

雷击风力发电机塔筒的电磁干扰分析

程 锐¹ 张新燕¹ 白生忠²

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 中节能风力发电(新疆)有限公司 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为了研究风电机组内电子设备所受到的雷电电磁干扰,采用有限元数值分析软件(ANSYS)对风力发电机的塔筒进行建模,通过对雷击塔筒时产生的电场和磁场进行计算,得到整个风力发电机塔筒部分的电磁场分布规律及各处所产生的磁感应强度;在该计算的基础上,根据法拉第电磁感应方程计算出塔内空间任意回路中的感应电动势,找到了影响其大小的因素,并提出了相应的防护措施。经过分析得到的结论是:雷击塔筒顶部时塔顶和塔底产生的磁场较大;塔筒内空间所产生的磁场强度是由中心向塔筒壁不断增大;塔筒内部空间的导体回路所感应出的电动势大小由距干扰源距离和回路面积决定,其中,面积因素起主导作用。因此,可为塔内电子系统的防雷设计提供依据。

关键词: 雷电; 风力发电机塔筒; 电磁干扰; ANSYS; 电场; 磁场; 防雷设计

Abstract: In order to study the electromagnetic interference on electronic equipment in wind turbine caused by lightning, the modeling of the tower of wind turbine is carried out with the software ANSYS. Through the calculation of electric and magnetic fields when the tower is suffering from the lightning stroke, the distribution of electromagnetic field of the whole wind turbine tower and the strength of magnetic induction in each place are obtained. On the basis of calculation and according to the induced electromotive force in any loops of the tower space calculated by the Faraday's law of electromagnetic induction equation, the factors which affect its size are funded and some corresponding protective measures are put forward. The conclusions are as follow: the magnetic field is larger in both the top and bottom of the tower and the magnetic field intensity generated in the tower increases from the center to the tower wall; the electromotive force induced by conductor loop of the tower internal space are determined by the distance with interference source and the loop area, which can be used as a basis for the lightning protection design of electronic system in the tower.

Key words: lightning; wind generator tower; electromagnetic interference; ANSYS; electric field; magnetic field; lightning protection design

中图分类号: TM153 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0004-05

由于机组的安装地理条件以及建筑结构,增大了其遭受雷击的概率,使得雷电成为影响机组安全运行因素中的一个重要方面。风力发电机塔筒外部的防雷区域属于LPZ0A区,该区内的各物体都可能遭到直接雷击和泄放全部雷电流^[1]。当风力发电机遭受直接雷击时,雷电流将沿塔筒流入大地,在此暂态过程中,由于雷电流具有很高的波头陡度,会在其所流经的路径周边产生很强大的突变电磁场,对发电机磁场、信号线、电力线或者控制系统内部造成严重的电磁干扰。雷电电磁脉冲可能通过空间直接辐射到电子设备,也可能通过对信号线和电源线等金属线路的感应来形成过电流和过电压波侵入电子设备,轻则导致设备工作失灵,重则使设备受到永久

基金项目: 新疆自治区科技厅自然科学基金项目(2011211A016)

性破坏,给风电机组的安全运行构成威胁^[2-4]。因此,有必要对塔筒内雷电产生的电磁干扰进行仿真分析,在风力发电机组安装之前根据计算出的电磁场分布情况将敏感设备安装在电磁干扰相对较弱的地方,或是进行合适的屏蔽措施,从最大程度上降低雷电电磁干扰对机组内部电子设备的危害。

首先简单介绍了塔筒模型的数值算法,然后应用有限元分析软件ANSYS对雷击风力发电机塔筒部分进行建模并计算其产生的电磁场。该方法所得结果较之其他数值计算方法而言,计算量相对要小,易于理解,结果更为直观精确。还使用该方法计算了雷击塔筒时产生的电场和磁场,分析不同因素对塔筒内空间任意回路所产生的感应电动势大小的影响,并提出了相应的保护措施。

