

复合电压下局部放电试验与检测系统设计

李军浩

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 换流变压器阀侧绕组承受的是一种交流、直流及脉动等多个电压相叠加的复合电压, 进行复合电压下变压器油纸绝缘局部放电特性的研究可为换流变压器绝缘失效机理分析提供有益的指导。这里针对复合电压下局部放电的研究, 设计一种可提供复合电压的试验系统, 该系统可产生直流叠加脉动电压、交流及直流复合电压等多个电压类型。在此基础上设计局部放电的检测系统, 为研究复合电压下绝缘局部放电特性提供试验平台。

关键词: 电气工程; 复合电压; 局部放电; 试验平台; 检测

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2016)14-1431-05

Design of partial discharge test and detection system under mixed voltage

LI Junhao

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

Abstract: The voltage of converter transformer valve side is a mixed voltage including AC, DC and pulsating voltage. It will support effective direction for analysis of insulation failure mechanism of converter transformer. The mixed voltage generation system is designed for PD research. This system can generate DC plus pulsating voltage, DC plus AC voltage. The PD detection system is designed on this test platform and it supports the research test basement for PD characteristics under mixed voltage.

Key words: electrical engineering; mixed voltage; partial discharge; test platform; detection

0 引言

换流变压器是高压直流输电工程中的核心设备^[1-2], 换流变压器与普通电力变压器的最大不同之处在于其阀侧绕组的主绝缘承受的电压波形是由直流电压分量、交流电压分量、脉动电压分量等不同的电压分量构成, 其绝缘所承受的是一种复合电压^[3]。在复合电压下换流变压器绝缘的失效机理尚不明确, 目前普遍认为局部放电是导致绝缘击穿的关键原因^[4-6], 而复合电压下局部放电特性目前研究得还不够充分。研究复合电压下油纸绝缘局部放电特性的关键是搭建能够产生复合电压的试验平台, 这里针对复合电压下局部放电研究, 设计一种能够产生直流叠加脉动分量和直流叠加交流分量的试验平台, 为研究复合电压下油纸绝缘局部放电特性提供参考。

1 直流叠加谐波电压源的设计

为考察脉动分量电压对油纸绝缘局部放电的影响, 设计和组建了6脉动直流电压产生装置, 采用可控硅在低压侧控制, 高压侧用硅堆进行整流的方式得到直流脉动电压。系统结构图如图1所示。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20110201120065)

作者简介: 李军浩 (1980—), 男, 副教授, 主要研究方向: 电气设备局部放电检测. E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

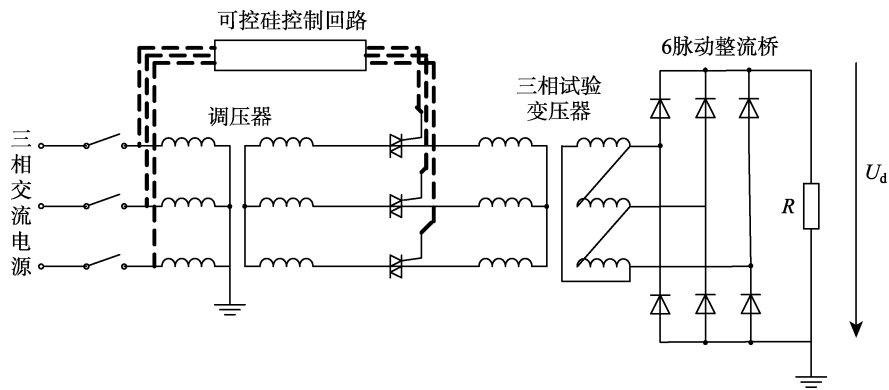


图1 6脉动直流产生系统
Fig. 1 Six pulsating voltage generation system

该系统采用在低压侧对交流电压进行可控硅控制导通角，经试验变压器升压后，用高压硅堆进行6脉动整流得到6脉动直流电压波形。用电阻作为负载，提供可控硅开断交流电压所必需的电流，电压波形受负载电阻阻值影响较大，负载电阻值为500 kΩ。仿真直流脉动发生系统输出的脉动波形如图2所示。

