

振动分析在电力设备状态检测中的应用和发展

孟永鹏¹, 钟波², 贾申利¹

(1. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 陕西师范大学, 陕西 西安 710061)

Application and Development of the Vibration Analysis in the Condition Monitoring of Electrical Equipment

MENG Yong-peng¹, ZHONG Bo², JIA Shen-li¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Normal University, Xi'an 710061, China)

摘要: 综述了振动分析技术在电力设备状态检测中的应用及其研究现状,包括发电机、感应电动机、变压器和断路器。评述了基于振动信号分析的电力设备状态检测、故障诊断的主要研究方法,同时指出小波理论和神经网络在发展新的状态检测技术中具有非常重要的作用。

关键词: 振动分析; 电力设备; 状态检测; 故障诊断

中图分类号: TM507

文献标识码: A

Abstract: A survey of the application and the research status of the vibration analysis in the condition monitoring of electrical equipment is presented in this paper, including power generators, inductor motors, power transformers and circuit breakers. The main research methods of the condition monitoring and fault diagnosis for electrical equipment based on the vibration analysis are commented, meanwhile artificial neural network and wavelet theory are very important for the development of new condition monitoring techniques.

Key words: vibration analysis; electrical equipment; condition monitoring; fault diagnosis

1 引言

电网中电力设备的运行状态对系统的安全运行异常重要。以往国内都采用离线例行试验与操作对电气设备进行定期检修,这种计划性的预防检修盲目性大,频繁的操作及过度的拆卸检修会降低电气设备工作的可靠性。近年来,状态检测技术得到电力设备制造商和应用部门的广泛重视。状态检修可给现场工作人员提供实时的设备运行信息,预测可能发生的故障,从而协助工程师做出最优的维护方案。

振动分析是一种体外检测的手段,通过安装在设备表面的一个或多个振动传感器获取设备运行过

程中的振动信号,提取时域或频域的特征信息,然后采用一定的故障诊断方法评估设备的工作状态。随着信号处理技术的不断发展,可以从振动信号中提取越来越丰富的设备运行的状态特征信息。此外,振动传感器尺寸小、重量轻、安装方便、工作可靠且价格低廉,非常适合在线检测或户外临时性检测的场合。利用振动分析对发电机和感应电动机等大型旋转设备进行故障诊断,国内外已有大量的研究成果和应用实例。近十年来,振动分析技术在电力变压器和断路器的状态检测中也得到了不断的研究。目前,振动分析在这两种电力设备中的应用尚处于探索阶段,但国内外学者普遍认为振动分析是极具潜力的一种新的研究思路^[1],笔者重点介绍了这两个领域中涉及的一些热点问题以及现有的分析方法。

2 发电机和感应电动机的振动检测

电力系统中的发电机和感应电动机都属于大型旋转设备。这类设备的共同特点是:具有高速运行的精密转子,自动化程度和结构复杂程度都很高,系统各个部分的关联也非常密切。电力系统中由于发电机和感应电动机机械故障造成的恶性事故频频发生,因此不断提高其状态检测水平已经成为国内外共同关注的问题。

一直以来,振动检测都是发电机和感应电动机状态检测的主要手段,通过分析转子的振动信号来获取设备的诊断信息。这主要是因为转子是该类设备中的重要部件,其制造成本很高,因此在状态检测中成为首要的对象;其次是因为设备的许多故障都会在转子的运行状态变化中表现出来。实际的转子振动信号十分复杂,主要表现为转子的轴向窜动,径

收稿日期:2005-08-12

作者简介:孟永鹏(1976-)男,陕西人,博士研究生,主要研究方向为电器设备状态检测与故障诊断技术。

向跳动和扭转振动^[2]。这几种振动往往同时存在,因此需要采用不同的振动传感器分别测量。前两种运动属于线性振动,对它们的检测采用一般的加速度传感器既可,而对于扭转振动,一般是通过测量转子转速的波动来获得的,因此属于振动速度的测量。此外,用振动分析对感应电动机定子绕组故障、气隙不均匀和电压扰动等进行检测,近年来也有相关报道^[3]。

