



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105699848 A

(43) 申请公布日 2016. 06. 22

(21) 申请号 201610156943. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2016. 03. 18

G01R 31/08(2006. 01)

(71) 申请人 国网福建省电力有限公司

地址 350003 福建省福州市鼓楼区五四路  
257 号

申请人 国家电网公司

国网福建省电力有限公司电力科学  
研究院

(72) 发明人 张逸 黄道姗 吴丹岳 林焱

肖先勇 林芳 欧然 刘远帆

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限  
公司 35100

代理人 蔡学俊

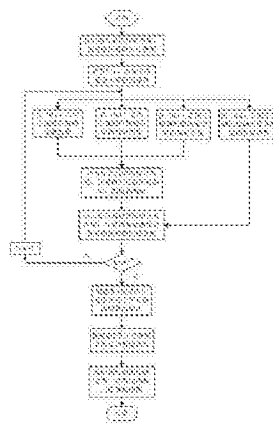
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平  
评估方法

(57) 摘要

本发明涉及一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,具体包括以下步骤:步骤 S1:确定蒙特卡罗模拟的故障条件;步骤 S2:根据步骤 S1 中确定的故障条件,基于电压暂降分压模型,计算暂降幅值和相位跳变角;步骤 S3:将步骤 S2 中的计算结果制成暂降幅值和相位跳变初步统计表格以及细分统计表格;步骤 S4:将计算结果形成考虑幅值和相位跳变的图形化表示。本发明考虑故障线路阻抗与系统阻抗之间的阻抗角、故障距离、故障类型、变压器对暂降类型的变换作用等不确定因素,基于蒙特卡罗模拟方法进行多次短路计算,计算关心节点的暂降幅值和相位跳变,引入考虑暂降幅值和相位跳变的统计表格及统计图,将结果表示在图表中便于直接观察和细致比较。



1.一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,其特征在于:具体包括以下步骤:

步骤S1:确定蒙特卡罗模拟的故障条件;

步骤S2:根据步骤S1中确定的故障条件,基于电压暂降分压模型,计算暂降幅值和相位跳变角;

步骤S3:将步骤S2中的计算结果制成暂降幅值和相位跳变初步统计表格以及细分统计表格;

步骤S4:将计算结果形成考虑幅值和相位跳变的图形化表示。

2.根据权利要求1所述的一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,其特征在于:所述步骤S1通过产生随机数,模拟在不同阻抗角、故障距离、故障类型以及变压器对暂降的变换作用的情况下,确定蒙特卡罗模拟的故障条件,具体包括以下步骤:

步骤S11:生成随机数确定阻抗角:阻抗角 $\alpha$ 为故障阻抗 $Z_F$ 与系统阻抗 $Z_S$ 之间的夹角,如式(1)所示,其中 $Z_S=R_S+jX_S$ , $Z_F=R_F+jX_F$ :

$$\alpha = \arg(Z_F) - \arg(Z_S) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_S}{R_S}\right) \quad (1)$$

由于阻抗角位于 $-60^\circ \sim 10^\circ$ 之间,故生成随机数 $x$ 模拟每次故障可能的阻抗角 $RIA_i$ ,如式(2)所示:

$$RIA_i = x \times 70 - 60 \quad (2)$$

其中, $x$ 服从 $(0,1)$ 均匀分布。

步骤S12:确定短路故障类型:电力系统中的短路故障分为三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路,且四种短路故障类型发生的概率依次为5%、65%、10%、20%,生成随机数 $y$ 模拟每次发生的短路类型 $RFT_i$ ,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \text{if } 0 \leq y < 0.05, RFT_i = 1 \\ \text{if } 0.05 \leq y < 0.7, RFT_i = 2 \\ \text{if } 0.7 \leq y < 0.8, RFT_i = 3 \\ \text{if } 0.8 \leq y \leq 1.0, RFT_i = 4 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $RFT_i=1,2,3,4$ 分别表示发生三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路。

步骤S13:生成随机数确定故障位置:故障位置用故障点到关心节点的距离标么值 $p$ 表示, $p$ 服从 $(0,1)$ 均匀分布;对于长度为 $L$ 的线路,故障点到PCC点的距离可表示为 $l=pL$ 。

步骤S14:生成随机数确定变压器对暂降类型的变换作用:对称和不对称短路故障造成的电压暂降分为7种类型,去除含有零序分量的种类型,设备侧感受到的暂降类型有5种;其中,三相短路故障导致A类暂降,单相接地短路故障导致C、D类暂降,两相短路故障导致C、D类暂降,以及两相接地短路故障导致F、G类暂降,生成随机数 $z$ 服从 $(0,1)$ 分布。

在暂降类型的模拟中,若所述步骤S12中确定短路类型为三相短路,不论 $z$ 为何值,变换结果都为A类暂降;若确定短路类型为单相接地短路或两相短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为C类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为D类暂降;若确定短路类型为两相接地短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为F类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为G类暂降。