图3为对直流脉动产生系统进行测试得到的负载两端电压波形 U_d 。对图2和图3a所示波形作频谱分析，结果如图4所示。

对比仿真与实测波形与频域分析结果可知，本直流脉动电源系统在一定的触发角和一定的电压下可以输出预想的含6脉动的直流波形，可以满足模拟输出与实际直流系统12脉动等效的直流电源。输出的6脉动波形具备下述特点。

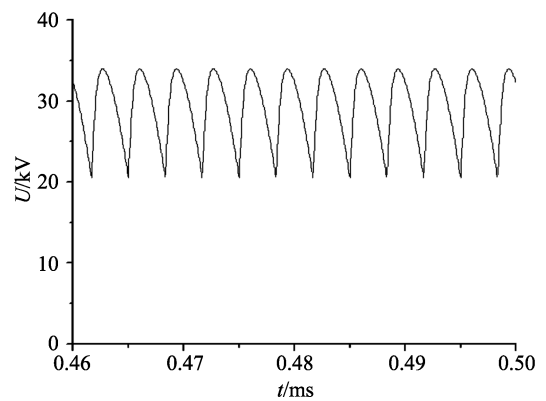


图2 6脉动波形仿真结果
Fig. 2 Simulation result of six pulsating voltage waveform

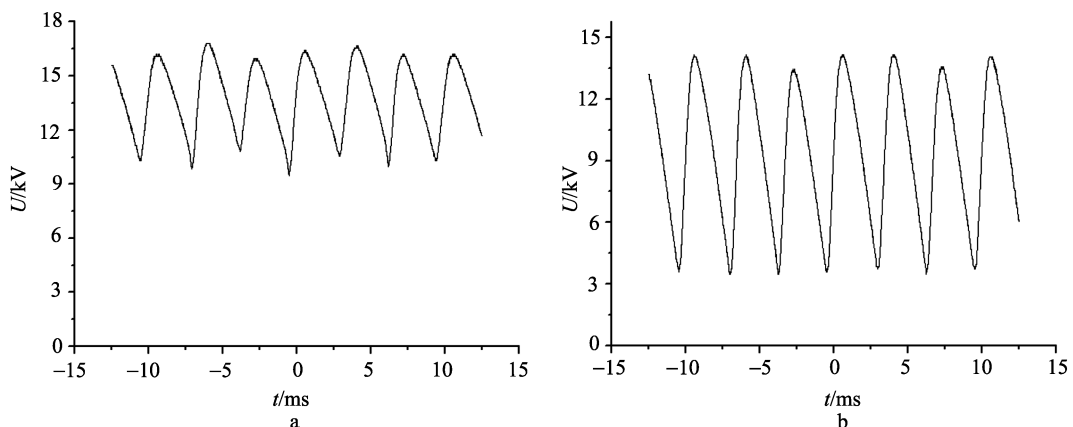


图3 6脉动系统输出电压波形
Fig. 3 Generated voltage waveform of six pulsating voltage systems
a—可控硅导通角较小；b—可控硅导通角较大

a-Small conducting angle of silicon controlled rectifier; b-Large conducting angle of silicon controlled rectifier

