



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107181460 B

(45)授权公告日 2018.12.14

(21)申请号 201511007816.8

CN 101162838 A, 2008.04.16,

(22)申请日 2016.03.09

CN 1547307 A, 2004.11.17,

(65)同一申请的已公布的文献号

尹同庆等.基于小波变换的故障电弧检测技术研究.《实验室研究与探索》.2008,第27卷(第3期),第19-21页.

申请公布号 CN 107181460 A

(43)申请公布日 2017.09.19

Xiu Yao等.Characteristic Study and Time-Domain Discrete Wavelet-Transform Based Hybrid Detection of Series DC Arc Faults.《IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS》.2014,第29卷(第6期),第3103-3115页.

(73)专利权人 上海英孚特电子有限公司

地址 201107 上海市闵行区纪宏路81号

专利权人 上海岩芯电子科技有限公司

(72)发明人 吴春华 袁同浩 黄建明

审查员 何大波

(51)Int.Cl.

H02S 50/00(2014.01)

(56)对比文件

CN 103245883 A, 2013.08.14,

CN 104091323 A, 2014.10.08,

CN 101696986 A, 2010.04.21,

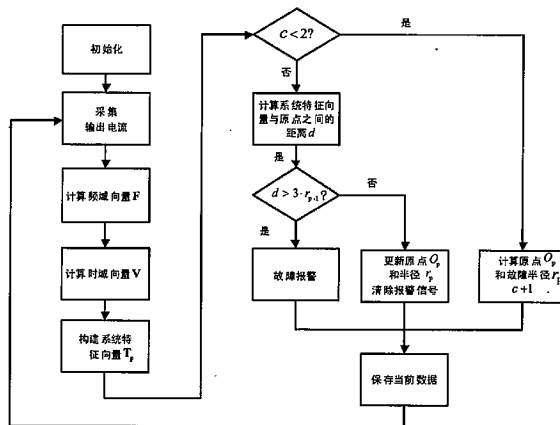
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种光伏系统电弧故障检测方法

(57)摘要

本发明适用于光伏发电系统保护技术领域,提供了一种光伏系统电弧故障检测方法,有效解决了逆变器开关频率对检测算法的干扰,提高了检测正确率;通过实时采集系统输出电流,计算电流的频域特征向量和时域特征向量,并由此构建系统特征向量,然后利用系统特征向量之间的距离可以识别出电弧故障,进而发出警告,通知维护人员采取相应措施,保证系统安全。该方法可以避免不同逆变器开关频率的影响,具有极大的适用性。



1. 一种光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤(1):系统初始化, $X$ 为电流采样原始数据、 $c$ 为循环计数变量、 $F$ 为频域向量、 $V$ 为时域向量、 $T_p$ 为当前时刻系统特征向量、 $T_{p-1}$ 为前一时刻特征向量、 $O_p$ 为当前时刻原点、 $O_{p-1}$ 为前一时刻原点、 $r_p$ 为当前时刻故障半径、 $r_{p-1}$ 为前一时刻故障半径,上述变量全部置零;

步骤(2):采集光伏系统的输出电流;

步骤(3):使用db6小波进行4层变换,计算输出电流各频段能量,并取其对数作为频域向量 $F$ ;

步骤(4):计算输出电流方差作为时域向量 $V$ ;

步骤(5):合并时域向量和频域向量作为当前时刻系统特征向量 $T_p = [F, V]$ ;

步骤(6):若系统循环次数 $c < 2$ ,则进入步骤(11),否则进入步骤(7);

步骤(7):计算系统当前时刻特征向量 $T_p$ 与前一时刻原点 $O_{p-1}$ 之间的欧几里得距离 $d$ ;

步骤(8):若距离 $d$ 大于3倍的前一时刻故障半径 $r_{p-1}$ 则进入步骤(9),否则进入步骤(10);

步骤(9):故障报警;

步骤(10):更新当前时刻原点 $O_p$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,并清除报警信号;

步骤(11):计算当前时刻原点 $O_p = [o_0^p, o_1^p, \dots, o_{16}^p]$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,循环计数变量 $c$ 加1;

