

高压变频电源作用下的油纸绝缘局部放电特性

孙振权, 顾朝敏, 赵学风, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为研究直流输电电压下的油纸绝缘特性,设计并搭建了交流变频高压试验电源系统,并设计制作了典型的油纸绝缘局部放电试品模型,即纸板内部气隙放电、油中纸板沿面放电和油中金属尖端电晕放电模型,针对不同频率电压作用下的同一试品,进行局部放电测量,通过分析获得了局部放电随电压频率升高发生相位、幅值、等变化的放电规律. 试验与分析结果表明,随外施电源频率增加及电压幅值升高,局部放电次数增高,能量有所增强,亦即随频率的增加油纸绝缘结构受到局部放电的威胁越严重. 研究结果对直流输电系统中的换流变、平波电抗器等油纸绝缘在谐波电压作用下绝缘结构设计有指导意义.

关键词: 高压交流变频电源;油纸绝缘;缺陷模型;局部放电;直流输电系统

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0109-06

Partial Discharge Characteristic of Oil-Paper Insulation under High Voltage Frequency-Variable Power Source

SUN Zhenquan, GU Chaomin, ZHAO Xuefeng, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the characteristic of oil-paper insulation under DC transmission voltage, a high voltage frequency-variable test power source is designed and constructed. The typical oil-paper insulation partial discharge models are established according to the discharge in inner air gap of insulating press board, the discharge on surface of insulating press board in oil, and the corona discharge at metal tip in oil. The partial discharge is measured for the same test sample under different frequency voltages to find the frequency and energy of partial discharge increasing with the frequency and amplitude of AC power source. The analysis report indicates that the phase position, amplitude, and frequency of partial discharge are affected by different frequencies, namely, oil-insulation structure holds heavy electrical field while the frequency increases. This study may be helpful in designing insulation structure of converter transformer and smoothing reactor for DC transmission system.

Keywords: high voltage frequency-variable power source; oil-paper insulation; defect models; partial discharge; DC transmission system

随着高压直流输电的发展及变频电源驱动的大量应用,电力系统相关的谐波问题日益突出. 在实际的高压直流运行条件下,换流变压器的交流侧和直流侧的电流源和电压源并非理想,总会存在谐波,在某些特定条件下,还有可能引发谐波放大甚

至谐波不稳定^[1]. 直流输电引起的谐波不稳定是指在换流站附近有扰动时,谐波振荡不易衰减,甚至产生放大的现象,主要表现为换流站交流母线电压严重畸变^[2]. 实际上,加在换流器上的三相电压难免有一定程度的不对称,触发脉冲相位间隔不相等,

将在换流器的交流侧和直流侧产生非特征谐波电流和电压. 未被滤除的低次非特征谐波电流流入交流系统, 将进一步导致交流电压发生畸变和过零点相位的相对移动, 从而造成触发脉冲间隔更加不相等, 产生更大的非特征谐波. 随着半导体开关器件技术的发展, PWM 变频调速技术在交流传动领域得到广泛的应用, 同时出现了大量变频电机绝缘早期损坏的情况^[3-4]. 国内外研究者对变频调速系统进行研究发现, 变频电机定子绕组绝缘承受的不再是传统的正弦电压, 而是脉冲频率可达 $10 \sim 20$ kHz 连续的高压方波脉冲^[5], 高频作用使得介质损耗、局部放电、空间电荷对绝缘的老化作用加剧, 从而导致绝缘过早失效. 文献^[6-7]分别研究了直流电压下的油纸绝缘的局部放电特性, 文献^[8]对不同场强下的局部放电进行了研究. 但是, 目前对谐波电压作用下的局部放电特性研究的文献还很少. 本文为了研究电源频率变化对油纸绝缘结构局部放电特性的影响, 设计了一套 $50 \sim 499$ Hz、 40 kV 的高压变频电源, 模拟制作了油纸绝缘局部放电的 3 种典型缺陷模型, 即内部放电、沿面放电、电晕放电模型, 通过试验分别给出了 3 种模型局部放电的信号特征, 研究了电源频率的变化对试品局部放电的影响. 对单个局部放电脉冲的波形特征做了描述. 本文研究结论对直流输电电压下油纸绝缘结构局部放电的测量分析与换流变主绝缘结构设计有指导意义.

