



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710066409.3

[43] 公开日 2008年5月28日

[11] 公开号 CN 101188354A

[22] 申请日 2007.11.30

[21] 申请号 200710066409.3

[71] 申请人 昆明理工大学

地址 650093 云南省昆明市五华区一二一大街文昌路68号(昆明理工大学)

[72] 发明人 束洪春 彭仕欣 李斌 董俊
刘志坚 刘可真 孙士云 唐岚
邱革非

[74] 专利代理机构 昆明今威专利代理有限公司
代理人 赛晓刚

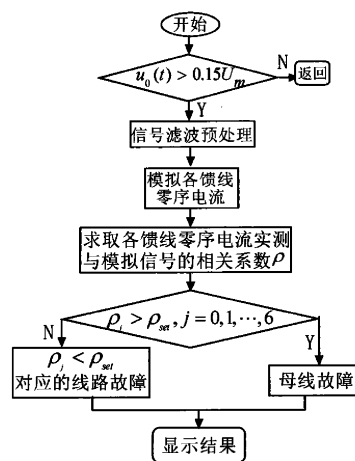
权利要求书1页 说明书7页 附图2页

[54] 发明名称

小电流接地系统故障选线的测后模拟方法

[57] 摘要

本发明涉及小电流接地系统故障选线的测后模拟方法，属电力系统继电保护技术领域。本方法为：当母线零序电压瞬时值越限时，故障选线装置立即启动并录波；采用数字滤波算法获取母线零序电压和各馈线零序电流的暂态纯故障分量；根据小电流接地系统发生单相接地故障时的母线零序电压实测值的暂态纯故障分量和馈线零序分布电容参数，在依次假设各馈线为健全馈线的前提下，运用测后模拟定量地求解各馈线的零序电流波形；对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形的暂态纯故障分量在一定数据窗下进行相关度分析，计算二者的相关系数，藉此形成选线判据1、2，并依据判据对系统故障进行选线。原理分析和仿真表明，该方法选线准确、可靠。



1、小电流接地系统故障选线的测后模拟方法，其特征在于依据小电流接地系统发生单相接地故障时的母线零序电压实测值和馈线零序分布电容参数，在依次假设各馈线为健全馈线的前提下，运用测后模拟法定量地求解各馈线的零序电流波形，比较各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形会发现：健全馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形相吻合，具有极强的相似性；而故障馈线零序电流的模拟波形是在假设其正常工作的条件下获取的，实测波形和模拟波形差异较大，对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形在一定数据窗下进行相关度分析，籍此形成选线判据，实现选线。

2、根据权利要求1所述的小电流接地系统故障选线的测后模拟方法，其特征在于完成上述方法的具体步骤如下：

(1) 当母线零序电压瞬时值 $u_n(t)$ 大于 $K_u U_n$ ，故障选线装置立即启动，记录下故障前2个周波和故障后10个周波的各馈线零序电流和母线零序电压，其中 K_u 一般取值为0.15， U_n 表示母线额定电压；

(2) 用各馈线零序电流和母线零序电压故障后1个周波的数据对应减去故障前1个周波的数据，再对应减去故障后稳定周波的数据，利用上述滤波算法消除系统不对称分量及稳态工频分量，以获取各馈线零序电流和母线零序电压的暂态纯故障分量；

(3) 在依次假设各馈线为健全馈线的前提下，将母线零序电压实测值的暂态纯故障分量作为激励电压源，根据各馈线零序分布电容参数，用测后模拟法定量的求解各馈线零序电流的暂态纯故障分量；

(4) 利用健全馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形相吻合，具有极强的相似性；而故障馈线零序电流的实测波形和模拟波形差异较大的特征，对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形在一定数据窗下进行相关度分析，计算各馈线零序电流的实测波形和模拟波形的暂态纯故障分量的相关系数 ρ_j ；

(5) 比较各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形的暂态纯故障分量的相关系数 ρ_j ，形成选线判据： $\rho_j > \rho_{set}, j=1,2,\dots,n$ ，对于所有的 j 恒成立，则判定母线故障； $\rho_j < \rho_{set}, j=1,2,\dots,n$ ， j 对应的馈线为故障馈线（ ρ_{set} 取0.2）。

小电流接地系统故障选线的测后模拟方法

技术领域:

本发明涉及小电流接地系统故障选线的测后模拟方法,属电力系统继电保护技术领域。

背景技术:

单相接地电弧能够自行熄灭的中性点非有效接地系统称为小电流接地系统(又称小接地电流系统),主要以中性点不接地、经高电阻接地或经消弧线圈接地等接地形式出现。我国6~66kV的配电网通常都属于小电流接地系统。

运行和研究表明,小电流接地系统单相接地选线问题之所以难以解决,其主要原因在于:(1)故障边界太复杂、随机,难以用单一统计模型描述。(2)稳态故障分量小,给信号的检测和选线判断造成困难。(3)影响的因素太多:a)与线路长短及结构有关(参考文献1)。小电流接地系统单相接地故障电流由线路对地电容产生,线路的对地电容与线路的长短和结构关系密切。一般来说,电缆线路的对地电容比架空线路的大。线路对地电容与线路长度成正比。b)与故障边界和故障角有关。c)与电流互感器有关。在小电流接地选线中,一般采用测量用电流互感器获得零序电流进行选线。因为零序电流通过3个单相电流互感器组成的相序滤过器获得,每相互感器的铁芯不可能完全相同,所以存在零序电流误差。另外,电流互感器的变比较大,铁芯具有非线性,都对选线有影响。电流互感器一致性较差;实际应用中,中低压电网中电流互感器的饱和时有发生。(4)对于谐振接地系统,虽然选线与自动补偿装置一体化是一种有前途的解决方案,但是现场已装设了自动补偿装置,故仍需研究功能独立的选线保护技术。(5)尚需解决好灵敏启动与选线可靠性的一系列问题。(6)各种方法都有局限性,普适方法很难找到,如何解决好多种选线判据有效融合的问题也是一个重要问题。

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障相电容放电及非故障相电容充电,产生幅值比稳态值大几倍到几十倍的暂态电流,利用暂态电流进行故障选线,具有灵敏度高、受消弧线圈影响小等优点。近几年,人们特别关注利用暂态信号的小电流接地故障保护技术(参考文献2~16)。小电流接地系统发生单相接地故障时,线电压仍对称而且故障电流较小,为了提高供电可靠性,规

程规定系统可以继续运行 1~2h, 此亦为应用较为复杂但更为可靠的算法实现选线提供了时间上的宽容条件。

发明内容:

为了克服上述现有小电流接地系统选线方法的不足, 本发明提出了一种基于零序电流测后由母线零序电压激励进行模拟的故障选线新方法, 即小电流接地系统故障选线的测后模拟方法。

本发明的技术方案如下: 依据小电流接地系统发生单相接地故障时的母线零序电压实测值和馈线零序分布电容参数, 在依次假设各馈线为健全馈线的前提下, 运用测后模拟法定量地求解各馈线的零序电流波形, 比较各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形会发现: 健全馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形相吻合, 具有极强的相似性; 而故障馈线零序电流的模拟波形是在假设其正常工作的条件下获取的, 实测波形和模拟波形差异较大。对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形在一定数据窗下进行相关度分析, 籍此形成选线判据, 实现选线。

本原理方法为: 当母线零序电压瞬时值越限时, 故障选线装置立即启动并录波; 采用数字滤波算法获取母线零序电压和各馈线零序电流的暂态纯故障分量; 根据小电流接地系统发生单相接地故障时的母线零序电压实测值的暂态纯故障分量和馈线零序分布电容参数, 在依次假设各馈线为健全馈线的前提下, 运用测后模拟法定量地求解各馈线的零序电流波形; 对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形的暂态纯故障分量在一定数据窗下进行相关度分析, 计算二者的相关系数, 籍此形成选线判据, 并依据判据对系统故障进行选线。原理分析和仿真表明, 该方法选线准确、可靠。

对于小电流接地网络故障电磁暂态频率在 0~4kHz 范围内, 其架空线路可等效为 π 型模型。对于具有多条没有分支的简单馈线小电流接地系统, 在发生单相接地故障时, 其零序网络如图 1 所示。

图中: i_{0j} 各馈线的零序电流; u_0 为母线零序电压; U_{f0} 为故障点虚拟电源在零序网络上的压降; R_{f0} 为零序过渡电阻; L 为消弧线圈零序电感; R 为消弧线圈串联零序电阻; L_{0j} 、 R_{0j} 、 C_{0j} 分别为第 j 条馈线的零序电感、零序电阻和零序分布电容。

