

新型换流阀均压测试方法的研究与实现

介绍了常规晶闸管组件均压测试方法，分析了晶闸管常规测试方法存在的问题。并依据当前测试方式存在的问题，提出了一种新的换流阀均压测试的方法，该方法解决了晶闸管在高频、低频及直流电压作用下的均压效果测试问题，能快速发现并定位故障元件，相比常规测试方法，提高了测试效率和测试准确度，保证了换流阀长周期安全稳定运行，避免了因为晶闸管故障导致的直流系统闭锁事故。

陈 瑞 张 斌 赵欣洋/国网宁夏电力公司检修公司

0 引言

换流站是将交流电变为直流电进行远距离传输的变电站，而晶闸管是换流站的核心换流设备，在直流输电领域扮演着至关重要的角色。晶闸管组件的均压性能直接影响换流阀电压的分布特性，对其安全稳定运行起到决定性的作用。

随着我国高压直流输电工程的发展，换流站的电压等级越来越高，直流输电输送容量和电压等级的大规模提高，构成换流阀的晶闸管数量成指数增长，对换流阀故障点定位、均压测量准确性及试验快速性提出了更高的要求。本文提出了一种新的晶闸管级辅助电路测试方法，解决了高频、低频及直流电压作用下的均压效果测试准确度问题、故障难以定位准确问题以及测试速度问题。

1 换流阀均压回路原理简介

换流阀中的每个模块都是由若干完全相同的晶闸管级串联组成的。晶闸管级由晶闸管、门极电路和阻尼均压电路组成，阻尼元件保证阀两端的直流电压

和冲击电压在晶闸管内部合理分布，并在晶闸管触发和恢复期间控制电压和暂态电流。门极单元用于在正常和非正常运行条件下对晶闸管进行门极控制，如图1所示。 R_{dc} 为直流均压电阻，主要作用是均衡每只晶闸管之间的电压，晶闸管在未导通的情况下呈现高阻状态，在阀组件的每只晶闸管两端并联一只阻值相同的电阻就可以起到均压的作用， R_{d1} 、 R_{d2} 为阻尼电阻； C_{d1} 、 C_{d2} 为阻尼电容，其作用是把晶闸管的电压应力限制在一个合理范围之内，并且为门极单元（Gate Unit，GU）提供触发能量。

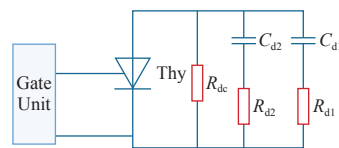


图1 晶闸管级电路图

2 常规测试方法介绍及问题分析

2.1 常规换流阀测试方法介绍

现阶段，国内没有完善的换流阀晶闸管检测设备及方法，一般采用测量单只晶闸管电阻与电容的方法，如图2所示，该方法必须将每个晶闸管级上的辅助电路各元件断开，逐一测量晶闸管阻值、阻尼电阻值、阻尼电容值和直流均压电阻值等参数。在检修试验过程中，利用万用表、电容表对每只晶闸管级辅助电路各个元件的阻值或容值进行测量，保证晶闸管级的辅助电路各个元件的电气性能在正常范围内，从而保证晶闸管的正常工作。



陈 瑞/工程师

关键词/Keywords

晶闸管 ·
辅助电路 ·
测试方法 ·
RC串联电路 ·

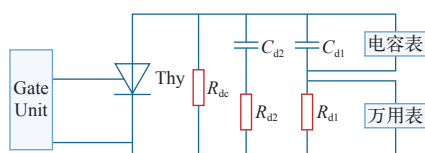


图2 常规测试方法示意图

2.2 常规方法存在的问题

1) 目前使用的这种方法虽然简单，但是在判断元件健康状态存在局限性，只能判断严重或故障元件，对于参数发生微小变化但未发生故障的元件无法判断，直接导致换流阀在运行过程中发生级联故障，导致直流闭锁。

2) 对数以千计的晶闸管来说，工程量大、耗时长，不利于换流阀年度检修的时效性。以某常规换流站为例，双极晶闸管共计2 884个，所对应的直流均压电阻为5 768个，对应的阻尼电阻多达51 912个，阻尼电容为8 652个，完成单只晶闸管测试需用20 min，完成全站所有晶闸管的测量所用时间为57 680 min，共计961 h，且故障排查时间不计入内。

3) 常规测试方法在测试过程中，必须将晶闸管级的辅助电路各元件断开，逐一测量晶闸管阻值、阻尼电阻值、阻尼电容值和直流均压电阻值等参数，若不断开元件之间的连接必将会互相影响，导致测量数据发生偏移。反复拆接线容易造成接线恢复有误，造成严重后果。