1 高压交流变频电源与局部放电测量系统

1.1 高压交流变频电源

试验电源系统由变频装置与试验变压器级联构成, 见图 1. 其中变频装置的变频范围是 $40 \sim 499$ Hz, 输出电压最大可达 300 V, 试验变压器最高电压为 50 kV, 并且在 $40 \sim 499$ Hz 的频率范围内, 铁芯基本不饱和. 通过调压器与变频装置分别调整电压幅值与频率来改变系统电压输出的幅值与频率.

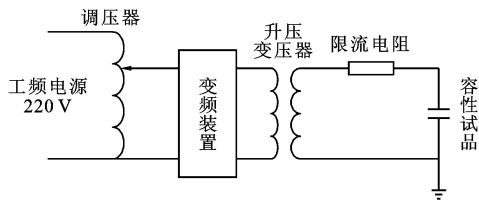


图1 高压交流变频电源原理图

1.2 局部放电测量系统

图 2a 是本文设计搭建的局部放电测量系统, 其

中电阻分压器的分压比为 $3\,000:1$, C_k 是耦合电容器 100 pF, TVS 为瞬态过电压保护器, 防止试品击穿时在采样电阻上产生过电压对示波器的冲击. 采样电阻为 $50\ \Omega$ 的无感电阻, 图 2b 为示波器, 用来记录电源与试品局部放电信号.

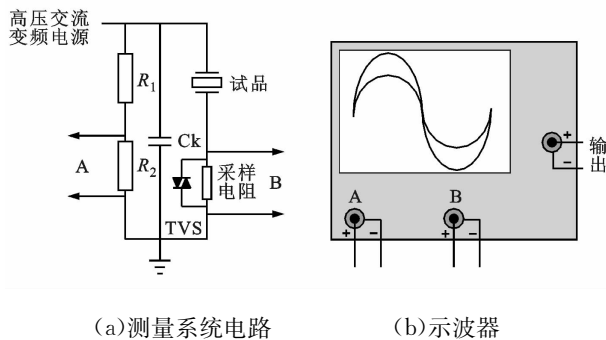


图2 局部放电测量系统

2 油纸绝缘局部放电测量

2.1 绝缘纸板内部气隙放电

2.1.1 放电模型 绝缘纸板内部气隙放电模型见图 3, 其中上、下金属电极直径 50 mm 的黄铜平板, 试品为边长 100 mm 的正方形绝缘纸板. 具体制作办法是: 将中间一层厚度为 2 mm 的纸板(几何中心附有 $\varnothing 8$ mm 的孔)与两边厚为 1 mm 的纸板用专用粘接剂粘压而成, 在烘箱内连续烘干 72 h 后浸入变压器油中 72 h, 密封在盛有变压器油的玻璃瓶内待用. 整个试品放在盛有变压器油的直径为 150 mm 的有机玻璃筒内, 筒的底部采用 $\varnothing 200 \times 15$ mm 的铝排通过环氧树脂粘接在一起, 并且铝排与下电极可靠连接, 上电极通过高压引线与高压变频电源连接. 放入试品后应静止 8 h 方可进行试验.

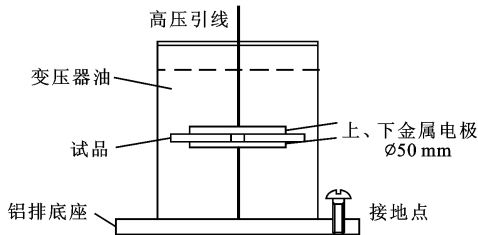


图3 油纸绝缘内部放电模型

2.1.2 放电试验 根据图 1、图 2 的接线搭建试验系统, 测量油纸绝缘内部放电模型的局部放电. 调整调压器使得电压值超过放电起始电压, 分别调整变频装置, 每次加压持续时间为 10 min, 分别记录不同频率下的局部放电的整体与单个波形.

图 4 给出了同一电压幅值、不同频率下油纸绝

缘的内部发生局部放电脉冲幅值与相位的分布. 随着频率的升高,由于残余电感的存在,测量传感器的综合阻抗也增加,在高频时测量阻抗有一定的基波幅值存在. 又由于容性试品的原因,测量信号与源电压存在相位差. 内部放电主要发生在电源电压上升或下降区域. 随着电源频率升高,放电次数也在增加. 放电发生的时域有向电源电压零点附近移动的趋势.