步骤(12):将当前时刻数据保存为前一时刻数据,并返回步骤(2)。

2. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(2)中需要采集的输出电流采样频率为200kHz,每次需采集1024个数据,即每次数据采集持续5.67ms,得到原始数据 $X = [x_0, x_1, \dots, x_{1023}]$ 。

3. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(3)中计算得到的频域特征向量为16维向量 $F = [e_0, e_1, e_2, \dots, e_{15}]$ ,该向量可以看成16维空间的一点,对长度为1024的原始数据 $X$ ,使用db6进行小波变换,得到16组长度为64的系数 $b_m = [b_0^m, b_1^m, \dots, b_{63}^m]$ ,每组系数均可计算得到相应的能量 $\sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i)$ ,取对数后可得

$$e_m = \log \left( \sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i) \right), m \in \{Z, 0 \leq m \leq 15\}。$$

4. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(4)中计算得到的时域特征向量为1维向量 $V$ ,对长度为1024的原始数据 $X$ ,计算平均值

$$\mu = \frac{1}{1024} \left[ \sum_{n=0}^{1023} X(n) \right], \text{时域向量 } V = \frac{1}{1024} \left[ \sum_{n=0}^{1023} (X(n) - \mu)^2 \right]。$$

5. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(5)中构建的当前时刻系统特征向量,为17维向量 $T_p = [t_0^p, t_1^p, t_2^p, \dots, t_{16}^p]$ ,该特征向量可看成17维空间的一点,其中, $t_0^p = e_0, t_1^p = e_1, t_2^p = e_2, \dots, t_{15}^p = e_{15}, t_{16}^p = V$ 。

6. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(7)中当前时刻系统特征向量 $T_p = [t_0^p, t_1^p, t_2^p, \dots, t_{16}^p]$ 和前一时刻原点 $O_{p-1} = [o_0^{p-1}, o_1^{p-1}, o_2^{p-1}, \dots, o_{16}^{p-1}]$ 之间的欧几里得

$$\text{距离为 } d = \sqrt{(T_p - O_{p-1})^2} = \sqrt{(t_0^p - o_0^{p-1})^2 + (t_1^p - o_1^{p-1})^2 + \dots + (t_{16}^p - o_{16}^{p-1})^2}。$$

7. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(10)中,当前时刻原点 $O_p$ 更新为前一时刻原点 $O_{p-1}$ 和当前时刻系统特征向量 $T_p$ 的中点,即 $O_p = \frac{1}{2}[t_0^p + o_0^{p-1}, t_1^p + o_1^{p-1}, t_2^p + o_2^{p-1}, \dots, t_{16}^p + o_{16}^{p-1}]$ ;当前时刻故障半径 $r_p$ 更新为前一时刻的故障半径 $r_{p-1}$ 和距离 $d$ 的平均值,即 $r_k = \frac{1}{2}[d + r_{p-1}]$ ,最后将报警信号清零。

8. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(11)中,当 $c=0$ 时,直接进入步骤(12);当 $c=1$ 时,当前时刻原点 $O_p$ 更新为当前系统特征向量 $T_p$ 和前一时刻系统特征向量 $T_{p-1}$ 的中点,即 $O_p = \frac{1}{2}[t_0^{p-1} + t_0^p, t_1^{p-1} + t_1^p, t_2^{p-1} + t_2^p, \dots, t_{16}^{p-1} + t_{16}^p]$ ,当前时刻故障半径 $r_p$ 更新为 $T_p$ 和 $T_{p-1}$ 之间的距离,即 $r_p = \sqrt{(t_0^p - t_0^{p-1})^2 + (t_1^p - t_1^{p-1})^2 + \dots + (t_{16}^p - t_{16}^{p-1})^2}$ ,最后令循环计数 $c$ 自增1。

9. 根据权利要求1所述的光伏系统电弧故障检测方法,其特征在于:所述步骤(12)中,将当前时刻系统特征向量 $T_p$ 、当前时刻原点 $O_p$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ 分别赋值给前一时刻系统特征向量 $T_{p-1}$ 、前一时刻原点 $O_{p-1}$ 和前一时刻故障半径 $r_{p-1}$ ,即: $T_{p-1} = T_p, O_{p-1} = O_p, r_{p-1} = r_p$ ,并返回步骤(2)。

