三相的电流值 i_{a_k} 、 i_{b_k} 、 i_{c_k} 和电压值 u_{a_k} 、 u_{b_k} 、 u_{c_k} 进行采样。

[0076] 在电气工程中, 非对称的一组N相可以借助于复杂的线性变换来表示为N组对称相量的线性组合(参见Hadjsaïd, Nouredine; Sabonnadière, Jean-Claude (2013). Power Systems and Restructuring, John Wiley&Sons.p.244. ISBN 9781118599921)。在三相系统的最常见情况下, 所得到的“对称”分量被称为直接(或正)、反(或负)和零(或单极)。如上

面通过参考方程(1)至(15)所述,可以针对一系列时间点中的相应时间点基于电压值样本 u_{a_k} 、 u_{b_k} 、 u_{c_k} 来计算补偿点q处的三相的计算出的瞬时电压值 $u_{q_{a_k}}$ 、 $u_{q_{b_k}}$ 、 $u_{q_{c_k}}$ 。因此,针对一系列时间点中的每个时间点,控制器17可以基于针对该一系列时间点中的相应时间点的电压值样本 u_{a_k} 、 u_{b_k} 、 u_{c_k} 来计算瞬时对称电压分量。在该实施例中,例如,零序电压分量 $u_{q_{0_k}}$ 用于对称电压分量,其可以根据 $u_{q_{0_k}} = (u_{q_{a_k}} + u_{q_{b_k}} + u_{q_{c_k}}) / 3$ 来计算。此外,针对一系列时间点中的每个时间点,基于针对该一系列时间点中的相应时间点的电流值样本 i_{a_k} 、 i_{b_k} 、 i_{c_k} 来计算三相的瞬时对称电流分量。在该实施例中,例如,零序电流分量 i_{0_k} 用于对称电流分量,其可以根据 $i_{0_k} = i_{a_k} + i_{b_k} + i_{c_k}$ 来计算。

[0077] 存储电路18可以记录计算出的瞬时对称电压分量 $u_{q_{0_k}}$ 和计算出的瞬时对称电流分量 i_{0_k} 。

[0078] 对于该一系列时间点中的至少两个时间点,控制器17可以分别基于计算出的瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量来计算能量方向要素。例如,能量方向要素可以由 $u_{q_{0_k}} \cdot i_{0_k}$ 关于该一系列时间点的时间间隔的积分来表示,其中k指示该一系列时间点中的时间点。针对一系列时间点 t_1 、 t_2 、...、 t_n ,瞬时对称电压分量可以由 $u_{q_{0_1}}$ 、 $u_{q_{0_2}}$ 、...、 $u_{q_{0_n}}$ 表示,并且瞬时对称电流分量可以由 i_{0_1} 、 i_{0_2} 、...、 i_{0_n} 表示。

[0079] 在该实施例中,能量方向要素可以由以下方程表示:

$$[0080] \quad S_0 = \int_{t_1}^{t_k} u_{q_{0_k}} \times i_{0_k} dt \quad (15)$$

[0081] 基于能量方向要素的结果,控制器17可以在考虑到计算出的能量方向要素的情况下标识故障方向。在该实施例中,例如,设置第一预定值 S_1 和第二预定值 S_2 。并且,第一预定值被设置为负;以及第二预定值被设置为正。

[0082] 如果计算出的能量方向要素小于第一预定值 S_1 ,则控制器17可以将故障方向标识为前向,并且如果计算出的能量方向要素大于第二预定值 S_2 ,则控制器17可以将故障方向标识为反向:

$$[0083] \quad \begin{cases} S_0 > S_2 & \text{反向} \\ S_0 < S_1 & \text{前向} \end{cases} \quad (16)$$

[0084] S_1 和 S_2 的绝对值用作防止错误判断的阈值。例如, S_1 的绝对值可以设置为电力传输线路的额定电压值和额定电流值的乘积的0.1倍,并且 S_2 可以设置为电力传输线路的额定电压值和额定电流值的乘积的0.05倍。

[0085] 另外,第一预定值和第二预定值中的任何一个可以被设置为零。

[0086] 实施例II

[0087] 与实施例I不同,在本发明的实施例II中,通过针对一系列时间点对传输线路10的一个端部A处的三相的电流值 i_{a_k} 、 i_{b_k} 、 i_{c_k} 和电压值 u_{a_k} 、 u_{b_k} 、 u_{c_k} 进行采样,来执行传输线路的故障方向的检测。这些样本可以由采样电路16提供。