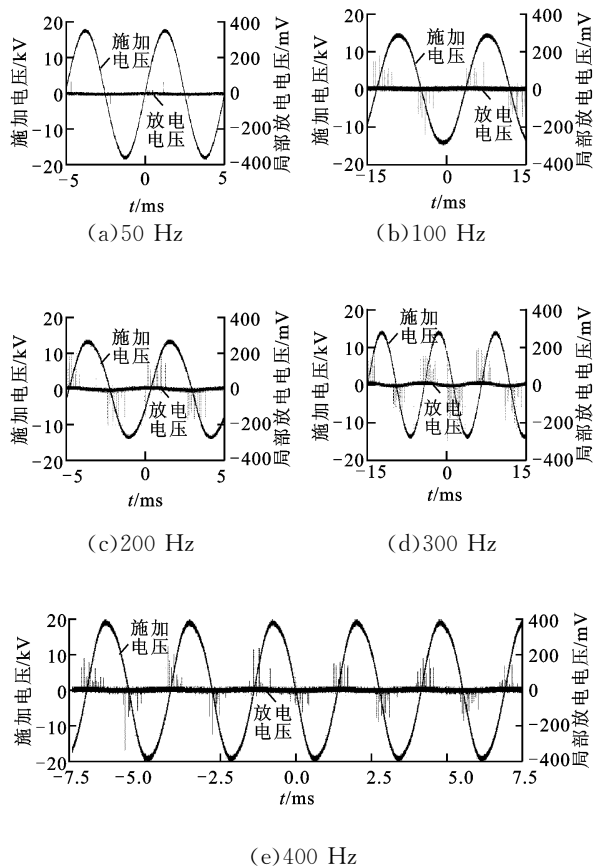


图4 交流电压下绝缘纸板内部气隙放电波形

2.2 油中绝缘纸板沿面放电

2.2.1 放电模型 图5给出了油中绝缘纸板沿面放电的典型模型. 上电极采用直径为10 mm的黄铜棒状电极,下电极采用直径为50 mm的黄铜平板电极,绝缘纸板直径为25 mm、厚度为2 mm. 将试品浸在盛有变压器油的直径为150 mm的圆柱状有机玻璃容器内,上电极通过高压引线引出,下电极经过铝排底座引出. 其中,绝缘纸板要经过干燥、浸油等工艺,以便接近运行中变压器的实际工况.

2.2.2 放电试验 根据图1、图2的接线搭建试验系统,测量油纸绝缘沿面放电模型的局部放电. 调整调压器使得电压值超过放电起始电压,分别调整变频装置,持续加压10 min,分别记录不同频率下的

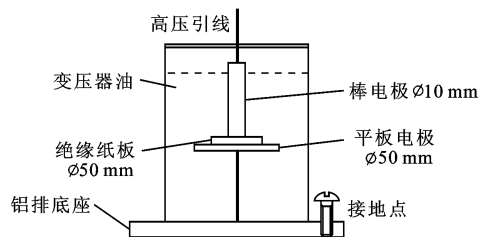


图5 油中绝缘纸板沿面放电模型

局部放电波形.

图6给出了同一电压幅值、不同频率下油中绝缘纸板沿面发生的局部放电脉冲幅值与相位分布. 随频率升高,由于残余电感的存在,测量传感器的综合阻抗也增加,在高频时测量阻抗有一定的基波幅值存在. 又由于容性试品的原因,测量信号与源电压有相位差存在. 沿面放电主要发生在电源电压上升及下降区域,随着电源频率升高,放电次数也在增加.