从旋转机械的故障诊断提出以来,相应的振动信号分析方法就不断日新月异。综合目前已有的文献报道,主要的分析技术包括:①振动信号的滤波和降噪;②瞬态分析(瀑布图、波特图、Nyquist图、阶次图等);③时域分析(包络分析、相关分析、统计分析、轴心轨迹分析等);④基于傅立叶变换的频域分析(幅值谱、功率谱、细化谱、包络谱、倒谱等);⑤时频分析(短时傅立叶,Wigner,Gabor变换等);⑥振动信号的AR模型分析。

时频分析和小波理论的发展进一步提高了旋转设备故障诊断的技术水平。尤其是小波变换在信号的时间-尺度特征分析、特征量提取、奇异性检测和降噪滤波方面的强大能力,使得它在旋转机械故障诊断领域的应用得到了迅猛发展。文[4]将Laplace小波用于大型水轮机模态参数的识别,取得了理想的效果;通过计算小波变换的奇异性指数,并以此作为信号包络的特征识别指标。关于小波变换在旋转机械故障诊断方面的应用,文[5]给出了很好的总结。此外,其它新方法新理论也在不断地引入,如信号盲源分离、分形、混沌等。在故障诊断和决策方面,统计分析、聚类分析、神经网络、信息融合、模糊理论等方法也得到不断的应用和发展。近年来又有学者提出基于支持向量机、贝叶斯网络等智能诊断概念,进一步提高了检测系统的适应能力。

3 变压器的振动检测

3.1 绕组和铁心的振动检测

绕组和铁心故障是变压器中最常见的故障^[6]。电力变压器在稳定运行时,硅钢片的磁致伸缩引起铁心振动,绕组在负载电流电场力作用下也会产生振动。变压器表面的振动与变压器绕组及铁心的压紧状况、位移及变形状态密切相关,因此可以通过在线检测电力变压器油箱表面的振动来监测其绕组和铁心的工作状态。

从20世纪80年代中期开始,美国、俄罗斯和加拿大等几个国家在试验室中对利用振动信号检测绕组及铁心的状态进行了初步研究。主要是在变压器离线的状况下,在高压侧分别加低压激励信号和工频的正弦信号,然后测量变压器表面的振动信号。国外的研究工作主要集中在以下几个方面^[7]:①振动信号大小与负载电流之间的关系;②考虑负载电流、

温度以及振动信号等参数对变压器的建模;③正常运行时,仅考虑负载电流及振动信号对变压器的建模;④对振动信号参数(有效值、频谱幅值等)的变化趋势进行研究;⑤振动传感器的最佳安装位置。

上述工作基本是在离线的情况下进行的,重点放在考虑振动信号时如何对变压器建立模型,而将这种方法用于在线检测时应考虑的问题还没有涉及到。20世纪90年代中后期,Chris K等人提出了通过检测变压器油箱表面振动信号来分析判断绕组和铁心状况的设想^[8]。但到目前为止,变压器绕组和铁心的振动检测在国际上仅俄罗斯刚刚进入实用阶段,所开发的系统已经在60多台大型变压器上使用。现场结果也证实了这种方法适用于多种型号的变压器,故障诊断准确率达80%~90%。不足之处在于未对绕组和铁心振动的物理特性进行充分的研究,如绕组振动与绕组压紧状况之间的关系、铁心振动的起因及影响因素、空载电压大小对铁心振动的影响、油箱表面不同相处振动信号的异同等,因此分析判断还需要较丰富的运行经验。此外,振动信号的分析方法也局限于通过傅立叶变换求取频谱,在形式上过于简单。

国内在这方面起步较晚,主要工作还处于实验室研究阶段。文[9]通过建立绕组振动的数学模型,对绕组振动和铁心压紧状况之间的关系进行了深入的研究。针对铁心的振动起因,研究了磁致伸缩及其影响因素。所采用的试验方法是:在不同的空载电压下对铁心的振动情况进行测试,研究空载电压大小与铁心振动之间的对应关系以及不同状态下油箱表面各相铁心振动信号的异同。试验发现:运行正常的变压器和发生绕组或铁心故障的变压器,其表面振动信号有很大的不同。但仅从振动信号时域的变化,很难形成确定的判据来衡量变压器发生故障程度的大小,因此将小波包时频分解应用到振动信号的处理过程,从而得到振动信号的能量特征矢量,用该特征矢量作为判断铁心是否存在故障的重要依据。此外,还对不同负载电流下的变压器表面振动信号进行了测量,通过拟合负载电流和振动信号基频成分的关系曲线,得到了一种不需空载运行就能取得铁心振动信号基频成分的负载电流法。实验室模拟试验证明了这种方法的有效性。