3. 根据权利要求1所述的一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,其特征在在于:所述步骤S2具体包括以下步骤:

步骤S21:根据生成的故障条件进行短路计算:三相对称故障可直接应用分压公式求解;不对称故障需应用对称分量法,首先利用各边界条件求出正、负、零序电压,再叠加旋转因子作用合成为A、B、C三相电压相量,分别计算各相故障时电压幅值 $U_{AF}$ 、 $U_{BF}$ 、 $U_{CF}$ 和相角 $\Phi_A$ 、 $\Phi_B$ 、 $\Phi_C$ ;

步骤S22:计算暂降幅值和相位跳变角:以故障前A相电压为 $0^\circ$ 、B相电压为 $-120^\circ$ 、C相电压为 $120^\circ$ 、三相幅值均为1.0pu为基准,将计算所得A、B、C三相电压相量与故障前基准电压相量进行比较,求出暂降幅值和相位跳变角;其中暂降幅值为故障时电压幅值与故障前电压幅值之比,相位跳变角为故障时电压相角和故障前电压相角之差,如式(4)所示:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{AF}, \phi_A = \Phi_A \\ u_B &= U_{BF}, \phi_B = \Phi_B + 120^\circ \\ u_C &= U_{CF}, \phi_C = \Phi_C - 120^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

4. 根据权利要求1所述的一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,其特征在在于:所述步骤S3具体包括以下步骤:

步骤S31:建立初步统计表格:根据IEEE对电压暂降幅值的定义,将暂降幅值划分为小于0.1pu、0.1至0.2pu、0.3至0.4pu、0.5至0.6pu、0.6至0.7pu、0.7至0.8pu以及0.8至0.9pu这9个区间;根据实际可能出现的相位跳变范围,将相位跳变划分为大于 $-70^\circ$ 、 $-70^\circ$ 至 $-50^\circ$ 、 $-50^\circ$ 至 $-30^\circ$ 、 $-30^\circ$ 至 $-10^\circ$ 、 $-10^\circ$ 至 $10^\circ$ 、 $10^\circ$ 至 $30^\circ$ 、 $30^\circ$ 至 $50^\circ$ 、 $50^\circ$ 至 $70^\circ$ 以及大于 $70^\circ$ 这9个区间。

步骤S32:建立细分统计表格:将幅值划分为0.6至0.7pu、0.7至0.8pu以及0.8至0.9pu这3个区间,将相位跳变划分为 $-30^\circ$ 至 $-25^\circ$ 、 $-25^\circ$ 至 $-20^\circ$ 、 $-20^\circ$ 至 $-15^\circ$ 、 $-15^\circ$ 至 $-10^\circ$ 、 $-10^\circ$ 至 $-5^\circ$ 、 $-5^\circ$ 至 $0^\circ$ 、 $0^\circ$ 至 $5^\circ$ 以及 $5^\circ$ 至 $10^\circ$ 这8个区间。

5. 根据权利要求1所述的一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,其特征在在于:所述步骤S4建立考虑暂降幅值和相位跳变的三维频次图及二维等高线图,用以直观体现暂降幅值和相位跳变之间的关系,以及各区域暂降出现的频率规律。

## 一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统电能质量评估领域,具体涉及一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法。

### 背景技术

[0002] 电压暂降是电力系统不可避免的电能质量扰动事件,被认为是最严重的电能质量问题。随着越来越多对电压暂降敏感的用电设备,以及风电、太阳能发电等间歇性电源接入电网,电压暂降所造成的经济损失和社会影响日益增长,引起了供电企业、电力用户以及学术界的广泛关注。对电力系统或关心节点进行电压暂降水平评估,有助于供电企业和电力用户预知潜在的暂降危害,采取必要的措施规避或缓解由电压暂降造成的风险。

[0003] 电压暂降评估从层次上可分为单一暂降事件评估、节点评估以及系统评估。其中,系统评估以节点评估为基础,节点评估又建立在对单一暂降事件评估的基础上,换言之,节点评估和系统评估是以单一暂降事件为基础的统计描述。因此,提取单一暂降事件的重要特征是关键。

[0004] 已被提出的单一暂降事件特征有暂降幅值、持续时间、相位跳变、波形点等。在以往的研究中,暂降幅值和持续时间是最受关注的两个特征量。为描述某个暂降事件的严重程度,提出了暂降能量指标、严重度指标;为描述敏感设备与暂降的兼容程度,制定了电压耐受曲线;在节点和系统层面,提出了电压暂降幅值-持续时间统计表格。然而,越来越多的研究表明,许多设备对相位跳变同样是十分敏感的,如可调速设备、交流接触器、整流器、风力发电机等。现有的暂降指标、统计表格和参考曲线,均只考虑了暂降的幅值和持续时间,对于需要考虑相位跳变的情况无法适用。