[0088] 针对一系列时间点中的每个时间点,控制器17可以直接根据针对该一系列时间点中的相应时间点的电压值样本 u_{a_k} 、 u_{b_k} 、 u_{c_k} 来计算三相的瞬时对称电压分量 u_{0_k} 。在该实施

例中,例如,零序电压分量 u_{0_k} 用于对称电压分量,其可以根据 $u_{0_k} = (u_{a_k} + u_{b_k} + u_{c_k}) / 3$ 来计算。此外,针对一系列时间点中的每个时间点,基于针对该一系列时间点中的相应时间点的电流值样本 i_{a_k} 、 i_{b_k} 、 i_{c_k} 来计算三相的瞬时对称电流分量。在该实施例中,例如,零序电流分量 i_{0_k} 用于对称电流分量,其可以根据 $i_{0_k} = i_{a_k} + i_{b_k} + i_{c_k}$ 来计算。

[0089] 存储电路18可以记录计算出的瞬时对称电压分量 u_{0_k} 和计算出的瞬时对称电流分量 i_{0_k} 。

[0090] 对于该一系列时间点中的至少两个时间点,控制器17可以分别基于计算出的瞬时对称电压分量中的相应瞬时对称电压分量和计算出的瞬时对称电流分量中的相应瞬时对称电流分量来计算能量方向要素。例如,能量方向要素可以由 $u_{0_k} \cdot i_{0_k}$ 关于该一系列时间点的时间间隔的积分来表示,其中 k 指示该一系列时间点中的时间点。针对一系列时间点 t_1 、 t_2 、...、 t_n ,瞬时对称电压分量可以由 $u_{q_0_1}$ 、 $u_{q_0_2}$ 、...、 $u_{q_0_n}$ 表示,并且瞬时对称电流分量可以由 i_{0_1} 、 i_{0_2} 、...、 i_{0_n} 表示。

[0091] 在该实施例中,能量方向要素可以由以下方程表示:

$$[0092] \quad S_0 = \int_{t_1}^{t_k} u_{0_k} \times i_{0_k} dt \quad (17)$$

[0093] 基于能量方向要素的结果,控制器17可以在考虑到计算出的能量方向要素的情况下标识故障方向。在该实施例中,例如,设置第一预定值 S_1 和第二预定值 S_2 。并且,第一预定值被设置为负;以及第二预定值被设置为正。

[0094] 如果计算出的能量方向要素小于第一预定值 S_1 ,则控制器17可以将故障方向标识为前向,并且如果计算出的能量方向要素大于第二预定值 S_2 ,则控制器17可以将故障方向标识为反向:

$$[0095] \quad \begin{cases} S_0 > S_2 & \text{反向} \\ S_0 < S_1 & \text{前向} \end{cases} \quad (18)$$

[0096] S_1 和 S_2 的绝对值用作防止错误判断的阈值。例如, S_1 和 S_2 的绝对值用作防止错误判断的阈值。例如, S_1 的绝对值可以设置为电力传输线路的额定电压值和额定电流值的乘积的0.1倍,并且 S_2 可以设置为电力传输线路的额定电压值和额定电流值的乘积的0.05倍。

[0097] 另外,第一预定值和第二预定值中的任何一个可以被设置为零。

[0098] 图6示出了根据本发明的实施例的在前向故障状况和反向故障状况下的能量方向要素的模拟结果。图6的曲线图包括指示时间的x轴和示出在一系列时间点中的每个时间点处的能量方向要素的y轴。例如,在该实施例中,x轴上的一系列时间点以从0到500的采样时间点表示,其中存在500个采样时间点。例如,用于能量方向要素的积分的时间间隔可以被选择为覆盖从20个采样时间点电流采样时间点开始并且以电流采样电流结束的连续的20个采样时间点。

[0099] 在采样点300处发生前向故障的情况下,如图6所示,在此之前,能量方向要素保持基本上恒定在第一预定值 S_1 。然而,从发生前向故障的定时开始,能量方向要素的曲线图在第一预定值 S_1 之下振荡。