3.2 有载分接开关的振动检测

有载分接开关(OLTC)是变压器中唯一的运动部件。统计分析表明,OLTC异常是造成变压器运行故障的另一个主要原因^[10]。OLTC的切换操作包含一系列的机械动作事件。典型事件(如触头的碰撞)所产生的振动信号,不仅能标志触头的分合,还可能包含三相触头是否同期、触头表面是否平整、切换是否到位及操作部件卡塞等状态信息。国外相关的检

测装置和现场运行情况已有文献报道。国内的一些变压器在线检测装置中也逐步加入了振动传感器,但无论在国内还是国外,有关 OLTC 工作状态对振动信号细节的影响,目前都还在研究之中。

文[11]对正常状态下 OLTC 的振动信号进行包络分析,然后提取大量试验下的平均值作为状态检测的标准。在故障状态下,通过比较振动信号包络之间的差异来判断 OLTC 是否正常。为了便于比较,这种方法首先要将不同状态下的包络信号在时间轴上准确对齐。实际上由于现场获取的信号中总是存在大量的随机噪声,使得这种方法的应用受到很大限制。文[12]将事件起始时间和形态分析用于 OLTC 的状态检测,通过比较振动事件发生时刻和幅度的变化来判断 OLTC 状态,取得了很好的效果,但目前还没有在现场应用的报道。

文 [13] 在 Bengtsson C 等人的基础上对 OLTC 状态的智能识别作了大量研究工作。首先应用小波多尺度分析对振动信号的包络进行平滑处理,然后求取各种状态下信号包络的自相关函数作为状态特征量,用状态特征量去训练自组织映射神经网络(SOM)作为故障诊断的依据。在设备运行状态下,计算出振动信号的最小量化误差(定义为 SOM 的所有权值向量(w_i)和振动信号包络的自相关函数(r_{xx})之间的最小欧氏距离),通过和正常值的比较来判断 OLTC 的运行状态。

Kang P 等人在此基础上开发了一套基于振动分析的 OLTC 在线检测系统。采用在 PC 机上的分析软件,可以对突发的和缓变的 OLTC 故障进行准确地识别。该系统目前已经安装在多个变电站中 11/33 kV 的变压器上,应用结果表明,该系统能够正确反映 OLTC 的运行状态,如触头老化、弹簧失效和部件松动等。

近年来,文[14]又研究了连续小波变换(CWT)在 OLTC 状态识别中的应用。由于 CWT 具有良好的时域多尺度细化特性,因此可以从振动信号中提取更加丰富的局部特征信息。现场运行结果表明,CWT 方法不仅能够对突发的 OLTC 故障作出正确的判断,还能对 OLTC 的劣化程度和剩余寿命做出正确的评估,由此可制定出合理的维护计划。

4 断路器的振动检测

根据国内外高压断路器的运行实践统计,在断路器事故中,属于机械原因造成的故障占首位^[15]。其中,机构拒分、拒合和误动 3 类占了绝大多数。因此,提高断路器机械故障的检测手段,对提前发现潜在隐患具有十分重要的意义。

利用操作过程中的机械振动信号对高压断路器进行故障诊断具有良好的应用前景。但由于机械振

动信号在操作过程中才能获得,因此信号的数量明显不足,这对信号处理的方法和准确度都提出了苛刻的要求。几乎所有针对断路器振动信号的研究都集中于振动信号的分析 and 处理上。20 世纪 90 年代以来,国外在这方面作了较多的研究工作,迄今为止已经确定了一些较为实用的振动信号处理方法,主要集中在两个方面。