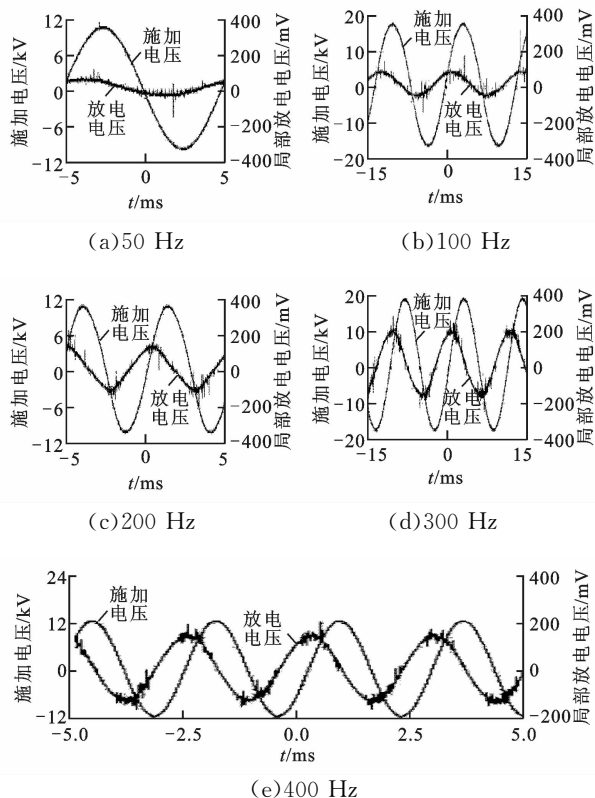


图6 交流电压下油中绝缘纸板沿面放电波形

2.3 油中金属尖端电晕放电

2.3.1 放电模型 图7给出了油中金属尖端电晕放电典型模型. 上电极为针状电极,针尖的曲率要足够大,使得容易产生电晕放电,其尖端直径为0.05 mm,下电极为直径50 mm的黄铜平板状电极. 整个试品浸在盛有变压器油的直径为150 mm的圆柱形

有机玻璃容器内,上电极通过高压引线引出,下电极通过铝排底座引出。针状电极尖端距平板电极之间的距离为 15 mm。

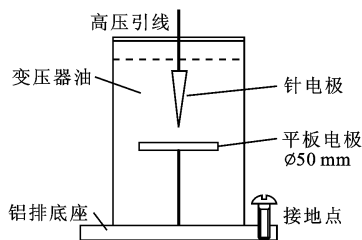


图7 油绝缘电晕放电模型

2.3.2 放电试验 图8给出了同一电压幅值、不同频率下油中金属尖端电晕发生的局部放电脉冲幅值与相位的分布。随着频率的升高,由于残余电感的存在,测量传感器的综合阻抗也增加,在高频时测量阻抗有一定的基波幅值存在。又由于容性试品的原因,测量信号与源电压存在相位差。电晕放电主要发生在电源电压峰值附近,随着电源频率升高,沿面放电脉冲发生时域变宽,甚至覆盖了电源电压过零点的范围,放电次数也在增加。

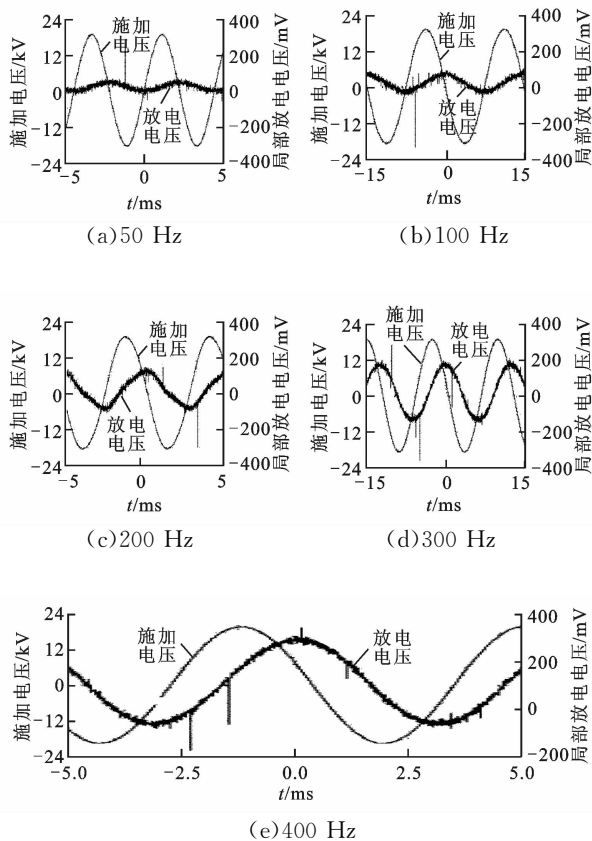


图8 交流电压下油中金属尖端电晕放电波形

图9给出了内部放电、电晕放电、沿面放电单个局部放电脉冲波形,表明内部放电的脉冲前沿上升

较快,一般为十几到几十纳秒,下降沿有衰减振荡,振荡衰减至零幅值的时间较长,一般为几百纳秒。电晕放电脉冲前沿上升更快,一般在十纳秒以内,且有多次重复脉冲出现,下降沿往往存在过冲,衰减周期也在几百纳秒。沿面放电脉冲上升沿与内部放电接近,但不稳定,随机性较大,下降沿的衰减很快,一般在百纳秒以内。

油纸绝缘内部放电模型局部放电的单个脉冲在不同频率电源下的脉宽与幅值是不同的。经过多次试验发现:随着电源频率的增加,局部放电次数显著增加,脉宽相对有减小的趋势,幅值变化随机性较大。