[0005] 造成暂降的主要原因包括电力系统短路故障、大电机启动、变压器励磁涌流等。其中,系统短路故障是最主要原因。发生短路故障时,相位跳变伴随幅值的降低出现,因此从电气联系上来说,相位跳变与幅值的关系,比持续时间和幅值的关系更为紧密。现有的暂降评估方法无法体现幅值和相位跳变的关系,无法揭示二者范围以及变化规律。

[0006] 与本发明有关的现有技术及其缺点如下,现有的暂降水平评估方法主要包括实测统计法、仿真模拟法以及状态估计法。

[0007] 实测统计法:实测统计法通过在现场安装监测装置,监测安装节点一个周期内的暂降情况。该方法的好处在于监测结果能可靠反映监测周期的情况。存在的缺点为:1)电力系统复杂庞大,在全网安装需耗费巨大的购置设备、搭建通信通道、后期维护等费用;2)一个不长的监测周期,无法消除该监测周期内情况的个异性,不能客观、稳定反映该处的暂降平均水平;3)对于还未安装监测装置的节点,实测统计将耗费较大的时间成本。

[0008] 仿真模拟法:仿真模拟法通过仿真模拟软件,参考实际电网的故障率及故障条件进行短路计算。主要方法包括临界距离法、故障点法、解析法。临界距离法适用于简单的辐射型网络,对复杂网络不适用;故障点法中故障点的设置对结果有较大影响;解析法物理意义明确,结果准确,但解析曲线交点的求解较为困难。其次,这三种方法均只仅能求出对应

幅值区间的暂降频次,无法反映相位跳变情况。

[0009] 状态估计法:状态估计法可以通过状态估计方程,基于监测节点的暂降频次,估计未监测节点的暂降频次。该方法同样无法排除特定监测周期的个异性,且结果仅有幅值和频次信息,无法反映相位跳变情况。

### 发明内容

[0010] 有鉴于此,本发明的目的是提供一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,考虑故障线路阻抗与系统阻抗之间的阻抗角、故障距离、故障类型、变压器对暂降类型的变换作用等不确定因素,基于蒙特卡罗模拟方法进行多次短路计算,然后计算关心节点的暂降幅值和相位跳变。引入考虑暂降幅值和相位跳变的统计表格及统计图,将蒙特卡罗模拟结果表示在图表中,便于直接观察和细致比较。

[0011] 本发明采用以下方案实现:一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,具体包括以下步骤:

[0012] 步骤S1:确定蒙特卡罗模拟的故障条件;

[0013] 步骤S2:根据步骤S1中确定的故障条件,基于电压暂降分压模型,计算暂降幅值和相位跳变角;

[0014] 步骤S3:将步骤S2中的计算结果制成暂降幅值和相位跳变初步统计表格以及细分统计表格;

[0015] 步骤S4:将计算结果形成考虑幅值和相位跳变的图形化表示。

[0016] 进一步地,所述步骤S1通过产生随机数,模拟在不同阻抗角、故障距离、故障类型、变压器对暂降的变换作用等情况,确定蒙特卡罗模拟的故障条件,具体包括以下步骤:

[0017] 步骤S11:生成随机数确定阻抗角:阻抗角 $\alpha$ 为故障阻抗 $Z_F$ 与系统阻抗 $Z_S$ 之间的夹角,如式(1)所示,其中 $Z_S = R_S + jX_S$ ,  $Z_F = R_F + jX_F$ ,

$$[0018] \quad \alpha = \arg(Z_F) - \arg(Z_S) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_S}{R_S}\right) \quad (1)$$

[0019] 由于阻抗角绝大多数位于 $-60^\circ \sim 10^\circ$ 之间,故生成随机数 $x$ 模拟每次故障可能的阻抗角 $RIA_i$ ,如式(2)所示:

$$[0020] \quad RIA_i = x \times 70 - 60 \quad (2)$$

[0021] 其中, $x$ 服从 $(0,1)$ 均匀分布。

[0022] 步骤S12:确定短路故障类型:电力系统中的短路故障分为三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路,且四种短路故障类型发生的概率依次为5%、65%、10%、20%,生成随机数 $y$ 模拟每次发生的短路类型 $RFT_i$ ,如式(3)所示:

$$[0023] \quad \begin{cases} \text{if } 0 \leq y < 0.05, RFT_i = 1 \\ \text{if } 0.05 \leq y < 0.7, RFT_i = 2 \\ \text{if } 0.7 \leq y < 0.8, RFT_i = 3 \\ \text{if } 0.8 \leq y \leq 1.0, RFT_i = 4 \end{cases} \quad (3)$$

[0024] 其中, $RFT_i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示发生三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路。