对图 1 中任意一条健全馈线, 根据此时该馈线零序电流电压关系可得公式

$$u_0 = R_{0j} \left(i_{0j} - \frac{1}{2} C_{0j} \frac{du_0}{dt} \right) + L_{0j} \frac{d}{dt} \left(i_{0j} - \frac{1}{2} C_{0j} \frac{du_0}{dt} \right) + \frac{2}{C_{0j}} \int \left(i_{0j} - \frac{1}{2} C_{0j} \frac{du_0}{dt} \right) dt, j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

在实际配电网中(以 JS1 杆型、LGI-70 导线为例), $L_0=4.6914 \times 10^{-3} \text{H/km}$, $R_0=0.5663 \Omega/\text{km}$, $C_0=4.6977 \times 10^{-9} \text{F/km}$ 。线路的零序阻抗远小于电容的容抗, 可以忽略不计, 则图 1 所示的零序网络可以简化为图 2 所示。

由图 2 可见, 公式(1)中相对而言有 $R_0 \approx 0$, $L_0 \approx 0$, 即健全馈线零序电流电压关系可以简化为

$$u_0 = \frac{1}{C_{0j}} \int i_{0j} dt, j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

现验证如下: 将单位电流阶跃信号作为激励电流源, 分别求解图 1 和图 2 的零序网络任意一条健全馈线对应的电流单位阶跃激励的电压响应, 其结果如图 3 所示。

图 3 中, 虚线对应图 1 网络的响应; 实线对应图 2 网络的响应。

由图 3 可见, 图 1 所示网络和图 2 所示网络的单位阶跃响应相吻合, 故用图 2 所示的简化网络作为故障选线的故障等值零序网络在工程上是准确、可行的。

考虑到实际工程中电流互感器传变特性相互之间不一定一致, 而工频量与负荷关系很大, 实际系统往往是不对称的。研究和仿真表明, 对实际小电流接地系统, 一般在故障发生后 3 到 4 个周波, 其暂态分量已很小, 可认为电磁动态过程基本结束。根据上述特征, 可利用以下算法消除系统不对称分量及稳态工频分量, 来获取各馈线零序电流和母线零序电压的暂态纯故障分量。(后文部分未经特殊说明, 所提到的各馈线零序电流和母线零序电压均指“暂态纯故障分量”。)

$$\begin{cases} i_{0jp} = i_{0j(1)} - i_{0j(-1)} - i_{0j(10)} \\ u_{0p} = u_{0(1)} - u_{0(-1)} - u_{0(10)} \end{cases}, j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: i_{0jp} 、 u_{0p} 分别为各馈线零序电流和母线零序电压的暂态纯故障分量; $i_{0j(1)}$ 、 $u_{0(1)}$ 、 $i_{0j(-1)}$ 、 $u_{0(-1)}$ 、 $i_{0j(10)}$ 、 $u_{0(10)}$ 分别对应各馈线零序电流和母线零序电压故障后第一周波、故障前一周波、故障后的稳定周波, 如第十个周波的采样信号。各馈线零序电流和母线零序电压及其暂态纯故障分量波形如图 4 所示。对于电弧性单相接地故障而言, 只需将式(3)中 $i_{0j(10)}$ 和 $u_{0(10)}$ 置换为电弧稳定之后某一周波对应的采样值即可。

假设 1 所有馈线均为健全馈线

在此假设下, 当小电流接地系统发生单相接地故障时, 根据公式(2)、(3)可得各馈线零序电流和母线零序电压的关系为

$$i_{0jp} = C_{0j} \frac{du_{0p}}{dt}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

各馈线零序电流和母线零序电压的实测波形记为 i_{0jp} 、 u_{0p} 。将 u_{0p} 作为激励电压源, 利用公式(4)模拟各馈线零序电流 i'_{0jp} 。各馈线零序电流的实测波形和模拟波形如图 5 所示。

由图 5 可见, 若上述假设 1 为真, 则曲线 i_{0jp} 和 i'_{0jp} 基本重合; 反之, 若上述假设 1 为假, 则至少有一条馈线 k 发生了故障, 且曲线 i_{0kp} 和 i'_{0kp} 差异较大。