## 一种光伏系统电弧故障检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种光伏系统电弧故障检测方法,尤其涉及一种消除逆变器开关频率干扰的电弧检测方法。

### 背景技术

[0002] 由于太阳能的取之不竭和无污染等特性,光伏发电的应用呈现出高速发展的态势。系统运行状态的监控及维护对光伏发电系统的安全运行至关重要,及时、可靠的故障预警能够避免火灾、设备损毁等重大事故,并提高光伏电站的运行寿命及经济效益。目前大部分光伏电站都采用人工巡检维护,查看线路是否发生故障。但是光伏组件多安装在高处或野外恶劣环境中,人工维护既费时,又危险,同时电缆连接处细小裂缝不易观察到,而这种情况又极易引发电弧故障。所以光伏系统电弧故障自动检测显得十分重要。

[0003] 在光伏系统电弧故障诊断研究中,电弧的物理过程十分复杂,电压电流关系非线性强,受环境参数影响大,这使得无法建立一个合适的故障诊断数学模型。同时逆变器开关频率及其谐波频段与电弧故障特征频段部分重合,使得检测方法极易受到干扰。不同光伏系统中的逆变器采用的开关频率往往并不统一,这使得固定频段的检测方法没有通用性。

[0004] 国内外有很多针对电弧故障诊断方法,主要有时域电流峰值检测法、频域固定频段能量检测法和BP神经网络法等。时域电流峰值检测法,主要利用了故障后,电弧使得系统电流波动变大这一特征,然而在光伏系统中由于逆变器的影响,系统电流本身就有较大纹波,对于间隙小的稳定燃烧电弧,电流峰峰值变化不大,同时光伏系统在最大功率点动态跟踪以及系统负载变化时都会出现瞬时较大的峰峰电流,所以该方法容易受到干扰,误判较多;固定频段的能量检测法利用傅里叶变换计算某一频段的能量之和,并利用该参数识别电弧故障,在使用该方法时必须避开逆变器开关频率及其谐波所在的频段以防止逆变器工作对该方法的影响,但是对于不同的逆变器,开关频率往往不同,这使得该方法有较大局限性;BP神经网络方法,主要利用神经网络对于非线性系统的识别能力,将电弧故障与正常状态信息区分,但是该方法本身非线性强,容易受到特殊状态的干扰,同时该方法需要大量数据训练,实现难度较大。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的就是为了解决上述问题,提供了一种光伏系统电弧检测方法,能够准确地对光伏系统中可能出现的电弧故障进行实时检测,本发明能够有效提高光伏系统电弧故障检测的准确性,确保光伏系统安全、可靠地运行。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用下述技术方案:

[0007] 一种光伏系统电弧故障方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0008] 步骤(1):系统初始化;

[0009] 步骤(2):采集光伏系统的输出电流;

[0010] 步骤(3):使用db6小波进行4层变换,计算输出电流各频段能量,并取其对数作为

频域向量F;

[0011] 步骤(4):计算输出电流方差作为时域向量V;

[0012] 步骤(5):合并时域向量和频域向量作为当前时刻系统特征向量 $T_p = [F, V]$ ;

[0013] 步骤(6):若系统循环次数 $c < 2$ ,则进入步骤(11),否则进入步骤(7);

[0014] 步骤(7):计算系统当前时刻特征向量 $T_p$ 与前一时刻原点 $O_{p-1}$ 之间的欧几里得距离d;

[0015] 步骤(8):若步骤(7)中计算的距离d大于3倍的前一时刻故障半径 $r_{p-1}$ 则进入步骤(9),否则进入步骤(10);

[0016] 步骤(9):故障报警;

[0017] 步骤(10):更新当前时刻原点 $O_p$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,并清除报警信号;

[0018] 步骤(11):计算当前时刻原点 $O_p = [o_0^p, o_1^p, \dots, o_{15}^p]$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,循环计数变量c加1;