[0025] 步骤S13:生成随机数确定故障位置:故障位置用故障点到关心节点的距离标么值

p表示,p服从(0,1)均匀分布;对于长度为L的线路,故障点到PCC点的距离可表示为 $l=pL$ 。

[0026] 步骤S14:生成随机数确定变压器对暂降类型的变换作用:对称和不对称短路故障造成的电压暂降分为7种类型,去除含有零序分量的种类型,设备侧能感受到的暂降类型有5种。其中,三相短路故障导致A类暂降,单相接地短路故障导致C、D类暂降,两相短路故障导致C、D类暂降,以及两相接地短路故障导致F、G类暂降,生成随机数z服从(0,1)分布。

[0027] 在暂降类型的模拟中,若所述步骤S12中确定短路类型为三相短路,不论z为何值,变换结果都为A类暂降;若确定短路类型为单相接地短路或两相短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为C类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为D类暂降;若确定短路类型为两相接地短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为F类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为G类暂降。

[0028] 进一步地,所述步骤S2具体包括以下步骤:

[0029] 步骤S21:根据生成的故障条件进行短路计算:三相对称故障可直接应用分压公式求解;不对称故障需应用对称分量法,首先利用各边界条件求出正、负、零序电压,再叠加旋转因子作用合成为A、B、C三相电压相量,分别计算各相故障时电压幅值 $U_{AF}$ 、 $U_{BF}$ 、 $U_{CF}$ 和相角 $\Phi_A$ 、 $\Phi_B$ 、 $\Phi_C$ ;

[0030] 步骤S22:计算暂降幅值和相位跳变角:以故障前A相电压为 $0^\circ$ 、B相电压为 $-120^\circ$ 、C相电压为 $120^\circ$ 、三相幅值均为1.0pu为基准,将计算所得A、B、C三相电压相量与故障前基准电压相量进行比较,求出暂降幅值和相位跳变角;其中暂降幅值为故障时电压幅值与故障前电压幅值之比,相位跳变角为故障时电压相角和故障前电压相角之差,如式(4)所示:

$$u_A = U_{AF}, \phi_A = \Phi_A$$

$$[0031] \quad u_B = U_{BF}, \phi_B = \Phi_B + 120^\circ \quad (4)$$

$$u_C = U_{CF}, \phi_C = \Phi_C - 120^\circ$$

[0032] 进一步地,所述步骤S3具体包括以下步骤:

[0033] 步骤S31:建立初步统计表格:根据IEEE对电压暂降幅值的定义,将暂降幅值划分为小于0.1pu、0.1至0.2pu、0.3至0.4pu、0.5至0.6pu、0.6至0.7pu、0.7至0.8pu以及0.8至0.9pu这9个区间;根据实际可能出现的相位跳变范围,将相位跳变划分为大于 $-70^\circ$ 、 $-70^\circ$ 至 $-50^\circ$ 、 $-50^\circ$ 至 $-30^\circ$ 、 $-30^\circ$ 至 $-10^\circ$ 、 $-10^\circ$ 至 $10^\circ$ 、 $10^\circ$ 至 $30^\circ$ 、 $30^\circ$ 至 $50^\circ$ 、 $50^\circ$ 至 $70^\circ$ 以及大于 $70^\circ$ 这9个区间。

[0034] 步骤S32:建立细分统计表格:将幅值划分为0.6至0.7pu、0.7至0.8pu以及0.8至0.9pu这3个区间,将相位跳变划分为 $-30^\circ$ 至 $-25^\circ$ 、 $-25^\circ$ 至 $-20^\circ$ 、 $-20^\circ$ 至 $-15^\circ$ 、 $-15^\circ$ 至 $-10^\circ$ 、 $-10^\circ$ 至 $-5^\circ$ 、 $-5^\circ$ 至 $0^\circ$ 、 $0^\circ$ 至 $5^\circ$ 以及 $5^\circ$ 至 $10^\circ$ 这8个区间。

[0035] 进一步地,所述步骤S4建立考虑暂降幅值和相位跳变的三维频次图及二维等高线图,用以直观体现暂降幅值和相位跳变之间的关系,以及各区域暂降出现的频率规律。

[0036] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:本发明提供了一种同时考虑幅值和相位跳变的电压暂降评估方法。基于蒙特卡罗仿真方法,模拟了实际系统中阻抗角、短路故障类型、故障发生位置、变压器对暂降类型变换等诸多不确定因素,评估关心节点的暂降幅值和相位跳变水平。首次提出考虑幅值和相位跳变的统计表格,并将可能的幅值和相位跳变范围进行了初步划分和细致划分,能从整体和局部两个层面认识和比较关心节点的暂降水平。幅值和相位跳变三维频次图和二维等高线图能给人更加直观的观察和判断。因此,本发明能为供电企业、电力用户等提供较完整的考虑幅值和相位跳变的暂降评估方法和呈现方

