

高压直流发生器特殊结构对其内部局放测量的影响

司文荣, 李军浩, 袁 鹏, 李延沐, 方晓明, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为测量具有特殊结构高压直流发生器内部局部放电, 笔者分析了其工作原理并得出发生器输出电压波形与负载的关系曲线图, 研究了此发生器在试验和运行中出现的 3 种不同负载情况(电容性、电阻性和阻容性)对其内部局部放电测量的影响。理论和试验结果均表明: 在电阻性负载下, 可以准确检测该高压直流发生器内部局部放电。

关键词: 高压直流发生器; 局部放电; 负载; 硅堆

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0129-03

High Voltage DC Generator's Special Construction Affecting Its Inner PD Detection

Si Wen-rong, Li Jun-hao, YUAN Peng, LI Yan-mu, FANG Xiao-ming, LI Yan-ming

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

Abstract: For detecting partial discharge in high voltage DC generator with special construction, this paper analyzed the generator's operation principle to show the relationship of its output voltage with different loads, and researched the effect on inner PD detection with three kinds of loads (capacitance load, resistance load and resistance-capacitance load) in its operation and test. The theory and experiments shows that the inner PD can be correctly detected with resistance load.

Key words: high voltage DC generator; partial discharge (PD); load; silicon stacks

0 引言

100 kV 特殊结构高压直流发生器, 其交流绕组和整流硅堆位于同一箱体内(见图 1)。绝缘系统不但承受交流和直流电压, 还承受硅堆整流导通和截止状态的变化而引起的各种不规则波形电压, 所以对其系统绝缘性能要求非常高。而局部放电是造成高电压设备绝缘故障的重要因素, 因此研究此高压直流发生器内部局部放电测试方法及特点、获取局部放电脉冲波形、判断局部放电位置, 对于考察该直流高压发生器整体绝缘性能并改善其内部结构具有重要意义。

作为初期研究, 笔者着重阐述此高压直流发生器的特殊结构和工作原理以及自身特殊结构对局部放电检测的影响。

1 高压直流发生器的特殊结构

具有特殊结构的高压直流发生器由升压器和整流硅堆组成, 这两部分都置于发生器的箱体内, 其结构见图 1。

图 1 中, L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 为二次侧绕组(即 4 个高压线包), D_1 、 D_2 为两组全波桥式整流硅堆。电压整

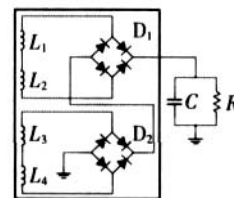


图 1 高压直流发生器结构示意图

流后输出, 通过滤波电容 C 变为直流高压加到负载 R 上。相对于此高压直流发生器来说, 负载可以等效为一阻容 RC 并联回路。

2 高压直流发生器的工作原理

为分析其工作原理, 简化此高压直流发生器结构示意图得到其等效电路^[1], 见图 2。图中, 设 u_2 为二次绕组的输出电压; u_3 为发生器输出电压。该电路的基本工作过程是: 在 u_2 正半周过零点至 $t=0$ 期间, 因 $u_2 < u_3$, 故二极管 D_1 和 D_4 均不导通, 此阶段电容 C 向 R 放电, 提供负载所需电流, 同时 u_3 下降。至 $t=0$ 之后, u_2 将要超过 u_3 , 使得 D_1 和 D_4 导通, $u_3 = u_2$, 交流电源向电容 C 充电, 同时向负载 R 供电^[2-4]。

设 D_1 和 D_4 导通的时刻与 u_2 过零点相距 ϕ 角, 则 u_2 可表示为

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

在 D_1 和 D_4 导通期间, 以下方程成立

收稿日期: 2007-07-29; 修回日期: 2007-12-05

作者简介: 司文荣(1981-), 男, 博士研究生, 从事电力设备检测和故障诊断技术的研究。

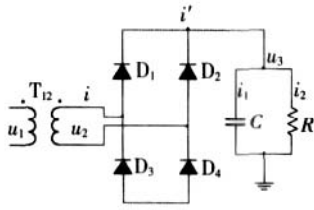


图2 高压直流发生器等效电路图

$$\begin{cases} u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \phi \\ u_3(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = u_2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $u_3(0)$ 为 D_1 和 D_4 开始导通时刻直流侧电压值。将 u_2 代入(2)求解得

$$i_1 = \sqrt{2} C U_2 \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

而负载电阻电流为

$$i_2 = \frac{u_2}{R} = \frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

于是

$$i = i_1 + i_2 = \sqrt{2} C U_2 \cos(\omega t + \phi) + \frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