1 塔筒数值计算模型简介

雷电流在塔筒传播中是一个波过程,需用分布参数的电路模型来模拟^[5-6]。这里将整个塔筒分割为许多个线元,其中的任一段的等值电路如图1所示的π型结构,每一线元的长度必须小于雷电流所包含的最短波长的十分之一,这样π型电路中的参数就可在准静态条件下计算^[7]。因此,整个塔筒可按此原则离散成一个多节点、多支路的复杂网络。把场的问题变成由电路参数构成的路的问题。

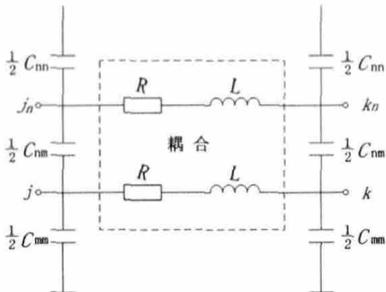


图1 塔筒π型电路结构

在具体计算中,有学者利用暂态等值计算电路原理^[8-9]进行计算,将塔筒上耦合的RL串联支路描述为

$$Ri_{RL} + L \frac{di_{RL}}{dt} = u_j - u_k \quad (1)$$

对式(1)进行转换,并运用梯形积分公式进行积分,得到支路电流的矩阵表达式为

$$i_{RL}(t) = N^{-1} [u_j(t) - u_k(t)] + I_{RL}(t - \Delta t) \quad (2)$$

其中,等值电流源为

$$I_{RL}(t - \Delta t) = 2(N^{-1} - N^{-1}RN^{-1}) [u_j(t - \Delta t) - u_k(t - \Delta t)] + (E - 2N^{-1}R) I_{RL}(t - 2\Delta t) \quad (3)$$

式中, E 是单位阵; u_j 和 u_k 分别表示结点 j 和 k 的电压矩阵。因此,根据式(2)和式(3)将电阻与耦合的电感电路可等效为图2所示的暂态计算电路。

对于耦合电容支路,其暂态过程可以表示为

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (4)$$

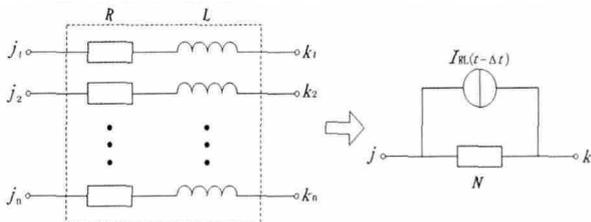


图2 耦合RL支路与等值电路

同样对其运用梯形积分公式,可得电容支路的电流表达式为

$$i_c(t) = R_c^{-1}u_q(t) + I_c(t - \Delta t) \quad (5)$$

同理,根据式(5)可得到耦合电容支路的等效如图3所示。其中, R_c 为耦合电容支路的等值电阻矩阵,电流源的递推形式为

$$I_c(t - \Delta t) = -2R_c^{-1}u_q(t) - I_c(t - 2\Delta t) \quad (6)$$

u_q 表示结点 q 的电压矩阵。

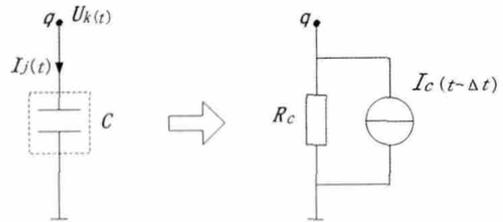


图3 耦合电容支路及等值电路

因此π型电路可以根据上式进行简化,得到等效电阻与等值电流源并联的暂态计算电路。

通过上述方法将所有支路进行变换,将塔筒模型构建成一个等值计算网络,然后分别对节点电压方程和支路电流方程进行计算,之后便可以得到塔筒上每一个点的电压值和每条支路的电流值。虽然这样的求解方法会提高计算机的运算效率,但是,再加之对62 m塔筒空间整体电磁场的计算分析,其计算量会变得很大很复杂。因此,应用ANSYS有限元软件分析对塔筒进行建模、赋值及计算,从而得到整个风机塔筒遭受雷击之后的空间磁场分布。