法,为治理、投资提供决策依据。

### 附图说明

- [0037] 图1为本发明的电压暂降分压模型；  
 [0038] 图2为本发明的设备终端感受的电压暂降类型；  
 [0039] 图3为本发明的基于蒙特卡罗模拟的考虑相位跳变的电压暂降水平评估流程图；  
 [0040] 图4为本发明的某实际电网电气接线图；  
 [0041] 图5为本发明的STU-11节点三维频次图；  
 [0042] 图6为本发明的STU-11节点二维等高线图。

### 具体实施方式

- [0043] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步说明。  
 [0044] 本实施提供一种考虑相位跳变的电力系统电压暂降水平评估方法,具体包括以下步骤:  
 [0045] 步骤S1:确定蒙特卡罗模拟的故障条件;  
 [0046] 步骤S2:根据步骤S1中确定的故障条件,基于电压暂降分压模型,计算暂降幅值和相位跳变角;  
 [0047] 步骤S3:将步骤S2中的计算结果制成暂降幅值和相位跳变初步统计表格以及细分统计表格;  
 [0048] 步骤S4:将计算结果形成考虑幅值和相位跳变的图形化表示。  
 [0049] 在本实施例中,所述步骤S1通过产生随机数,模拟在不同阻抗角、故障距离、故障类型、变压器对暂降的变换作用等情况,确定蒙特卡罗模拟的故障条件,具体包括以下步骤:  
 [0050] 步骤S11:生成随机数确定阻抗角:电压暂降分压模型如图1所示。阻抗角 $\alpha$ 为故障阻抗 $Z_F$ 与系统阻抗 $Z_S$ 之间的夹角,如式(1)所示,其中 $Z_S=R_S+jX_S$ , $Z_F=R_F+jX_F$ ,  
 [0051] 
$$\alpha = \arg(Z_F) - \arg(Z_S) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{X_S}{R_S}\right) \quad (1)$$
  
 [0052] 由于阻抗角绝大多数位于 $-60^\circ \sim 10^\circ$ 之间,故生成随机数 $x$ 模拟每次故障可能的阻抗角 $RIA_i$ ,如式(2)所示:  
 [0053] 
$$RIA_i = x \times 70 - 60 \quad (2)$$
  
 [0054] 其中, $x$ 服从 $(0,1)$ 均匀分布。  
 [0055] 步骤S12:确定短路故障类型:电力系统中的短路故障分为三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路,且四种短路故障类型发生的概率依次为5%、65%、10%、20%,生成随机数 $y$ 模拟每次发生的短路类型 $FRT_i$ ,如式(3)所示:

$$[0056] \quad \begin{cases} \text{if } 0 \leq y < 0.05, FRT_i = 1 \\ \text{if } 0.05 \leq y < 0.7, FRT_i = 2 \\ \text{if } 0.7 \leq y < 0.8, FRT_i = 3 \\ \text{if } 0.8 \leq y \leq 1.0, FRT_i = 4 \end{cases} \quad (3)$$

[0057] 其中,  $RFT_i=1, 2, 3, 4$  分别表示发生三相对称短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路。

[0058] 步骤S13:生成随机数确定故障位置:故障位置用故障点到关心节点(图1中的PCC点)的距离标么值 $p$ 表示, $p$ 服从 $(0, 1)$ 均匀分布;对于长度为 $L$ 的线路,故障点到PCC点的距离可表示为 $l=pL$ 。

[0059] 步骤S14:生成随机数确定变压器对暂降类型的变换作用:对称和不对称短路故障造成的电压暂降分为7种类型。考虑到零序分量通常不会传播到设备终端,设备侧能感受到的暂降类型有5种。因此在暂降类型的模拟中,三相短路故障导致的类型A,单相接地短路故障导致的类型C、D,两相短路故障导致的类型C、D,以及两相接地短路故障导致的类型F、G,如图2所示,则生成随机数 $z$ 服从 $(0, 1)$ 分布;

[0060] 若所述步骤S12中确定短路类型为三相短路,不论 $z$ 为何值,变换结果都为A类暂降;若确定短路类型为单相接地短路或两相短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为C类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为D类暂降;若确定短路类型为两相接地短路,当 $0 < z \leq 0.5$ 时为F类暂降,当 $0.5 \leq z < 1$ 时为G类暂降。

[0061] 在本实施例中,所述步骤S2具体包括以下步骤:

[0062] 步骤S21:根据生成的故障条件进行短路计算:三相对称故障可直接应用分压公式求解;不对称故障需应用对称分量法,首先利用各边界条件求出正、负、零序电压,再叠加旋转因子作用合成为A、B、C三相电压相量,分别计算各相故障时电压幅值 $U_{AF}$ 、 $U_{BF}$ 、 $U_{CF}$ 和相角 $\Phi_A$ 、 $\Phi_B$ 、 $\Phi_C$ ;