3 油纸绝缘局部放电分析

3.1 施加电压幅值对局部放电的影响

电压幅值对不同类型试品的局部放电脉冲平均值、最大值及放电次数的影响分别如图10~图12所示。总体上看,随着高压交流电压幅值的升高,放电量、放电次数都有增加的趋势,但不同的局部放电模型上升的速率是有所区别的。也有文献指出放电统计参量随脉冲幅值增加呈线性增长或者是指数增长。

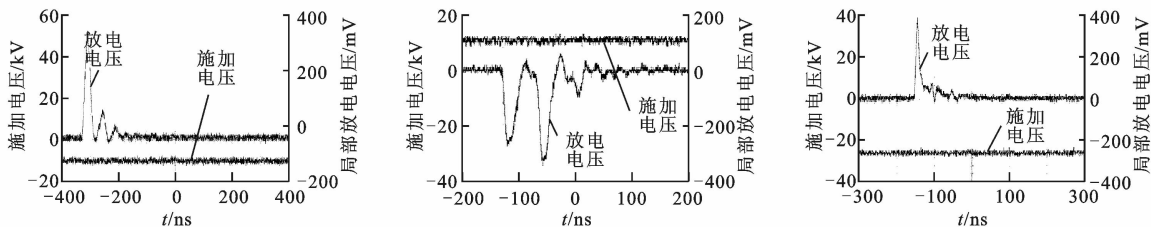
3.2 施加电压频率对局部放电的影响

尽管绝缘纸板内部气隙放电、油中绝缘纸板沿面放电及油中金属尖端电晕放电的机理不同,但从试验结果来分析,存在着一定的共同特征。随着高压交流电压频率提高及油纸绝缘典型缺陷模型两端施加电压幅值增加,放电现象越剧烈,平均放电量 and 最大放电量均呈增长趋势,放电次数也随交流电压频率及幅值的升高而增加。随外施电压频率的增加,各模型局部放电参数的变化是不同的,电晕放电与沿面放电受频率的影响较为显著,内部放电相对弱一些。总体上看,电源频率增加,对油纸绝缘的局部放电影响更为严重。

随着交流电源频率增加,单周期内放电次数减少,放电量增加,单位时间内放电次数由于频率增加还是呈增加的趋势,但不是线性增加的趋势。图13、图14表明,最大放电量、放电次数、放电能量并不呈线性增长,而图15表明,随着频率的变化,平均放电量、放电电流呈线性增长。