设 D_1 和 D_4 导通角为 θ , 则当 $t = \theta$ 时, D_1 和 D_4 关断。将 $i(\theta) = 0$ 代入式(5)得

$$\tan(\omega\theta + \phi) = -RC \quad (6)$$

电容被充电到 $t = \theta$ 时, $u_3 = u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega\theta + \phi)$, D_1 和 D_4 关断。电容开始以时间常数 RC 按指数函数放电, 当 $t = \theta + \phi$ 即放电经过 $(\theta - \phi)$ 角时, u_3 降至开始充电时的初值 $\sqrt{2} U_2 \sin \phi$, 另一对二极管 D_2 和 D_3 导通, 此后, u_2 又向 C 充电, 与 u_2 正半周的情况一样。由于二极管导通后 u_2 开始向 C 充电时的 u_3 与二极管关断后 C 放电结束时的 u_3 相等, 故有式(7)成立

$$\sqrt{2} U_2 \sin(\omega\theta + \phi) e^{-\frac{\theta - \phi}{RC}} = \sqrt{2} U_2 \sin \phi \quad (7)$$

注意到 $(\omega\theta + \phi)$ 为第 2 象限角, 由式(6)、(7)得

$$\theta - \phi = \arctan(RC) \quad (8)$$

$$\frac{RC}{\sqrt{(RC)^2 + 1}} e^{-\frac{\arctan(RC)}{RC}} e^{-\frac{\phi}{RC}} = \sin \phi \quad (9)$$

在 RC 已知时, 即可由式(9)求出 ϕ , 进而由式(8)求出 θ 。显然 θ 和 ϕ 仅由乘积 RC 决定。图 3 给出了根据上两式求得的 ϕ 和 θ 随 RC 变化的曲线。

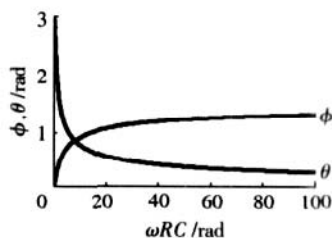


图3 ϕ, θ 和 ωRC 的关系图

3 特殊结构对局部放电测量的影响

从上节叙述中可以看出高压直流发生器的输出

电压波形与其承受的负载有关, 而电压波形决定了整流硅堆是处于导通状态还是截止状态, 由于硅堆在截止状态下对局部放电信号的传播有阻碍作用, 因而负载的不同将会影响局部放电的测量。下面讨论高压直流发生器在试验和运行中出现的 3 种不同负载情况及其对局部放电测量的影响^[5]。

3.1 电容性负载

通常试验室用脉冲电流法测量局部放电, 都是采用耦合电容并联与被测试品, 并通过耦合电容 C 接地端的检测阻抗 R 来提取局部放电信号, 见图 4。将耦合电容器连接于高压直流发生器的输出端, 对发生器采用自感升压方式测量局部放电, 此时负载呈容性, $R = \infty$, 即放电时间常数无穷大, 故输出电压最大, 为交流电压的峰值。由第 2 节的叙述, 此时总有 $u_2 = u_3$ 成立, 整流硅堆一直承受反偏而处于截止状态, 导通角 $\theta = 0$ 。由于硅堆对局部放电信号的阻碍作用, 若绕组部分有局部放电现象, 在局部放电检测仪器上无法观测到局部放电。

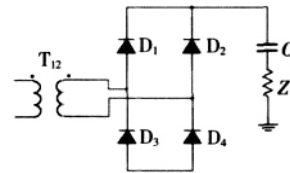


图4 电容性负载等效电路

实验时没有检测到来自发生器内部的局部放电信号。

3.2 电阻性负载

电阻性负载是指负载为纯电阻(见图 5), 是由于输出阻性负荷重(即负载等效电阻足够小, 使得 $RC \ll \theta$), 电容失去储能作用使负载呈阻性的情况。由于 $RC \ll \theta$, 根据图 3, 得 $\phi \approx 0$, $\theta \approx \pi/2$, 不考虑电感的影响时, 小电阻 R_d (这里取 $R = 50 \text{ m}\Omega$, $R_c = 5 \text{ k}\Omega$) 测得发生器输出的电压见图 6。此时 D_1, D_4 和 D_2, D_3 在交流电压一个周期的各半个周期内导通, 也就是说在任何时刻整流桥中总有两个硅堆导通。硅堆处于导通低阻状态时, 对局部放电信号无阻碍作用, 因此在阻性负载情况下进行局部放电测量可以全面准确的反映发生器内部的绝缘状态。