基于上述分析, 确定各馈线 i_{0jp} 和 i'_{0jp} 波形的关联程度, 即可构建故障选线判据。

相关函数能综合反映信号中每一频率分量的综合相位关系以及幅值信息, 是描述随机信号的重要统计数字特征 (参考文献 17)。 $x(t)$ 和 $y(t)$ 是两个能量有限的信号, 它们的互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (5)$$

式(5)表示信号 $x(t)$ 与时间位移 τ 后的另一信号 $y(t-\tau)$ 的相似程度。各馈线零序电流的实测信

号 i_{0jp} 和模拟信号 i'_{0jp} 并不是取无限长, 可以看作各态遍历平稳随机信号, 用单个观测到的时间历程记录信号的总体特征, 式 (5) 可写为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (6)$$

实现故障选线需要获取相同时刻各馈线零序电流的实测信号 i_{0jp} 和模拟信号 i'_{0jp} 的相似程度, 且录波和模拟得到的均为离散信号。因此, 将相关函数表达式离散化, 并取 $\tau=0$ 得

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (7)$$

式中 N 为采样点数。

因 $|R_{xy}(\tau)| \leq \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^n x^2(n) \sum_{i=1}^n y^2(n)}$ 恒成立, 则相关函数可归一化为

$$\rho = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \left[\sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2 \sum_{n=0}^{N-1} y(n)^2 \right]^{-1/2} \quad (8)$$

式中 ρ 为相关系数且 $|\rho| \leq 1$, ρ 越大, 两个波形越相似。当 $\rho = 1$, 说明 $x(n)$ 和 $y(n)$ 完全相似。采用相关系数检测信号, 综合反映信号中每一频率分量的综合相位关系以及幅值信息, 而非单一频率的简单的相位关系, 有效克服了仅依靠故障信号的单一信息来检测故障的缺陷。

由此可形成选线判据:

- 1、 $\rho_j > \rho_{set}, j = 1, 2, \dots, n$, 对于所有的 j 恒成立, 则判定母线故障;
- 2、 $\rho_j < \rho_{set}, j = 1, 2, \dots, n$, j 对应的馈线为故障馈线 (ρ_{set} 取 0.2)。

本发明与现有技术相比具有如下优点:

1、一般地, 当于相电压过零值附近发生单相接地故障时, 其电磁暂态分量幅值很小, 造成选线困难, 本发明能有效地克服小故障角情况下故障暂态电流小的影响, 实现正确选线。

2、本发明具有较强的抗电弧接地能力; 受中性点运行方式的影响较小; 用简单的数字滤波算法有效地克服了系统不对称的影响, 采用 12 位 A/D 以 10kHz 采样频率进行录波, 即具有较高的选线精度。

3、本发明在短线故障时, 能克服健全长线对地电容电流的影响; 有很强的抗噪声能力; 高阻接地时也能正确选线。

4、两点以上同时发生单相接地故障时本发明仍然有效。

附图说明:

图 1 本发明单相接地故障零序网络。

图 2 本发明 单相接地故障零序网络简化图。

图 3 本发明单位阶跃响应。

图 4 本发明故障后 1 周波内的暂态零序量。

图 5 本发明零序电流的实测波形和模拟波形。

图 6 本发明故障选线算法流程图。

具体实施方式:

小电流接地系统发生单相接地故障时, 利用上述原理可以实现完善的故障选线。具体实现流程如图 6 所示。

本发明的具体实现步骤如下：

1. 当母线零序电压瞬时值 $u_n(t)$ 大于 $K_0 U_n$ ，故障选线装置立即启动，记录下故障前 2 个周波和故障后 10 个周波的各馈线零序电流和母线零序电压，其中 K_0 一般取值为 0.15， U_n 表示母线额定电压；
2. 用各馈线零序电流和母线零序电压故障后 1 个周波的数据对应减去故障前 1 个周波的数据，再对应减去故障后稳定周波的数据，利用上述滤波算法消除系统不对称分量及稳态工频分量，以获取各馈线零序电流和母线零序电压的暂态纯故障分量；
3. 在依次假设各馈线为健全馈线的前提下，将母线零序电压实测值的暂态纯故障分量作为激励电压源，根据各馈线零序分布电容参数，用测后模拟法定量的求解各馈线零序电流的暂态纯故障分量；
4. 利用健全馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形相吻合，具有极强的相似性；而故障馈线零序电流的实测波形和模拟波形差异较大的特征，对各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形在一定数据窗下进行相关度分析，计算各馈线零序电流的实测波形和模拟波形的暂态纯故障分量的相关系数 ρ_j ；
5. 比较各馈线零序电流的实测波形和由测后模拟方法所求解的波形的暂态纯故障分量的相关系数 ρ_j ，形成选线判据： $\rho_j > \rho_{set}, j = 1, 2, \dots, n$ ，对于所有的 j 恒成立，则判定母线故障；
 $\rho_j < \rho_{set}, j = 1, 2, \dots, n$ ， j 对应的馈线为故障馈线（ ρ_{set} 取 0.2）。