图16、图17所示的试验统计结果表明,随着频率的增加,局部放电起始电压和局部放电熄灭电压逐渐下降。

在高频率下,初始电子的发射概率对局部放电



(a)内部放电

(b)电晕放电

(c)沿面放电

图9 油纸绝缘试品单个局部放电脉冲波形

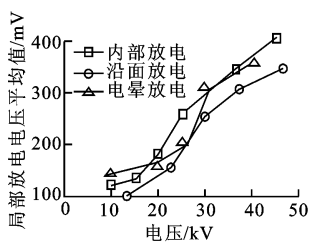


图10 局部放电电压平均值与电压关系

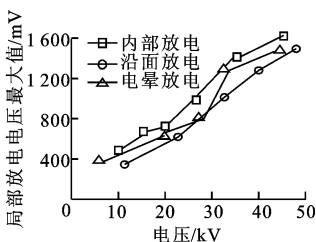


图11 局部放电电压最大值与电压关系

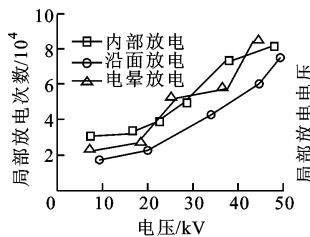


图12 局部放电次数与电压关系

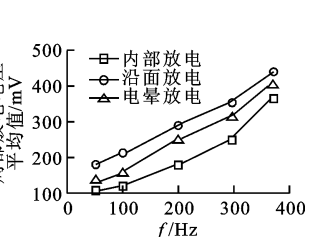


图13 局部放电电压平均值与频率关系

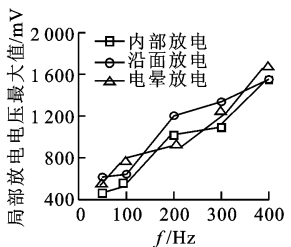


图14 局部放电电压最大值与频率关系

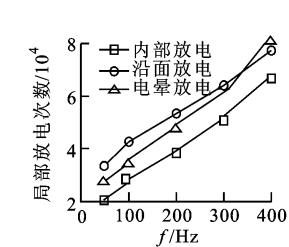


图15 局部放电次数与频率关系

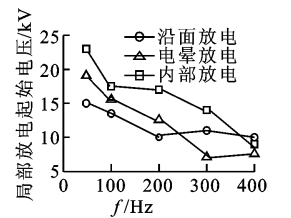


图16 局部放电起始电压与频率的关系

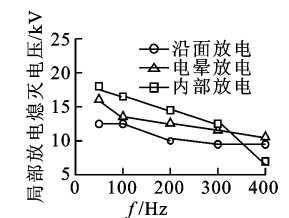


图17 局部放电熄灭电压与频率的关系

行为有着较大的影响.当频率较高时,初始电子获得能量的概率增大,放电次数增多,频率越高在单位时间内的放电次数明显越多.外施电源频率增加后,尽管反向电场作用增强,电荷驻留效应增强,但由于初始电子获得能量的概率减小,因此频率增加导致单个周期放电次数略有减少,但变化并不明显,主要受到初始电子发生概率的影响.但是,在相同的时间内,由于频率增加很多,因此单位时间内的放电次数则随着频率增加而增多.

随着电源频率的增加,油纸绝缘典型试品的局部放电的相位整体上由原来的电压正向增加或负向增加转变为向电压过零点(即电压变化最快的点)移动,甚至扩大了局部放电发生的时域范围.该现象说明,随着频率的增加,产生了较强的电荷驻留效应,形成了较强的反向电场叠加,导致放电往高频电压过零点偏移,因此频率越高,电荷的驻留效应越明显.频率增加导致电荷驻留效应增强的主要原因是:当一次放电后,气隙电场迅速降至残余电场,如果此时电压上升到足够大,能迅速达到起始放电电压,由于电压频率足够高,前一次放电后形成的残余电荷扩散较少,在此段时间内初始电子获得能量的概率增大,因此会出现连续放电,导致放电次数增多.

4 结 论

通过对3种模型试验数据的分析整理,认为高压变频电源下的油纸绝缘试品局部放电表征参数可以沿用工频交流电压下的参数,现将其不同于工频电压的特点归纳如下:

随着交流电压的幅值增加,局部放电的次数、最大值、平均值等都所有增加,但在不同的模型下,增加的速率不同,且存在一定的分散性;

随着交流电源频率的增加,局部放电的次数、最大值、平均值等都显著增加,导致试品的局部放电强烈,表明频率变化对油纸绝缘局部放电影响很突出.

基于以上的试验研究结果,对直流输电电压下

的油纸绝缘设备的绝缘结构设计、试验系统与方法有了更加清晰的认识. 高次谐波的存在加剧了直流设备油纸绝缘局部放电的发生与发展. 该结论对直流输电系统油纸绝缘设备的绝缘特性评估、老化寿命的预测有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998:28-30.
- [2] 夏道止. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994:15-18.
- [3] 刘曦, 吴广宁, 佟来生, 等. PWM 脉冲下局部放电信号的提取[C]//第十届全国工程电介质会议. 成都: 西南交通大学出版社, 2005:290-293.
- [4] 吴广宁, 温凤香, 佟来生, 等. 高速机车牵引电机绝缘技术的研究进展[C]//电工技术前沿问题学术论坛论文集. 北京: 中国电力出版社, 2004:214-219.
- [5] 邹思轶, 佟来生, 张广春, 等. 变电站 MIS 系统通用权限安全管理模块的设计[C]//中国电机工程学会第七

届青年科技大会会议论文集. 北京: 中国电力出版社, 2002:338-341.

- [6] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2008,42 (4):481-486.
- SI Wenrong, LI Junhao, LI Yanming, et al. Measurement and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42 (4):481-486.
- [7] FROMM U. Partial discharge and breakdown testing at high dc voltage [M]. Delft, The Netherlands: Technische University Delft, 1995:102-105.
- [8] FARALLNAI M, BORSI H, GOEKENBACH E, et al. Partial discharge and dissipation factor behavior of model insulating systems of high voltage rotating machines under different stresses[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005,12(5): 5-19.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 71 页)

- [9] TIPPING M E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine [J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 1(3): 211-244.
- [10] JI Shihao, XUE Ya, CARIN L. Bayesian compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2346-2356.
- [11] RAGHEB T, KIROLOS S, LASKA J, et al. Implementation models for analog-to-information conversion via random sampling [C]//Pro of 50th Midwest Sym-

posium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 325-328.

- [12] BAZERQUE J A, GIANNAKIS G B. Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010,58(3): 1847-1862.

(编辑 刘杨)