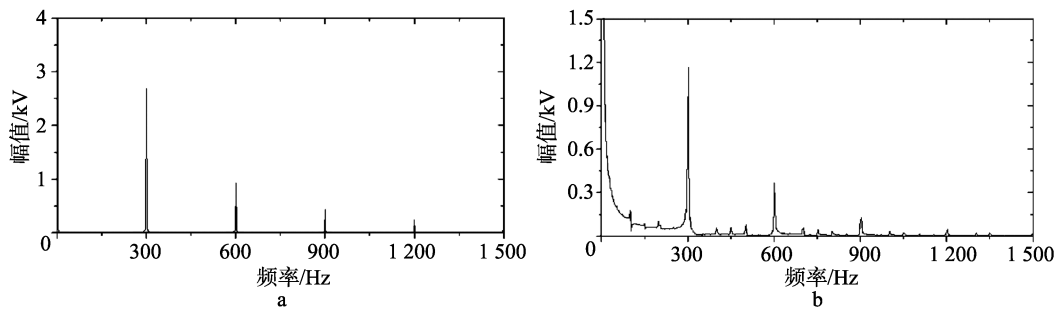


图4 6脉动系统的频谱分析

Fig. 4 Frequency spectrum of six pulsating systems

a—仿真波形的频谱；b—实测波形的频谱

a-Spectrum of simulation waveform; b-Spectrum of measured waveform

- 1) 通过调节触发角，可以实现脉动峰值和谷值在很大范围内变化，脉动谷值占脉动峰值的比例可以从0到80%以上；
- 2) 调节调压器可以调整输出电压的大小；
- 3) 结合调节触发角和调压器，可以得到用于试验的波形；
- 4) 受制于三相试验变压器的铁芯特性和结构形式，高次谐波不能通过变压器，系统得到的6脉动波形的上升沿比较缓。

2 直流叠加交流电源系统

1) 直流叠加工频交流的复合电压

直流电压包括正极性直流电压和负极性直流电压两种形式，直流分量和交流分量的幅值均各自可调。

2) 直流叠加变频交流的复合电压

变频交流电源可调频率范围为40~499 Hz，可以产生3, 5, 7, 9次谐波。

对直流、工频交流、变频交流3种形式电压叠加成复合电压，进行局部放电试验。

试验系统中的直流电压分量可实现±50 kV 内的电压调整，工频交流分量和变频交流分量可实现有效值50 kV 内的电压调整，根据局部放电油纸绝缘试品的模型尺寸，试验系统产生的直流与工频叠加、直流与变频叠加的电压可以满足局部放电试验的需要，而直流、工频和变频3种分量的叠加受制于系统回路结构，产生的复合电压幅值较难达到20 kV 以上。

试验中的直流电压采用工频无局放试验变压器与高压硅堆进行半波整流获得，工频交流试验电压和变频交流试验电压由变频电源和工频试验变压器组合产生。用直流、工频交流、变频交流组建的复合电压产生系统如图5所示。

图5为工频交流、变频交流(3, 5, 7, 9次谐波)、正极性或负极性直流3种电源组成的复合电压产生系统。可对系统中三部分电压产生回路进行选择使用，产生需要的直流、工频交流、变频交流以及复合电压形式。

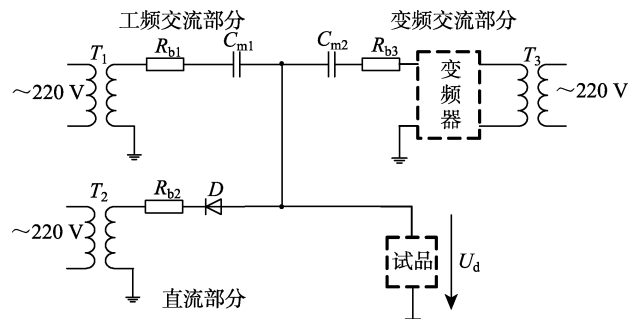


图5 复合电压产生系统回路

Fig. 5 Mixed voltage generation system

回路中 T_1 为移动式试验变压器， T_2 为工频无局放试验变压器， T_3 为工频试验变压器。 R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_{b3}

是阻值为数 $M\Omega$ 的水电阻，在回路中作为保护电阻使用； C_{m1} 和 C_{m2} 是用于隔离直流和耦合交流的电容器，其值为 $0.0296 \mu\text{F}$ ； D 为额定电压 150 kV 的高压硅堆，调整其方向可分别得到正极性和负极性的直流电压。