(1) 在信号的产生、传播及特性分析方面,文[15]进行了大量的试验研究及现场数据分析。研究了断路器机械振动检测的一些基础问题,如加速度传感器的安装,测量点的选择和振动信号的重复性等,并采用动态时间规整(DTW)技术实现对断路器的故障诊断。在此基础上,开发出针对高压断路器的振动分析系统,现场已经应用到 145 kV SF₆ 断路器的状态检测上,可以对操动机构润滑不良、曲柄安装位置不当、动触头绝缘杆长度不当等常见故障作出正确的判断。结合触头行程和线圈电流等参数,还能够对断路器机械状态实现综合评估。

(2) 在特征量提取方面,美国纽约州立大学的一个研究小组提出了一种辨识振动信号特征的方法。通过测量断路器正常状态与待检测状态下的若干组数据,计算单一参数 RR 作为状态识别的特征量^[16]。该研究小组采用的主要信号处理技术包括:①短时谱分析;②修正谱分析;③修正结构;④事件发生时刻;⑤包络分析;⑥形态分析。在此基础上研制出一套便携式断路器振动信号检测系统(PCPDS)。文[16]表明:该系统已经应用在 115 kV 及以上的油断路器和 SF₆ 断路器上,能成功识别出拐臂缩短、弹簧压缩过度、触头磨损及缓冲器失效等机械故障。

近几年来,国外一些研究机构开始在理论上探讨检测断路器机械振动信号和断路器机械状态之间的对应关系。一些新的信号处理方法在这个领域中也得到了广泛的应用。文[17]将小波分析和神经网络应用到断路器的振动分析上,通过选择合适的小波函数提取代表断路器不同状态的特征向量,然后作为 BP 神经网络的输入,从而实现对不同故障类型的识别。该方法被用在 66 kV 油断路器的状态检测上,结果表明状态识别正确率达到了 100%,明显高于传统傅立叶分析和单个神经网络的识别结果。

目前,国内基于机械振动信号的断路器状态检测和故障诊断还处于探索阶段,主要的研究内容集中在振动信号的获取、振动信号处理方法以及诊断专家系统的开发。20 世纪 80 年代和 90 年代,清华大学电机工程与应用电子技术系对断路器机械振动信号有过初步的研究并取得了一定的成果。在对断路器振动信号进行试验研究的基础上,将振动分析应用到高压断路器的在线状态检测中,同时研制出相应的状态检测装置^[18]。此外,对断路器振动信号

的分析方法有过细致的研究,提出了一些实用的算法,主要包括:

(1)用幅值法和互相关法提取不同振动事件的出现时间,根据每个振动事件出现时间的变化来判断断路器的机械状态,此外还可求出各个振动信号的幅值或能量。该方法计算量小,物理意义明确。

(2)应用 Wigner 分布对振动信号进行联合时频分析,这种分析比传统的傅立叶分析更能合理地描述断路器振动信号的时频特性。缺点是计算量大,在特征量的确定上也有一定困难。

(3)将振动信号用一组有时延的指数衰减振荡模型描述。通过曲线拟合确定各频率分量的4个特征量(幅值、衰减指数、角频率和起始时刻),用以和正常时的信号参数进行比较。研究发现,当信号中存在较大的随机噪声时,该方法的计算准确度受到了很大限制。后来又又在数学分析的基础上,对上述模型方法进行了改进,提出了带有奇异值分解(SVD)的 Prony 方法,在一定程度上提高了抑制噪声的能力。

(4)研究了断路器操作过程中振动信号的传播过程,提出了用信号相频特性描述振动波传播过程的方法。并通过与振动信号对应的解析信号的相频特性分析,得到了一种识别在时间上相互混叠的振动事件的方法。

高压断路器机械故障的出现不仅会引起振动事件的时移,而且还会引起时域波形中一些波峰形态的变化。文[19]提出了基于小波奇异性指数的故障诊断方法,能很好地描述断路器振动信号在分合闸时的时频特性,即:求取振动信号包络的奇异性指数来刻画信号的局部特征,根据该指数的变化程度判断发生故障的类型。同时,将模糊化的小波奇异性指数与多层前馈式神经网络相结合得到一种新的故障诊断方法—模糊奇异性神经网络。试验证明,该方法可以达到90%的故障诊断正确率,很好地改善了故障诊断过程中出现的判别不准确和不确定性。