[0019] 步骤(12):将当前时刻数据保存为前一时刻数据,并返回步骤(2)。

[0020] 所述步骤(1)中的初始化操作中,X为电流采样原始数据、c为循环计数变量、F为频域向量、V为时域向量、 $T_p$ 为当前时刻系统特征向量、 $T_{p-1}$ 前一时刻特征向量、 $O_p$ 为当前时刻原点、 $O_{p-1}$ 为前一时刻原点、 $r_p$ 为当前时刻故障半径、 $r_{p-1}$ 为前一时刻故障半径,上述变量全部置零。

[0021] 所述步骤(2)中需要采集的输出电流,采样频率为180kHz,每次需采集1024个数据,即每次数据采集持续5.67ms,得到原始数据 $X = [x_0, x_1, \dots, x_{1023}]$ 。

[0022] 所述步骤(3)中计算得到的频域特征向量为16维向量 $F = [e_0, e_1, e_2, \dots, e_{15}]$ ,该向量可以看成16维空间的一点,对长度为1024的原始数据X,使用db6进行小波变换,得到16组长长度为64的系数 $b_m = [b_0^m, b_1^m, \dots, b_{63}^m]$ ,每组系数均可计算得到相应的能量 $\sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i)$ ,取对数

后可得 $e_m = \log\left(\sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i)\right)$ ,  $m \in \{Z, 0 \leq m \leq 15\}$ 。

[0023] 所述步骤(4)中计算得到的时域特征向量为1维向量V,对长度为1024的原始数据X,计算平均值 $\mu = \frac{1}{1024} \left[ \sum_{n=0}^{1023} X(n) \right]$ ,向量 $V = \frac{1}{1024} \left[ \sum_{n=0}^{1023} (X(n) - \mu)^2 \right]$ 。

[0024] 所述步骤(5)中构建的当前时刻系统特征向量,为17维向量 $T_p = [t_0^p, t_1^p, t_2^p, \dots, t_{16}^p]$ ,该特征向量可看成17维空间的一点。其中, $t_0^p = e_0$ ,  $t_1^p = e_1$ ,  $t_2^p = e_2$ ,  $\dots$ ,  $t_{15}^p = e_{15}$ ,  $t_{16}^p = V$ 。

[0025] 所述步骤(7)中当前时刻系统特征向量 $T_p = [t_0^p, t_1^p, t_2^p, \dots, t_{16}^p]$ 和前一时刻原点 $O_{p-1} = [o_0^{p-1}, o_1^{p-1}, o_2^{p-1}, \dots, o_{15}^{p-1}]$ 之间的欧几里得距离为 $d = \sqrt{(T_p - O_{p-1})^2} = \sqrt{(t_0^p - o_0^{p-1})^2 + (t_1^p - o_1^{p-1})^2 + \dots + (t_{15}^p - o_{15}^{p-1})^2}$ 。

[0026] 所述步骤(10)中,当前时刻原点 $O_p$ 更新为前一时刻原点 $O_{p-1}$ 和当前时刻系统特征向量 $T_p$ 的中点,即 $O_p = \frac{1}{2} [t_0^p + o_0^{p-1}, t_1^p + o_1^{p-1}, t_2^p + o_2^{p-1}, \dots, t_{15}^p + o_{15}^{p-1}]$ ;当前时刻故障半径 $r_p$ 更新为前一时刻的故障半径 $r_{p-1}$ 和距离d的平均值,即 $r_p = \frac{1}{2} [d + r_{p-1}]$ ,最后将报警信号清零。

[0027] 所述步骤(11)中,当 $c = 0$ 时,直接进入步骤(12);当 $c = 1$ 时,当前时刻原点 $O_p$ 更新为当前系统特征向量 $T_p$ 和前一时刻系统特征向量 $T_{p-1}$ 的中点,即 $O_k = \frac{1}{2} [t_0^p + t_0^{p-1}, t_1^p + t_1^{p-1}, t_2^p + t_2^{p-1}, \dots, t_{15}^p + t_{15}^{p-1}]$ ,

当前时刻故障半径 $r_p$ 更新为 $T_p$ 和 $T_{p-1}$ 之间的距离,即 $r_p = \sqrt{(t_0^p - t_0^{p-1})^2 + (t_1^p - t_1^{p-1})^2 + \dots + (t_{15}^p - t_{15}^{p-1})^2}$ ,最后令循环计数 $c$ 自增1。