直流发生系统的半波整流回路中去掉了滤波电容，这是因为在整个系统中， C_{m1} 、 C_{m2} 以及进行局放试验时局放测量回路的耦合电容实际上都起到了滤波电容的作用，在增加专用滤波电容的情况下，滤波电容相当于增大了工频交流和变频交流的负载，导致这两种分量难以施加达到需要的数值。当只用直流电压进行局部放电试验时，需要使用专用的滤波电容器，其电容值与 C_{m1} 相同。

图 6 为试验电压产生系统产生的 4 种典型电压形式，分别为变频交流电压（9 次谐波）、正极性直流与工频交流的复合电压、负极性直流与变频交流（5 次谐波）的复合电压、负极性直流与工频交流和变频交流（3 次谐波）的复合电压。

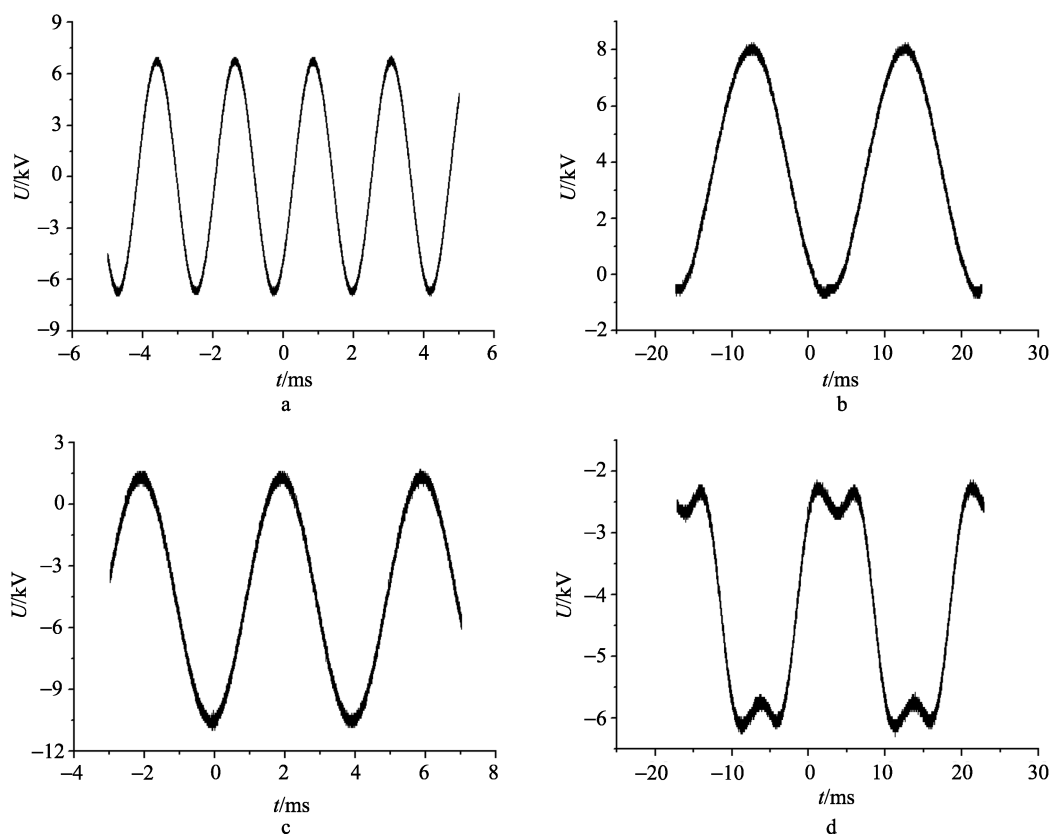


图 6 试验电压系统产生的典型电压形式

Fig. 6 Typical voltage waveform of mixed voltage generation system

a—变频交流电压；b—直流与工频交流的叠加；c—直流与变频交流的叠加；d—直流与工频和变频交流的叠加
a-AC voltage with variable frequency; b-Superposition of DC and power frequency voltage; c-Superposition of DC and variable frequency voltage; d-Superposition of DC, power frequency and variable frequency voltage