2 塔筒有限元模型建立

ANSYS软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。有限元分析的基本思路是将问题的求解先离散成若干个子区域。即将实物几何模型划分成为一系列相互连接的单元,各单元之间仅靠节点连接。对单元内部点的求解可以由单元节点量通过选定的函数关系插值得得,然后将各个单元的方程组合成总体的代数方程组,并且加入边界条件后便可以对方程进行求解。因此,网格单元划分越细,计算结果越精确,当然,计算量随之增大,计算时间延长,所需的存储空间越大^[10-11]。ANSYS建模属于实体建模,表1为风力发电机组塔筒相关的物理数据。

表1 塔筒主要参数

名称	参数
塔筒高度/mm	62 000
塔筒上直径/mm	2 583
塔筒下直径/mm	4 200
塔筒壁厚/mm	34
塔筒钢材型号	Q345c
钢材电阻率/(Ω·m)	1.75×10^{-8}
钢材磁导率/(H·m ⁻¹)	500

因为要进行电磁场分析,故该模型创建在 Electromagnetic 下的 Magnetic - Nodal 环境中。模型采用 PLANE13 单元,并且统一规范单位制为 MKS 制。

根据塔筒数据对其进行 3D 建模,如图 4 所示。

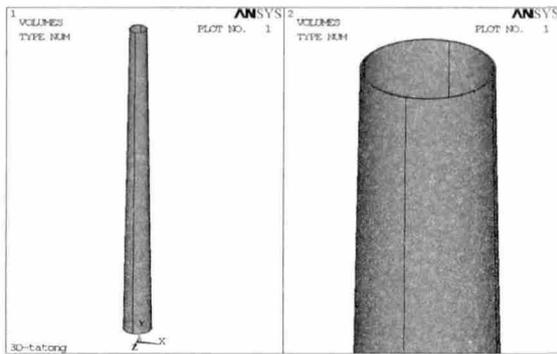


图4 3D 塔筒物理模型

由于塔筒是轴对称圆柱模型,产生的电磁场在任一竖直截面上是相同的,因此在分析时可以选择先对其一个截面及进行建模,之后可以通过旋转得到整体的塔筒模型。这样不仅能得到想要的计算结果,而且还简化了计算量。

对于雷击塔筒的二维建模,应当要考虑加入空气截面,因为需要研究雷击时塔筒内部的空间电磁场分布,故在塔筒截面模型周围,还建立了空气模型。由于模型与实物比例是 1:1,因此建立的塔筒面模型在显示时呈“线”的形状,在对某点进行分析的时候需要局部放大。在对几何模型设置单元属性、赋予材料属性之后,运用 Mesh Tool 工具对模型进行网格划分,因为分析重点在塔筒,因此对塔筒部分网格划分较为细致,空气部分略微稀疏,如图 5 所示。

图 5 中左边的图形是建立了一个塔筒加空气模型后,将面模型旋转 270°后形成的效果。右边则是塔筒和空气面模型局部放大后的结果。从图 5 可以明显看出,塔筒模型网格划分较细,空气部分网格较大,两者间网格由小变大逐渐拟合。对于塔筒模型

边界条件确定,空气模型的边界采用施加的 $A_z = 0$ 边界条件即第一类齐次边界条件,塔筒外沿则设定为磁位沿边界线法线方向变化率为零的第二类齐次边界条件。

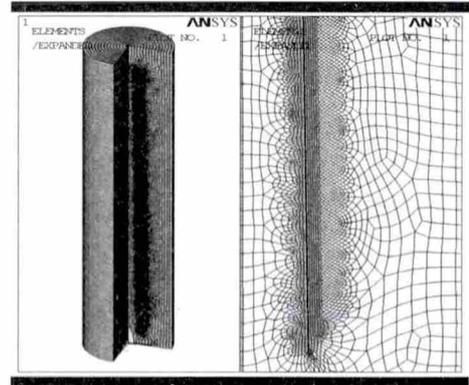


图5 塔筒网格划分

对塔筒模型完成上述条件设定之后,再对塔顶上的节点进行 VOLT 自由度耦合,然后开始从塔顶节点施加幅值为 150 kA 的 2.6/50 μs 雷电流,选择默认求解器 Frontal solver(波前求解器)并在 Transient 模式下采用全波方法(Full)开始进行求解计算。