发明人采用本方法进行了大量的数字仿真，其结果表明：该方法是有有效、可靠的。

在本发明说明书的背景技术中引用过的参考文献是：

- [1] 潘永刚. 小电流接地选线模拟试验系统的研制[D]. 北京：华北电力大学，2002.
- [2] 束洪春，肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化，2002，26（21）：58-61
- [3] 郝玉山，高曙. MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报，1994，2（2）：7-11.
- [4] 唐 轶，陈 奎，陈 庆，等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25（6）：49-54.

- [5] 苗友忠, 孙雅明, 杨 华. 中性点不接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 28-32.
- [6] 薛永端, 徐丙银, 冯祖仁. 基于 Hilbert 变换的非正弦电路无功及瞬时无功功率定义[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (12): 35-39.
- [7] 孙雅明, 严 斌. 基于非故障相暂态电流的单相接地故障定位新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 55-59.
- [8] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙银, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 28 (7): 48-53.
- [9] 薛永端, 陈 羽, 徐丙银, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障检测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 83-87.
- [10] 孙雅明, 苗友忠. 谐振接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 62-66.
- [11] 连鸿波, 杨以涵, 潘永刚, 等. 小电流接地系统中面向单相接地故障的重合闸技术[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (6): 73-77.
- [12] 朱 丹, 蔡 旭. 小电流接地电网改进能量法接地选线原理[J]. 继电器, 2004, 32 (10): 44-48.
- [13] 于立涛. 35kV 配电网中性点经小电阻接地的改造方案分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 32(16): 57-59.
- [14] 朱 丹, 贾雅君, 蔡 旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (3): 75-78.
- [15] 索南加乐, 张 超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (19): 65-70.
- [16] 蔡 旭. 基于偏磁消弧线圈的综合增量法单相接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (20): 68-72.
- [17] 吴湘淇. 信号、系统与信号处理[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2000.