[0028] 所述步骤(12)中,将当前时刻系统特征向量 $T_p$ 、当前时刻原点 $O_p$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ 分别赋值给前一时刻系统特征向量 $T_{p-1}$ 、前一时刻原点 $O_{p-1}$ 和前一时刻故障半径 $r_{p-1}$ ,即: $T_{p-1} = T_p, O_{p-1} = O_p, r_{p-1} = r_p$ ,并返回步骤(2)。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明的程序流程图。

[0030] 图2为小波包分解示意图。

## 具体实施方式

[0031] 下面结合附图对本发明进行进一步说明。

[0032] 如图1所示,一种光伏系统电弧故障检测方法的过程是:

[0033] 步骤(1):系统初始化;

[0034] 步骤(2):采集光伏系统的输出电流;

[0035] 步骤(3):使用db6小波进行4层变换,计算输出电流各频段能量,并取其对数作为频域向量 $F$ ;

[0036] 步骤(4):计算输出电流方差作为时域向量 $V$ ;

[0037] 步骤(5):合并时域向量和频域向量作为当前时刻系统特征向量 $T_p = [F, V]$ ;

[0038] 步骤(6):若系统循环次数 $c < 2$ ,则进入步骤(11),否则进入步骤(7);

[0039] 步骤(7):计算系统当前时刻特征向量 $T_p$ 与前一时刻原点 $Q_{p-1}$ 之间的欧几里得距离 $d$ ;

[0040] 步骤(8):若步骤(7)中计算的距离 $d$ 大于3倍的前一时刻故障半径 $r_{p-1}$ 则进入步骤(9),否则进入步骤(10);

[0041] 步骤(9):故障报警;

[0042] 步骤(10):更新当前时刻原点 $O_p$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,并清除报警信号;

[0043] 步骤(11):计算当前时刻原点 $O_p = [o_0^p, o_1^p, \dots, o_{15}^p]$ 和当前时刻故障半径 $r_p$ ,循环计数变量 $c$ 加1;

[0044] 步骤(12):将当前时刻数据保存为前一时刻数据,并返回步骤(2)。

[0045] 电弧发生后,开关频率附近能量占比降低,开关频率以外频率成分显著增加,同时电弧电流频谱非常宽,单纯使用某一频段能量大小做为故障判别依据容易受到干扰。

[0046] 电弧故障信号为非平稳信号,小波分析相对于传统的傅里叶分析更加适故障检测,图2为小波包分解示意图,其中, $h_0$ 为高通滤波器系数, $h_1$ 为低通滤波器系数,本方法选用db6小波母函数,高通滤波器和低通滤波器系数分别为:

[0047]  $h_0 = [-0.0011 \ 0.0048 \ 0.0006 \ -0.0316 \ 0.0275 \ 0.0975]$

[0048]  $h_1 = [-0.1298 \ -0.2263 \ 0.3153 \ 0.7511 \ 0.4946 \ 0.1115]$

[0049] 根据电弧的特征频段,选择电流的采样频率为200kHz,根据逆变器的开关频率为10-20kHz,确定将原始电流信号分解4层,每个频带宽度为12.5kHz。

[0050] 根据Parseval等式  $\sum_{n=0}^{1023} \mathbf{X}(n) \cdot \mathbf{X}(n) = \sum_{m=0}^{15} \sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i)$ , 信号的时域能量可以用小波系数来表示。基于子频带能量的频域向量  $\mathbf{F} = [e_0, e_1, e_2, \dots, e_{15}]$ , 其中  $e_m = \log\left(\sum_{i=0}^{63} b_m(i) \cdot b_m(i)\right)$ ,  $m \in \{Z, 0 \leq m \leq 15\}$ 。

[0051] 电弧发生后, 电流的幅值在时域表现出更强的随机性, 将电流幅值作为随机变量, 利用方差表征其幅值波动程度, 构成时域向量  $\mathbf{V} = \frac{1}{1024} [\sum_{n=0}^{1023} (\mathbf{X}(n) - \mu)^2]$ , 其中,  $\mu = \frac{1}{1024} [\sum_{n=0}^{1023} \mathbf{X}(n)]$ 。