3 雷击塔筒的电磁场计算与分析

ANSYS 软件以麦克斯韦方程组作为电磁场分析的出发点,为了使问题得到简化,通过定义矢量磁势 A 和标量电势 ∇ 两个量把电场和磁场变量分离开来,分别形成一个独立的电场和磁场的偏微分方程,这样便有利于数值求解^[12]。其中矢量磁势定义为

$$B = \nabla \times A \tag{7}$$

而标量电势定义为

$$E = -\nabla \Phi \tag{8}$$

顺利地计算之后就进入到后处理阶段。用 ANSYS 软件计算出塔筒 60 m 处的磁感应强度的结果,与文献[3]提出用网络偶极子方法计算出的结果进行比较,两者结果如图 6 所示基本一致。

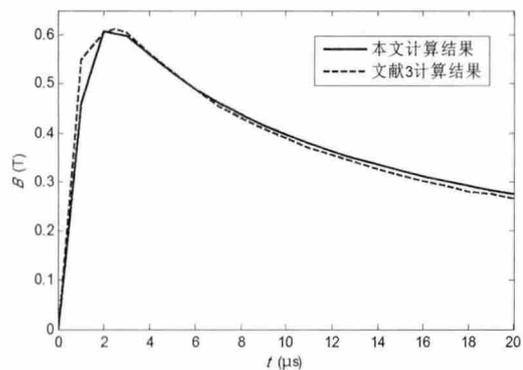


图6 塔筒 60 m 处的磁感应强度

在塔筒上取3个不同位置(塔顶、塔顶下1 m、塔底上1 m)的暂态过程进行计算得到磁感应强度*B*的变化趋势,即塔底的*B*变化较塔顶的要平缓,如图7所示,这与文献[3]得到的结论也是一致的。因此,证明了该模型的正确性。

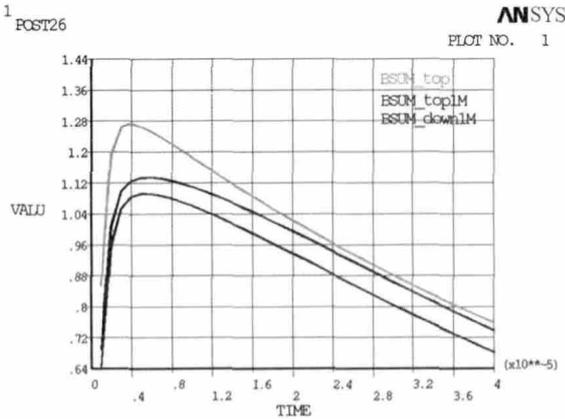


图7 塔筒上不同位置产生的磁感应强度

在证明了该模型的正确性后,取雷击1 μs时刻计算塔筒电场和磁场,其分布如图8所示。

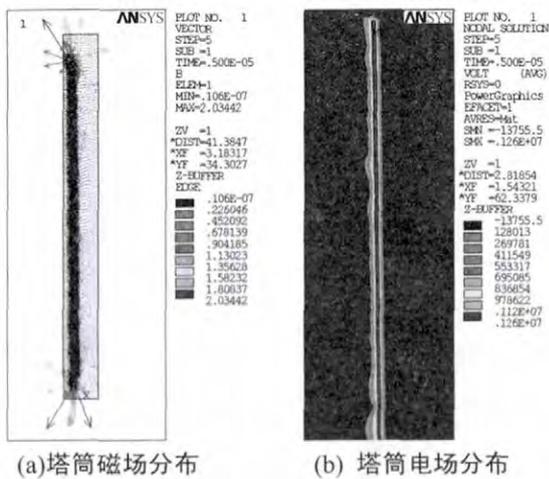


图8 雷击1 μs时刻塔筒电场和磁场分布

图8(a)中反映出塔筒在遭雷击后,底部也会产生较大的磁场。这是因为在泄放雷电流进入地面时,由于强大的脉冲电流使得地电位突然升高,造成地电位反击,又再次形成一个突变电磁脉冲。因此,在塔筒底部的磁感应强度也较大。这个现象在图7中得到了反映,塔筒顶部和底部最大的磁感应强度相差仅为0.2 T。从图8(b)中可以很直观地看到雷击塔筒后的电场分布,塔筒顶部电场值最高,达到 0.404×10^7 V。该模型通过计算还能得到雷击过程中塔筒内部磁力线的分布,如图9所示。