[0063] 步骤S22:计算暂降幅值和相位跳变角:以故障前A相电压为 $0^\circ$ 、B相电压为 $-120^\circ$ 、C相电压为 $120^\circ$ 、三相幅值均为 $1.0pu$ 为基准,将计算所得A、B、C三相电压相量与故障前基准电压相量进行比较,求出暂降幅值和相位跳变角;其中暂降幅值为故障时电压幅值与故障前电压幅值之比,相位跳变角为故障时电压相角和故障前电压相角之差,如式(4)所示:

$$\begin{aligned}
 u_A &= U_{AF}, \phi_A = \Phi_A \\
 u_B &= U_{BF}, \phi_B = \Phi_B + 120^\circ \\
 u_C &= U_{CF}, \phi_C = \Phi_C - 120^\circ
 \end{aligned} \tag{4}$$

[0065] 在本实施例中,所述步骤S3具体包括以下步骤:

[0066] 步骤S31:建立初步统计表格:根据IEEE对电压暂降幅值的定义,将暂降幅值划分为小于 $0.1pu$ 、 $0.1$ 至 $0.2pu$ 、 $0.3$ 至 $0.4pu$ 、 $0.5$ 至 $0.6pu$ 、 $0.6$ 至 $0.7pu$ 、 $0.7$ 至 $0.8pu$ 以及 $0.8$ 至 $0.9pu$ 这9个区间;将相位跳变划分为大于 $-70^\circ$ 、 $-70^\circ$ 至 $-50^\circ$ 、 $-50^\circ$ 至 $-30^\circ$ 、 $-30^\circ$ 至 $-10^\circ$ 、 $-10^\circ$ 至 $10^\circ$ 、 $10^\circ$ 至 $30^\circ$ 、 $30^\circ$ 至 $50^\circ$ 、 $50^\circ$ 至 $70^\circ$ 以及大于 $70^\circ$ 这9个区间。幅值和区间划分如表1所示。

[0067] 表1暂降幅值和相位跳变初步统计表格



[0068]

幅值	相位跳变角度 (°)								
	大于 -70	-70~-50	-50~-30	-30~-10	-10~10	10~30	30~50	50~70	大于 70
80~90%									
70~80%									
60~70%									
50~60%									
40~50%									
30~40%									
20~30%									
10~20%									
<10%									

[0069] 步骤S32:建立细分统计表格:根据仿真和实际暂降监测数据可知,90%的暂降,其幅值位于0.6~0.9pu之间、相位跳变值位于-30°~10°之间。将幅值划分为0.6至0.7pu、0.7至0.8pu以及0.8至0.9pu这3个区间,将相位跳变划分为-30°至-25°、-25°至-20°、-20°至-15°、-15°至-10°、-10°至-5°、-5°至0°、0°至5°以及5°至10°这8个区间。为更加细致刻画各节点的幅值和相位跳变规律,在表1的基础上将暂降频繁出现的范围进一步细分,如表2所示。

[0070] 表2暂降幅值和相位跳变细分统计表格

[0071]

幅值	相位跳变角度 (°)							
	-30~-25	-25~-20	-20~-15	-15~-10	-10~-5	-5~0	0~5	5~10
80~90%								
70~80%								
60~70%								

[0072] 在本实施例中,所述步骤S4建立考虑暂降幅值和相位跳变的三维频次图及二维等高线图,用以直观体现暂降幅值和相位跳变之间的关系,以及各区域暂降出现的频率规律。

[0073] 在本实施例中,基于蒙特卡罗模拟的考虑相位跳变的电压暂降水平评估流程如图3所示。

[0074] 下面以某实际电网为例进行电压暂降水平评估,该电网电气接线图如图4所示,其中,STU-11是关心节点(PCC点)。基于蒙特卡罗仿真,考虑相位跳变的电压暂降评估结果如表3、4所示,结果图形化表示如图5、6所示。可以看出,幅值越大,相位跳变角越小的暂降出现的频率越多,绝大部分暂降出现在幅值70~90%,相位跳变角-20~10°的区域。统计表格结合三维频次图、二维等高线图,结果更为直观。

[0075] 表3STU-11节点暂降幅值和相位跳变角初步统计结果

[0076]

幅值	相位跳变角度 (°)								
	大于 -70	-70~-50	-50~-30	-30~-10	-10~10	10~30	30~50	50~70	大于 70
80~90%	0	0	0	5.2	24.32	1.64	0	0	0
70~80%	0	0	0.12	3.72	8.24	0.44	0	0	0
60~70%	0	0	0.24	2.48	4.36	0.56	0	0	0
50~60%	0	0.04	0.32	1.08	1.44	1.16	0.04	0	0
40~50%	0	0	0.2	0.28	0.72	0.12	0.08	0.04	0
30~40%	0	0.08	0.04	0.2	0.4	0.04	0.08	0.08	0
20~30%	0	0	0.08	0.08	0.28	0.04	0.04	0	0
10~20%	0	0	0.04	0.04	0.08	0	0	0	0
<10%	0	0.04	0	0.08	0	0	0	0	0