3 新型均压测试方法介绍

晶闸管的过电流、过电压能力很差，一旦过电流，晶闸管内部的温度会急剧上升，导致元器件被烧坏，因此在晶闸管两端并联辅助电路。为了适应不同的电压等级，可将若干个晶闸管串联起来，如图3所示。每个晶闸管辅助电路的组成相同，因此在一个阀组件两端提供一个固定的电压源，根据分压原理，在每只晶闸管两端分得的电压相等，该电压源是由不同频段的电压源构成，主要包括以下部分：①针对电阻均压的直流电压源，对直流电阻的均压特性进行测试和故障定位；②针对电容均压的高频电压源，对均压电容

的均压特性进行测试和故障定位；③针对小电容均压的超高频电压源，对并联均压小电容的均压特性进行测试和故障定位。

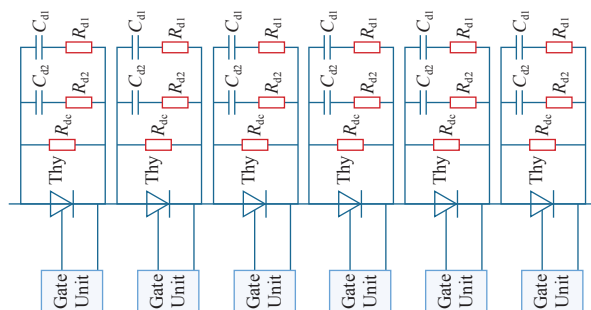


图3 阀组件电气原理图

如果其中某一只晶闸管的辅助电路有所改变，那么其两端分得的电压也发生改变，与其他晶闸管两端的电压有差别，因此，就可以确定哪一只晶闸管的辅助电路故障，可具体将故障定位到单个元件。

3.1 新型均压测试方法理论研究

3.1.1 等效电路图

晶闸管级由晶闸管、阻尼电容、阻尼电阻、直流均压电阻和GU组成，由于在晶闸管两端只接了电阻和电容，而且GU的阻抗一定，可以将晶闸管级电路等效为如图4所示的电路图。

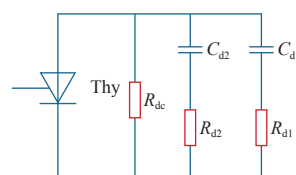


图4 晶闸管级电路等效电路图

3.1.2 交流电压下总阻抗Z的理论推导

在交流回路中，电容对交流电流有阻碍的作用，所以，在交流回路中，要考虑容抗对电容所在支路中阻抗的影响。根据图4晶闸管级电路等效电路，设 R_{dc} 的阻抗为 Z_{dc} ， C_{d1} 的阻抗为 Z_{d1} ， C_{d2} 的阻抗为 Z_{d2} ，可以得出 R_{d1} 和 C_{d1} 串联总阻抗为 Z_1 ， R_{d2} 和 C_{d2} 串联总阻抗为 Z_2 ，大小为

$$Z_{d1} = j \frac{1}{\omega C_{d1}} \quad (1)$$

$$Z_{d2} = j \frac{1}{\omega C_{d2}} \quad (2)$$

$$Z_1 = R_{d1} + Z_{d1} = R_{d1} + j \frac{1}{\omega C_{d1}} \quad (3)$$

$$Z_2 = R_{d2} + Z_{d2} = R_{d2} + j \frac{1}{\omega C_{d2}} \quad (4)$$

并且

$$Z_{dc} = R_{dc} \quad (5)$$

式中, ω 为电压角频率。

加在晶闸管两端的均压电路的总阻抗 Z 的大小为

$$Z = \frac{Z_{dc} Z_1 Z_2}{Z_{dc} Z_1 + Z_{dc} Z_2 + Z_1 Z_2} \quad (6)$$

根据式 (6) 可知, 正常情况下晶闸管两端均压回路的阻抗是一个定值, 如果在晶闸管两端施加固定电压 U_N , 由并联电路分压原理可得, 在正常情况下, 每只晶闸管两端分得的电压相等。如果当 R_{dc} 、 C_{d1} 、 C_{d2} 、 R_{d1} 和 R_{d2} 中的某一个值发生改变, 那么所对应的总阻抗 Z 也会发生改变, 那么其分得的电压也有所不同, 由此可以得出晶闸管级辅助电路中的元器件电气性能良好与否。