该组图形可以反映出0~20 μs这一暂态过程中塔筒内部空间磁场变化的趋势:塔顶周围磁场不

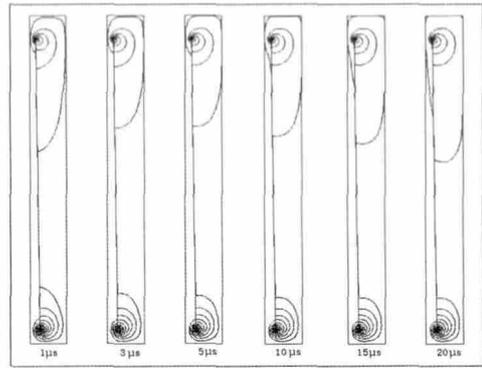


图9 雷击暂态过程中塔筒周围磁力线变化图
断向外扩散且磁力线变稀疏,表明磁场强度也在减小,而塔底周围磁场分布及大小变化较小。

对塔筒模型横向从中心轴线到塔筒外壁空气部分,纵向从塔筒3.7 m到5.2 m的截面进行路径定义并计算,结果如图10所示。

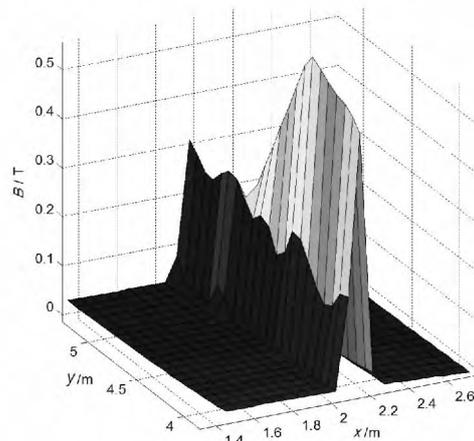


图10 3.7~5.3 m塔筒壁截面磁感应强度

从图10中可以看出,塔筒空间中心处的磁感应强度向塔筒壁方向逐渐增大;且由于上升时间很快的雷电流含有丰富的高频分量,使得整个塔身产生趋肤效应,故塔筒外壁比塔筒内壁的磁感应强度要大。

4 塔筒内部回路产生电磁干扰大小因素的分析

由于塔筒内部安装有大量的电子设备,布置着各种电源线路和信号线路,这些线路会在不同空间位置构成不同面积大小的回路。在雷击塔筒时,会对塔筒内电子器件造成巨大电磁干扰,感应出较大的感应电压,从而在回路上产生一个幅值很大的电流,并沿着信号线或电源通道进入到终端的控制设备和电源设备中,导致设备发生误动或者造成毁坏^[13-14]。因此,需要对决定感应电动势产生大小的

因素进行分析。

在塔筒内选取空间点 $P_1(0, 3, 0)$ 和点 $P_2(1.5, 3, 0)$ 在 P_1 上取 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 回路1和 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 回路2, 在 P_2 上取 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 回路3, 如图11所示。

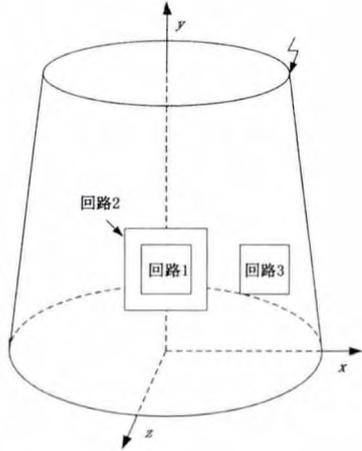


图11 塔筒内部回路

根据法拉第电磁感应原理, 雷击塔筒时, 突变的雷电脉冲磁场对塔筒内部金属回路上产生的感应电压为

$$u = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d \int_s B \cdot ds}{dt} \quad (9)$$