[0077] 表4STU-11节点出现频率较多的暂降幅值和相位跳变角细分统计结果

[0078]

幅值	相位跳变角度 (°)							
	-30~-25	-25~-20	-20~-15	-15~-10	-10~-5	-5~0	0~5	5~10
80~90%	0.08	1	1.76	2.36	5.68	10.28	6.36	2
70~80%	0.4	0.4	1.32	1.6	1.68	4.16	1.68	0.72
60~70%	0	0	0	0	0	0	0	0

[0079] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,凡依本发明申请专利范围所做的均等变化与修饰,皆应属本发明的涵盖范围。

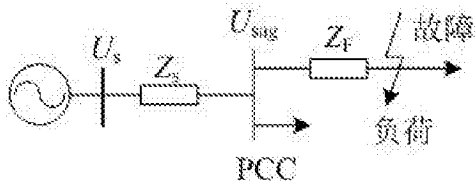


图1

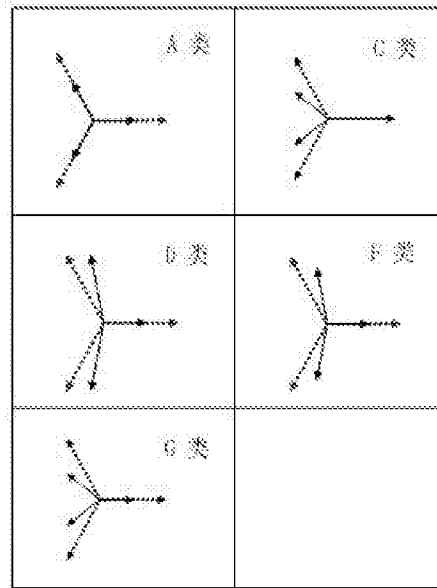


图2

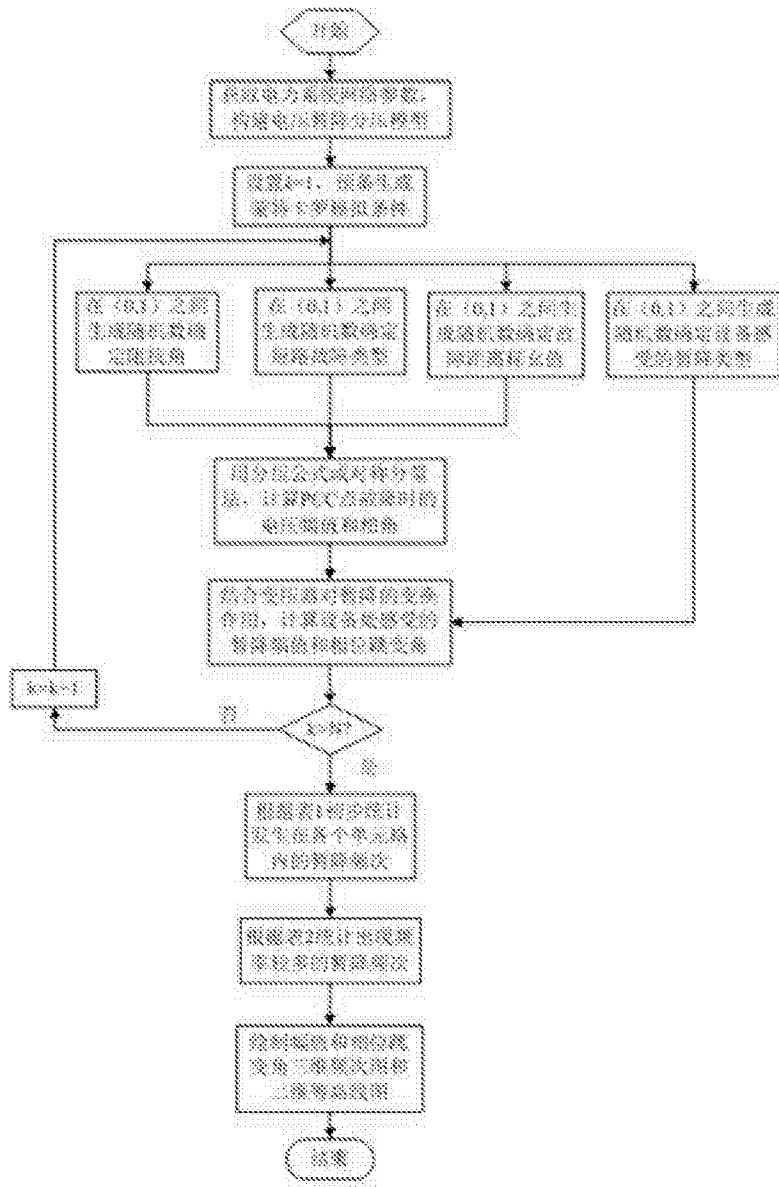


图3

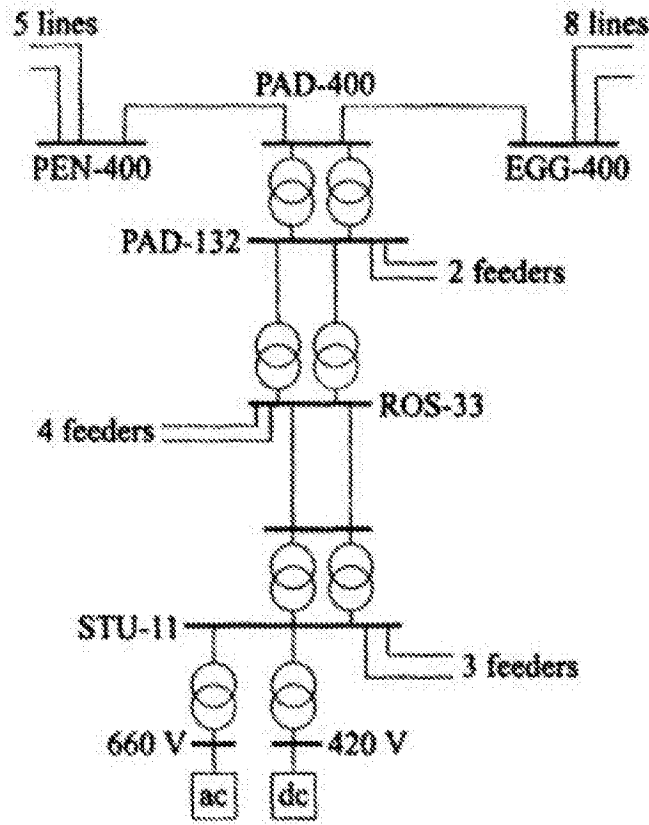


图4

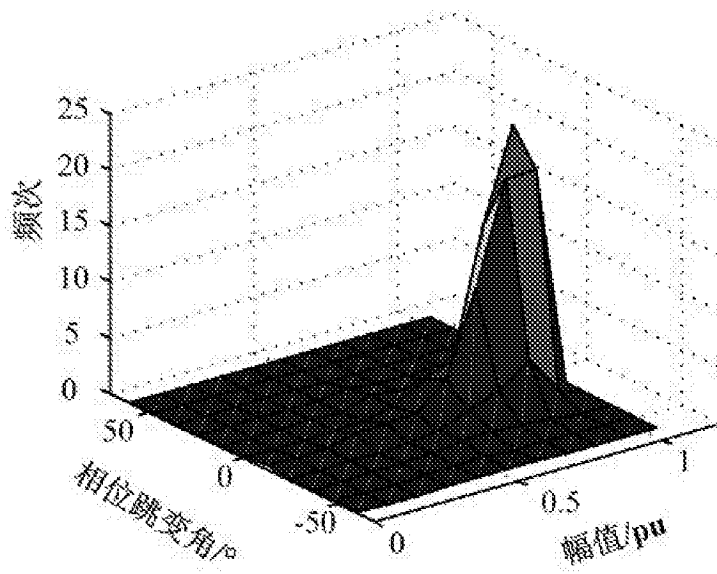


图5

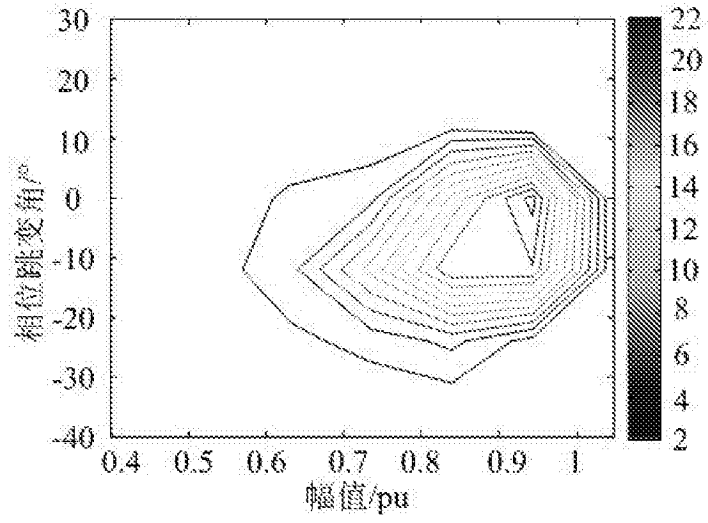


图6