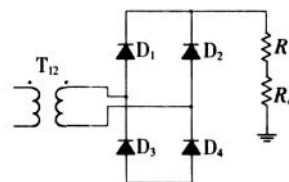


图5 电阻性负载等效电路

如图 6 所示, 实验时可以捕捉到不规则出现的来自发生器内部的局部放电信号。

3.3 阻容性负载

高压直流发生器在正常工作时(图 2 所示), 其

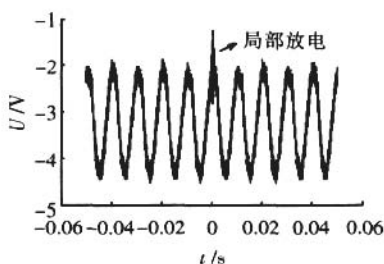


图6 电阻性负载下的输出电压波形

所带的负载为阻容性负载,此时发生器输出为直流电压,电压波纹的大小取决于负载的电容和电阻的大小。负载情况决定了发生器的硅堆导通角,在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 之间变化。假定负载的电容值是基本不变的,则硅堆导通角是由电阻决定的,电阻越大,硅堆导通角越小,电阻越小则硅堆导通角越大;反之亦然。硅堆导通时不影响局部放电的测量,而当所有硅堆都截止时,检测仪器不能准确反映发生器内部的局部放电现象。

在大RC条件下,高压直流发生器可以当作脉冲电流法检测试品局部放电的无局放直流试验变压器。

4 结语

此高压直流发生器的特殊结构使得在试验运行中由于负载的不同而影响对其内部局部放电的测量。理论和实验分析表明:电容性负载下,无法准确检测发生器内部局部放电;电阻性负载下,可以准确检测发生器内部局部放电;阻容性负载条件下,取决于负载RC常数大小,RC越大硅堆导通角越小,局部放电可检测性越差,RC越小则硅堆导通角越大,使得局部放电可检测性越好。

参考文献:

- [1] 刘味果. 静电除尘用高压直流发生器的局部放电特征及测试方法[D]. 西安交通大学, 2002.
- [2] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高压电试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 丘昌容, 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.
- [5] IEC Standard Publication 270. Partial Discharge Measurements [S]. Second Edition, 1981.

(上接第128页)

表3 有避雷器保护时不同情况下过电压的大小

	整流侧阀桥 顶端电压/p.u.	整流侧线路 首端电压/p.u.	中性母线阀 侧电压/p.u.	中性母线平波电 抗器线路侧电压/p.u.	整流侧阀避雷 器吸收能量/kJ	整流侧线路避 雷器吸收能量/kJ	中性母线避雷 器吸收能量/kJ
换流变A、C两相 同时反极性进波 换流变和阀之间 单相对地短路 平波电抗器线路 侧对地短路 全电压起动, 逆变阀 丢失脉冲闭锁	1.78				160		
			1.88	1.51			229
			1.80	1.52			332
	1.60	1.50				371	

3 结论

笔者针对换流站内可能产生操作过电压的几种典型工况,就系统接有避雷器保护和没有避雷器保护两种情况进行了分析计算,得到以下结论:

(1) 相间的操作过电压能从交流系统以全幅值传送到换流变阀侧,它通过变压器(按变比)出现在不导通的阀上,对整流侧12脉桥而言,阀5承受了最大的操作冲击应力。

(2) 金属回线运行方式下,直流极线平波电抗器线路侧对地短路时在中性母线上的操作应力较为严重,可以用装在换流变压器阀侧的避雷器来限制。

(3) 全电压起动时,直流线路上的巨大过电压贮能必须通过线路避雷器释放掉,在这种情况下,需通过分析计算以确定整流侧和逆变侧线路避雷器通流容量的要求。

参考文献:

- [1] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 1-4.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 舒印彪, 刘泽洪. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 1(1): 1-8.
- [4] 杜忠明. 贵广第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 69-74.
- [5] E 乌尔曼. 直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [6] 周浩, 赵智大. 高压直流输电系统全电压起动过电压的研究[J]. 高电压技术, 1995, 21(2): 38-42.
- [7] ELAHI H, FLUGUM R W, WRIGHT S E, et al. Insulation Coordination Progress for HVDC Converter Stations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2): 1 037-1 048.
- [8] Cigre WG 12. Insulation of HVDC Converter Stations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 387-392.