使用数值方法计算回路的感应电压, 首先要将该回路的面积分成 N 个单元, 每一个单元的面积是 $\Delta S_k (k=1, 2, 3, \dots, N)$ 并且认为每个单元的磁场强度都是均匀的, 其值等于该单元中点处的磁场强度。因此, 在对每个单元的磁场强度进行求解之后, 任一时刻下的回路磁通量可以表示为

$$\Phi(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N \Delta S_k B_k(i\Delta t) \cos\theta_k \quad (i=1, 2, 3, \dots, j_{\max}) \quad (10)$$

其中 j 为计算步长。然后分别计算各回路内感应的暂态电动势, 结果如图12和表2所示。

表2 不同空间回路所产生的感应电动势峰值

空间回路	回路面积 /m ²	回路中心点距塔筒内壁距离/m	感应电压峰值 /kV
回路1	0.09	2.1	1.586
回路2	0.25	2.1	4.405
回路3	0.09	0.7	1.976

由以上计算结果可以看出, 面积相同的两个回路距干扰源相差 1.4 m , 两者感应电动势相差 600 V , 同一位置的两个回路, 其中回路2边长仅增加 0.2 m , 则感应电动势增加近原来的3倍。因此塔筒空间内任

意回路产生感应的暂态电动势不仅由距干扰源远近决定, 还由回路面积决定, 并且面积因素大于距离因素。

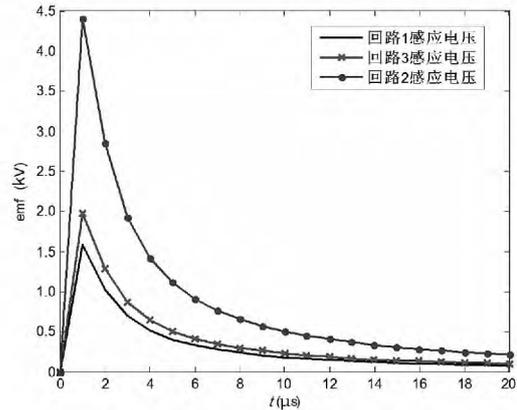


图12 各回路的感应电动势

5 结论

对于塔筒的数值建模有学者提出过不同的方法, 比如将塔筒模型简化为传输线模型, 或是等效为一个耦合的电网络等, 这些方法虽然较之以前的数值算法要容易一些, 但是要分析雷击塔筒时整个空间电磁场的分布, 还需要对空间电磁场的计算分析, 其计算量就会变得很大。而用 ANSYS 软件对雷击风电机组塔筒的建模、仿真和分析, 不仅简化了复杂的数值计算, 而且易于理解, 其结果更是直观精确。通过以上的仿真计算得到如下结论。

(1) 雷击塔筒时塔顶和塔底产生的电场和磁场较大, 但是两者的最大值还是在塔顶雷击处, 其中电压高达 3.644 MV , 磁感应强度达 1.192 T 。

(2) 雷击时塔筒空间中心产生的磁感应强度最小, 越靠近塔筒壁磁感应强度越大, 而且由于塔筒的趋肤效应使得塔筒外壁比塔筒内壁的磁感应强度要大。

(3) 由于雷击塔筒后会有地电位反击的现象出现, 导致塔筒底部的磁感应强度较大, 故塔底电子设备在安装时可以选择偏上的位置。

(4) 塔筒内部空间回路在突变电磁场环境下, 产生的感应过电压大小, 主要由距离因素和回路面积因素决定, 且面积因素大于距离因素。

参考文献

[1] IEC TR 61400224. Wind Turbine Generator System, part 24: Lightning Protection [S].