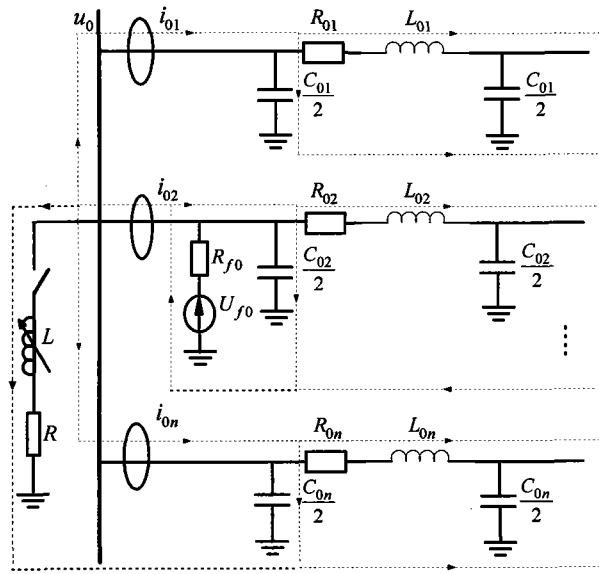


图 1

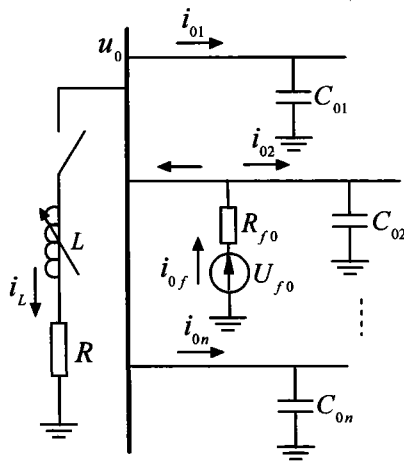


图 2

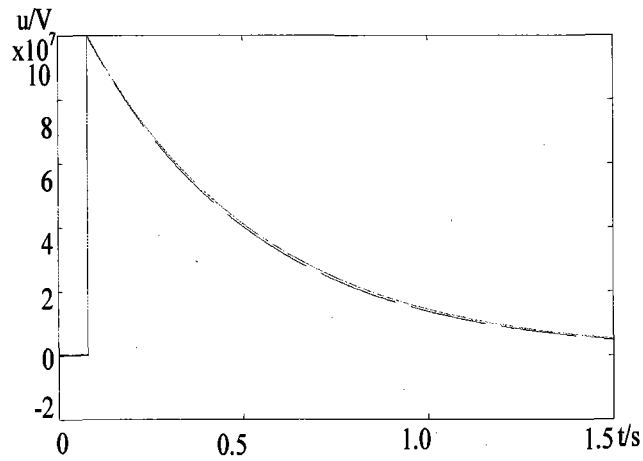


图 3

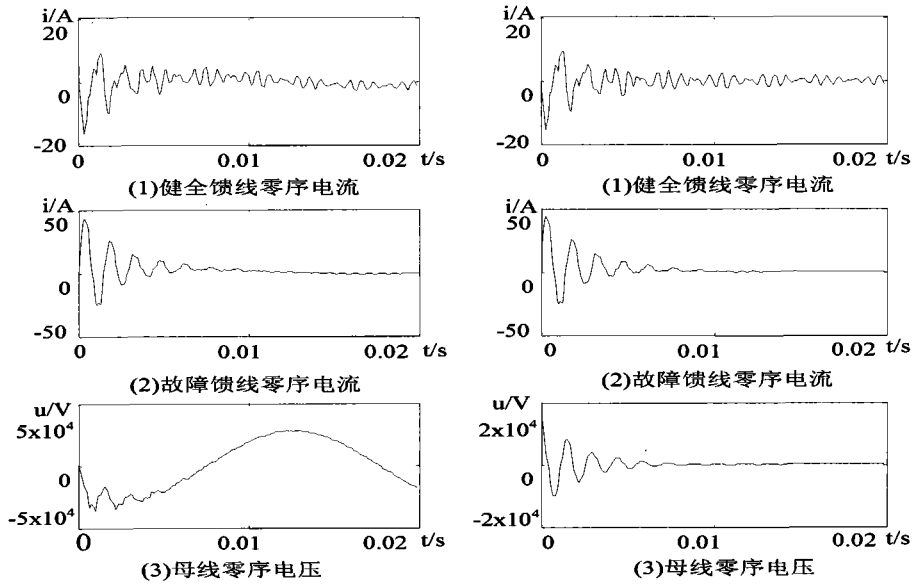


图4

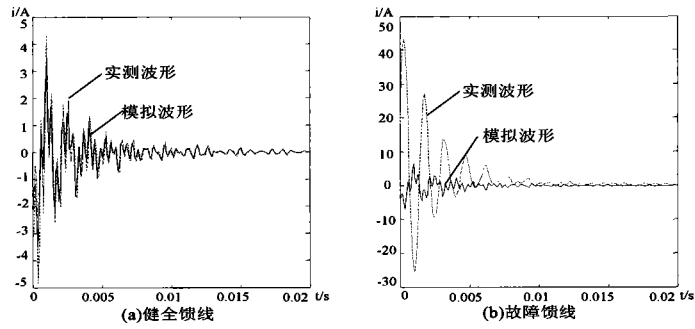


图5

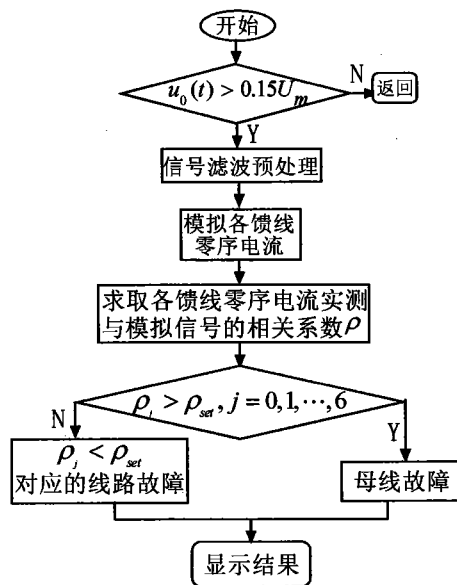


图6