3 局部放电检测系统

采用 IEC60270 推荐的脉冲电流法进行测量，脉冲电流法在交流电压和直流电压的局部放电检测中均有成功运用，因此也可以应用于复合电压下的局部放电检测。

图 7 给出了基于脉冲电流法的局部放电测量回路，其中 R_1 和 R_2 组成分压比 $3000:1$ 的电阻分压器，

用于测量试验施加的电压波形和数值, 输出信号 S_1 用 $50\ \Omega$ 的同轴电缆传出。

C_k 为容值为 $100\ \text{pF}$ 的耦合电容, 为高频局放信号提供通路。 C_x 为浸在变压器油中的试品, 其高压电极接试验电压, 接地电极与地之间接有检测阻抗 Z_m 或罗氏线圈, Z_m 为阻值 $50\ \Omega$ 的无感电阻, 封装在屏蔽铜管内, 其对上升沿为 $2\ \text{ns}$ 的校

准脉冲响应结果为上升沿 $2.64\ \text{ns}$, 响应特性较好, 无较大的过冲和振荡, 罗氏线圈的灵敏度为 $1\ \text{V/A}$ 。 Z_m 或罗氏线圈检测到的电压信号 S_2 经 $50\ \Omega$ 的同轴电缆输出。图 7 中检测到的 S_1 信号为分压器分压后的试验施加电压信号, S_2 为阻抗检测到的局部放电信号。

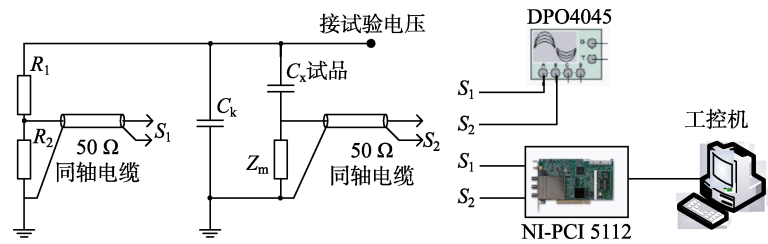


图 7 局部放电测量系统

Fig. 7 PD detection system

4 结论

给出了复合电压下局部放电试验与检测系统, 搭建了可产生直流叠加脉冲分量和直流叠加交流分量的复合电压产生系统, 采用脉冲电流法作为局部放电检测系统。试验结果表明, 采用该电源产生系统可产生 6 脉动直流电压及直流叠加不同频率的交流电压, 可作为复合电压下油纸绝缘局部放电特性研究用试验平台。

[参考文献] (References)

- [1] 孙优良, 王清璞, 李文平, 等. $\pm 800\ \text{kV}$ 直流输电工程用换流变压器的研发[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 17-20.
SUN Y L, WANG Q P, LI W P, et al. RD of converter transformer for $\pm 800\ \text{kV}$ HVDC power transmission project[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 17-20. (in Chinese)
- [2] 高敏华, 冷勇. 换流变压器中的两个直流分量[J]. 变压器, 2002, 39(6): 15-19.
GAO M H, LENG Y. Two direct components in converter transformer[J]. Transformer, 2002, 39(6): 15-19. (in Chinese)
- [3] 陈庆国, 张杰, 高源, 等. 混合电场作用下换流变压器阀侧绕组电场分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 484-488.
CHEN Q G, ZHANG J, GAO Y, et al. Study of complex electrical field on valve side winding of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 484-488. (in Chinese)
- [4] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
QIU C R, WANG N Q. Partial discharge and its detection technology of electrical equipment[M]. Beijing: China Machine Press, 1994. (in Chinese)
- [5] LI J, SI W, YAO X, et al. Partial discharge characteristics over differently aged oil/pressboard interfaces[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2009, 16(6): 1640-1647.
- [6] SI W, LI J H, YUAN P, et al. Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2008, 15(6): 1663-1674.