(下转第42页)

实验结果如表4所示。

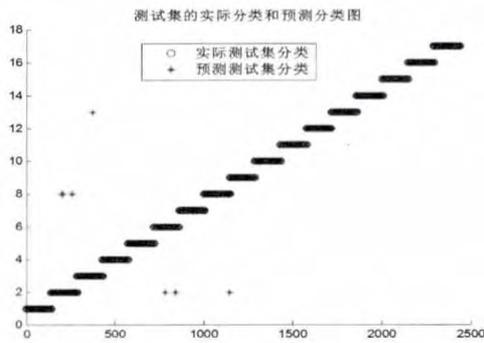


图4 最优参数设置下的测试集实际分类和预测分类图

从表4中可以看出,从平均评估正确率上看,SPREAD值为1的时候分类性能最好且稳定,SPREAD值为10的时候次之,SPREAD值为30的分类性能最差。从运行时间上看,SPREAD值为1的时候分类速度最快。因此SPREAD值为1的概率神经网络比其他的推广性要好。所以本实验表明SPREAD值为1的概率神经网络应用于母线故障识别最理想。在最优参数设置下,运行仿真程序,可以得到测试集实际分类和预测分类图,如图4所示。由图可知,外部三相短路有3个样本被分为外部BC相接地短路,2个样本分为外部AB相间短路;内部AB相短路有1个样本被分为了内部三相短路,有2个样本被分为了内部三相短路;内部CA相间短路有3个样本被分为了内部三相短路;外部AB接地短路有2个样本被分为了外部三相短路。根据每一类的识别情况表可以知道,利用概率神经网络来识别母线故障状态,具有很高的正判率。能100%区分母线区内外故障,能很好地识别母线到底处于哪一种运行状态。

4 结论

所提出的将概率神经网络方法用于母线故障状态识别有很高的评估正确率和较好的稳定性,评估正确率高,速度快。概率神经网络的应用研究虽然在母线故障状态识别中取得较好结果,但概率神经网络也有一些问题需要进一步深入研究,如概率神经网络的性能依赖于SPREAD值的选择,如何选择合适的SPREAD值及相关参数来满足其对分类结果影响值得探讨。同时概率神经网络评估训练和测试速度有时较慢,还需进一步研究改进算法以适应母线运行状态的实时性要求。

参考文献

- [1] 詹红霞. 基于神经网络的母线保护方法的研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25(5): 54-56.
- [2] 董秀成, 韩涵. 基于神经网络模型的母线保护故障定位研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 1-8.
- [3] 萧彦, 赵自刚. 微机型母线保护应用中的几个问题[J]. 华北电力技术, 2005(4): 28-31.
- [4] 银涛. 基于概率神经网络的变压器故障诊断的研究[J]. 电气应用, 2006, 25(10): 15-17.
- [5] 王豪, 郑恩让. 概率神经网络在电机故障诊断中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(8): 59-62.
- [6] MATLAB中文论坛. MATLAB神经网络30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

(收稿日期: 2013-06-20)

(上接第8页)

- [2] Stander RB. Protection of electronic circuits from over voltages[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [3] 王晓辉, 张小青. 风电机组内电子设备的雷电电磁干扰分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2019-2022.
- [4] 李景禄. 电力系统电磁兼容技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 1-3.
- [5] 赵海翔, 王晓蓉. 雷击引起风电场的地电位升高问题[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 13-15.
- [6] Cho ma J. Electrical Networks—Theory and Analysis[M]. New York, USA: Wiley, 1985.
- [7] 周佩白. 电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 213-215.
- [8] Dommel H W 著, 李永庄, 林集明, 曾昭华译. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [9] 赵海翔, 王晓蓉. 风电机组的雷击过电压分析[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 27-29.
- [10] 何山, 王维庆, 张新燕, 等. 基于有限元方法的大型永

- 磁直驱同步风力发电机电磁场计算[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 157-161.
- [11] 张彦立, 王广庆, 李曼. 基于VB和ANSYS的风机塔筒参数化建模与分析[J]. 机电工程, 2012, 29(2): 174-176.
- [12] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海荣. ANSYS10.0电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1-3.
- [13] 张小青, 陈水明. 直接雷击时高层建筑物内暂态磁场的计算[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 40-43.
- [14] Buccella C, Orlandi A. An Efficient Technique for the Evaluation of Lightning Induced Voltage in a Cylindrical Vessel Containing Charged Oil[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 368-373.

作者简介:

程锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2013-07-01)