西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室在最近几年也展开了这方面的研究工作^[20]。针对断路器操作振动信号的特点,研究了几种实用的振动信号处理方法,来对断路器振动信号进行特征量提取。这些方法分别是:

(1)基于数学中向量间欧氏距离概念的欧氏距离法。该方法实现简单,运算量小。

(2)积分参数法。能够有效地将振动信号中细微的变化反映出来,同时较好地消除了同种状态多次测量的分散性,能够用多个参数组合表达振动信号的特点。

(3)信号熵法。基于信息论中熵的概念,通过计算振动信号的信号熵,对不同状态下的振动信号进行定量描述。

(4)短时能量法。短时能量法的优点在于有效消除了噪声信号的影响,可以从现场复杂的电磁环境中提取出振动事件的起始时间,提高事件时间的分辨率。试验中将该方法应用于真空断路器的合闸振动信号分析,准确得到了负载下三相触头的关合时刻,从而计算出不同机械状态下的合闸同期性与合闸时间等状态参数^[21]。

(5)基于小波包原理,将断路器操作振动信号分解到独立的频带内,不同频带内信号能量的变化反映了断路器机械运行状态的改变。提取主要的频带能量作为断路器状态监测的特征向量,并根据试验结果确定了不同状态下能量特征向量的变化范围,从而实现了不同断路器状态的简单分类。重复试验表明该方法具有较高的状态检测准确率^[22]。

(6)以各种信号分析方法得出的特征量为依据,研究了人工神经网络在断路器状态识别中的应用。提出了一种改进的 RBF 神经网络,该网络不仅能对已知的状态进行识别,而且能通过神经网络的自我学习能力,对新的状态进行识别,从而大大提高了检测系统的识别能力^[23]。

上述振动信号的分析方法及相关试验都是在实验室中完成的,而且大多在离线的情况下模拟了断路器的不同状态。断路器在负载操作时,机构特性必然会受到触头间电动力的影响。对于短路开断下电动力对振动信号的影响,目前还缺乏相关的实验分析。为了将振动分析方法更好地推广到在线应用的场合,应该在今后加强这方面的研究工作,尽可能多地获取断路器的现场数据加以分析对比,才能不断提高这些方法的实用性。另外,对于断路器机械状态和特征量之间的对应关系,一直是断路器状态检测中普遍存在的难点,在今后的研究中也应该引起足够的重视。

5 结语

(1)提取合适的特征参量始终是电力设备振动分析面临的首要问题。小波变换可以将信号分解到时间-尺度域,具有时频局部化分析的优良性能,非常适合非平稳信号分析。因此成为各种电力设备振动信号分析的常用方法。

(2)变压器有载分接开关和断路器中的振动都是瞬态的非平稳信号,因此旋转设备中的很多方法不能直接套用,在一定程度上也限制了振动分析在这两个领域的应用和发展,今后的研究重点仍然是寻找合适的信号处理方法。

(3)在故障诊断方面,人工神经网络由于其强大的自学能力和并行处理能力得到了广泛应用。然而就其在变压器和断路器状态检测领域而言,缺乏大量的设备状态样本是制约神经网络实用化的主要

因素,因此需要寻找更好的网络训练方法。

参考文献:

- [1] Han Y, Song Y H. Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment-A Literature Survey [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(1): 4-13.
- [2] 杜远. 机电设备相关滤波诊断方法与远程监测技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [3] Argat Siddique, Yadava G S, Bhim Singh. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20(1): 106-114.
- [4] 晔艳阳. 基于非平稳信号特征提取原理的实用诊断技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [5] 何正嘉. 我国小波应用技术的现状和进展[J]. 振动工程学报, 2002, 13(s): 16-22.
- [6] 王世山, 汲胜昌, 李彦明. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器, 2002, 39(s): 73-76.
- [7] Lavallo G C. Failure Detection in Transformer Using Vibration Analysis[D]. USA: MIT, 1986.
- [8] Chris K, Mechefske. Correlating Power Transformer Tank Vibration Characteristics to Winding Looseness [J]. Insight, 1995, 37(8): 599-604.
- [9] 汲胜昌. 变压器绕组与铁心振动特性及其在故障监测中的应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [10] 吴昊, 刘庆时, 刘卫东, 等. 调压变压器有载分接开关机械性能的在线检测[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 18-20
- [11] Bengtsson C. Status and Trend in Transformer Monitoring[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1379-1384.
- [12] Wright S E, Bushby J P. Time Domain Diagnostic Techniques Applied to A Transformer Load Tap-changer[A]. 32nd University Power Engineering Conference, UPEC'97[C]. Manchester, UK, 1997: 253-255.
- [13] Kang P, Birtwhistle D. Condition Monitoring of Power Transformer On-load Tap-changers-Part1: Automatic condition diagnostics [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(4): 301-306.
- [14] Kang P, Birtwhistle D. Condition Assessment of Power Transformer Onload Tap Changers Using Wavelet Analysis and Self-organizing Map: Field Evaluation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(1): 78-84.
- [15] Runde M M, Ottesen G E, Skyberg B, et al. Vibration Analysis for Diagnostic Testing of Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 1816-1823.
- [16] Lai M, Park S Y, Lin C C, et al. Mechanical Failure Detection of Circuit Breaker [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(4): 1724-1728.
- [17] Dennis S S Lee, Brian J Lithgow, Rob E Morrison. New Diagnosis of Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(2): 454-459.
- [18] 徐力新. 断路器操做振动非平稳信号分析方法的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1992.
- [19] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70.
- [20] 杨武. 高压断路器机构动力学特性及关键状态参数在线检测方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [21] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 短时能量端点检测法在断路器状态监测中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(10): 1013-1017.
- [22] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 小波包频带能量分解在断路器机械状态监测中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1301-1305.
- [23] MENG yong-peng, JIA Shen-li, RONG Ming-zhe. Mechanical Condition Monitoring of Vacuum Circuit Breakers Using Artificial Neural Network [J]. IEICE Trans. on Electronics, 2005, E88-C(8): 1652-1658.
- (上接第460页)
- Withstand Voltage by Roughening the Surface of an Insulating Spacer Used in Vacuum [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 2003, 10(4): 550-556.
- [12] Hatfield L L, Boerwinkle E R. Methods of Increasing the Surface Flashover Potential in Vacuum[J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1989, 24(6): 985-990.
- [13] Jackson G L, Hatfield L L, Kristiansen M, et al. Pulse Flashover of Solid Dielectrics in Vacuum [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1983, 18(3): 310-314.
- [14] Hatfield L L, Leiker G R, Kristiansen M. A Treatment which Inhibits Surface Flashover in Vacuum [A]. Proc. XIIIth Int. Sym. Disch. Electr. Insul. Vac.[C], Israel, 1986: 79-83.
- [15] Craig Miller H. Flashover of Insulation in Vacuum: Review of the Phenomena and Techniques to Improve Hold off Voltage [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1993, 28(4): 512-527.
- [16] Wetzler J M, Wouters P A A F. HV Design of Vacuum Components[J]. IEEE Trans. DEI, 1995, 24(2): 202-209.
- [17] Yamamoto O, Hara T, Nakae T, et al. Effects of Spark Conditioning, Insulator Angle and Length on Surface Flashover in Vacuum [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1989, 24(6): 991-994.
- [18] Pillai A S, Hackam R. Surface Flashover of Conical Insulators in Vacuum[J]. J Appl. Phys. 1984, 56(5): 1374-1381.
- [19] Korzekwa R, Krompholz H G, Lehr F M, et al. The Influence of Magnetic Fields on Dielectric Surface Flashover [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1991, 38(4): 745-749.
- [20] Hatfield L L, Leiker G R. A Treatment which Improves Surface Withstand Voltage in Vacuum [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1988, 23(1): 57-61.
- [21] Pillai S, Hackam R. Surface Flashover of Solid Insulators in Atmosphere Air and in Vacuum [J]. J. Appl. Phys., 1985, 58(1): 146-153.
- [22] Nunnally W C, Allen C. Investigation of Vacuum Insulator Surface Dielectric Strength with Nanosecond Pulses [A]. 14th IEEE International Pulsed Power Conference [C], 2003(1): 301-304.
- [23] Sampayan S E, Krogh P A. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 334-339.