[0052] 本发明通过小波包分解提取频域特征, 建立基于子频带能量的频域特征向量, 利用方差提取时域统计特征, 建立时域特征向量, 频域特征向量与时域向量一起构成系统特征向量, 利用系统特征向量和原点的距离实现电弧故障检测。

[0053] 系统原点和故障半径在初始随机选择的基础上, 利用逐次取中点和平均值的方法, 逐渐以概率1趋近真实值。

[0054] 上述过程虽然详细说明了本发明的具体实施方式, 但并非对本发明保护范围的限制, 所述领域技术人员应该明白, 在本发明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发明的保护范围以内。

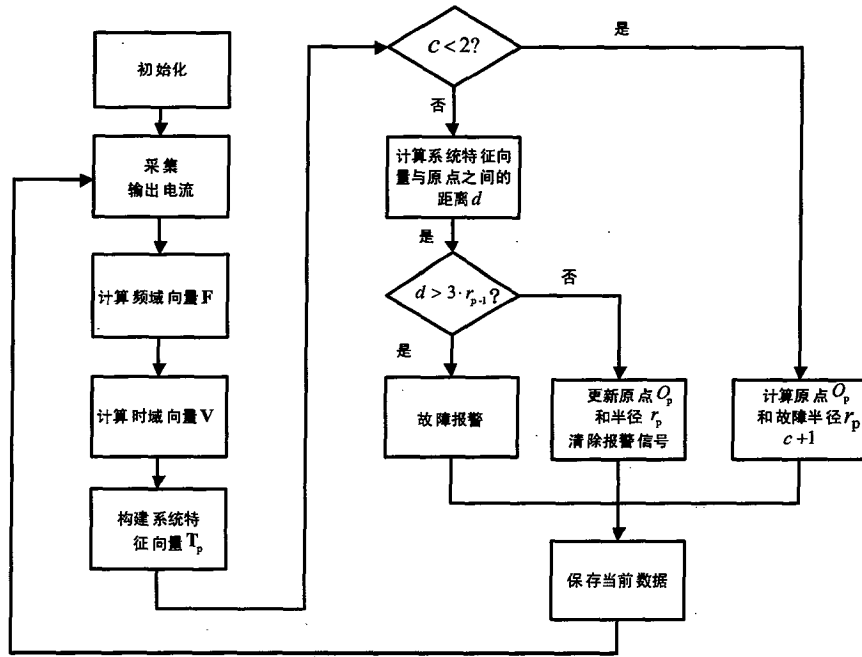


图1

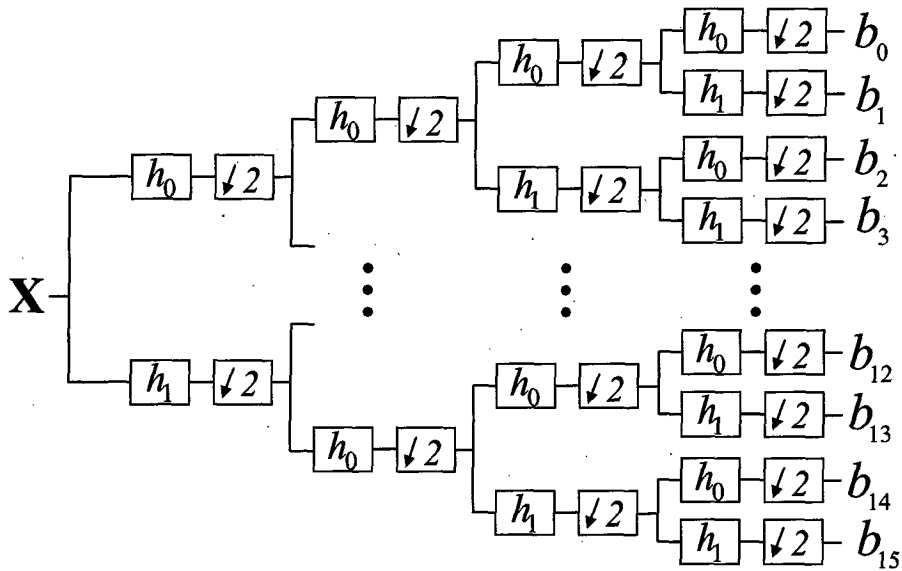


图2