[0100] 在采样点300处发生反向故障的情况下,如图6所示,在此之前,能量方向要素基本

上保持恒定在第二预定值 S_2 。然而,从发生反向故障的定时开始,能量方向要素的曲线图在第二预定值 S_2 之上振荡。

[0101] 仿真结果表明,能量方向要素的曲线图针对前向或反向故障呈现出不同特性。

[0102] 考虑到在前向故障和反向故障的情况下能量方向要素相对于第一预定值和第二预定值的这种不同的位置,通过在每个采样时间点在线计算能量方向要素,可以准确地标识故障方向信息。

[0103] 尽管已经基于一些优选实施例描述了本发明,但是本领域技术人员应当理解,这些实施例绝不应当限制本发明的范围。在不脱离本发明的精神和构思的情况下,对实施例的任何变化和修改应当在本领域的具有普通知识和技术的人员的理解之内,并且因此落入由所附权利要求限定的本发明的范围内。

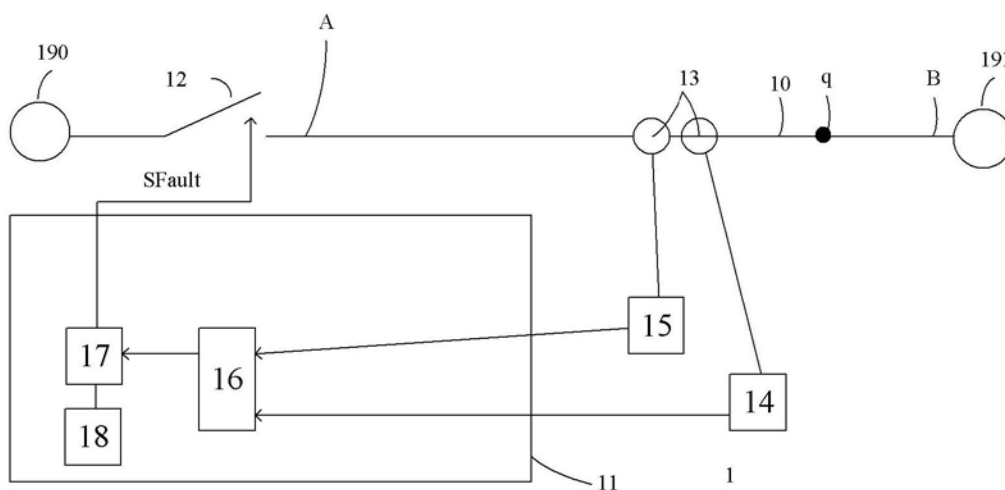


图1

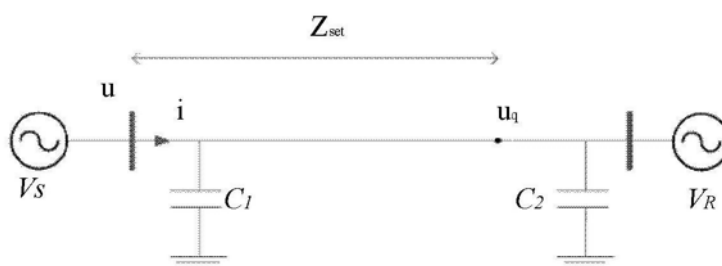


图2

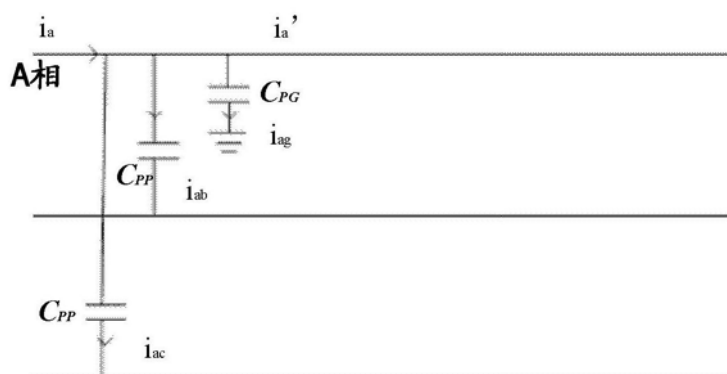


图3

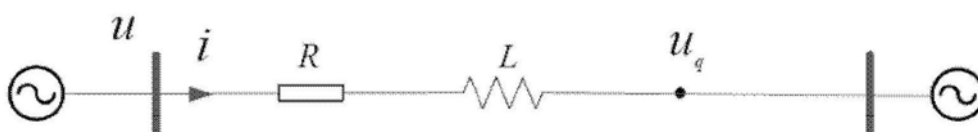


图4

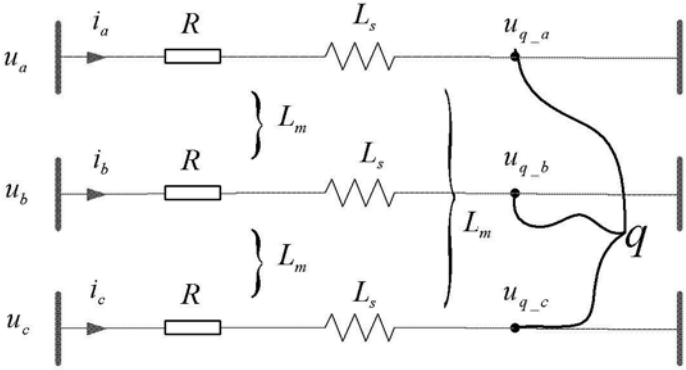


图5

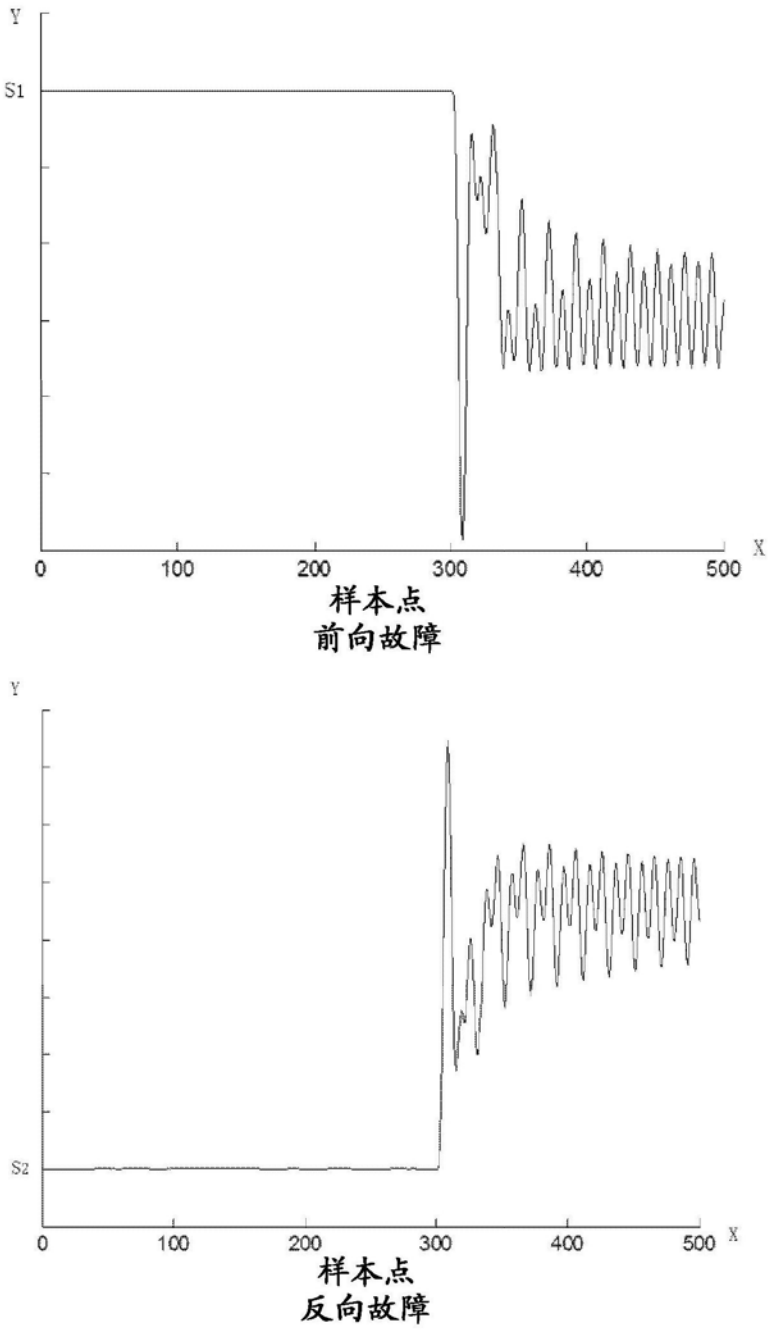


图6