电容器通过不同频率的交流电流时呈现不同的阻抗值, 当频率越高, 电容器的阻抗越小, 反之亦然。 RC 串联电路的阻抗由电阻和容抗确定, 即需要在不同频率下进行测量, 方能确定其损坏的元器件。 RC 串联电路有一个转折频率 f_0 , 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

因此, 可以根据其转折频率来确定测量需要的频率。

3.1.3 直流电压下总阻抗 Z 的理论推导

由电容的电气特性可知, 电容具有“通交流, 隔直流”的特点, 当在晶闸管两端施加直流电压时, 图4中的 C_{d1} 和 C_{d2} 支路相当于开路, 则加在晶闸管两端的均压电路的总阻抗 Z 的大小为

$$Z = R_{dc} \quad (8)$$

在一个阀组件中的所有晶闸管级中的辅助电

路阻抗均为 R_{dc} , 如果阀组件中的任意一个 R_{dc} 的阻值变化, 其分得的电压就有所变化, 则可以看出 R_{dc} 的阻值变化。当 R_{dc} 短路时, 所对应的晶闸管级两端分得的电压为零; 当 R_{dc} 开路时, 所有晶闸管级两端的电压均为零。该方法可以快速查找损坏的 R_{dc} 电阻。

再有, 如果某个晶闸管级中的电容 C_{d1} 或 C_{d2} 短路, 根据阻抗的并联特性, 则该晶闸管级辅助电路总阻抗 Z 的大小为

$$Z = \frac{Z_{dc} Z_1}{Z_{dc} + Z_1} \quad (9)$$

或

$$Z = \frac{Z_{dc} Z_2}{Z_{dc} + Z_2} \quad (10)$$

该晶闸管级的阻抗变化, 导致该晶闸管级分得的电压变化, 能够快速找出损坏的电容器。

3.2 新型均压电路分压测试试验

根据电路图搭接试验电路 (见图3), 共6组, 依次串联起来模拟一个阀组件进行试验, 以某换流站使用的换流阀为例, 其中 $R_{dc} = 94 \text{ k}\Omega$, $R_{d1} = 55 \text{ }\Omega$, $C_{d1} = 1.0 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{d2} = 144 \text{ }\Omega$, $C_{d2} = 0.5 \text{ }\mu\text{F}$ 。在模拟阀组的两端加一定的电压, 分别测量每只晶闸管级两端的电压, 并分别进行比对, 如图5所示。

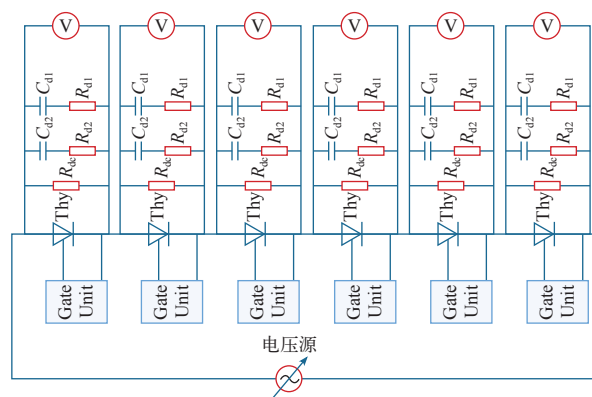


图5 晶闸管均压电路分压测试电路图

3.2.1 直流电压下分压测试试验

由式 (7) 可知正常情况下晶闸管两端均压电路的总阻抗 Z 的值为 $94 \text{ k}\Omega$, 在6组晶闸管两端施加 $1\ 000 \text{ V}$ 的直流电压, 分别测量各个晶闸管两端的

电压,共测量5次,以保证试验的准确性,测量结果如表1所示。

表1 正常情况下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	166.7	166.6	166.7	166.7	166.6	166.6
第二组	166.7	166.6	166.7	166.7	166.6	166.6
第三组	166.7	166.6	166.7	166.7	166.6	166.6
第四组	166.7	166.6	166.7	166.7	166.6	166.6
第五组	166.7	166.6	166.7	166.7	166.6	166.6

由表1中的数据可知,所有晶闸管级辅助电路中的 R_{dc} 均正常。

下一步,模拟电路故障,将第二个晶闸管级辅助电路中的 R_{dc} 短接,然后测量各个晶闸管级两端的电压,测量结果如表2所示。

表2 R_{dc} 短接下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	200.3	0.0	200.3	199.5	199.5	199.6
第二组	200.3	0.0	200.3	199.5	199.5	199.6
第三组	200.3	0.0	200.3	199.5	199.5	199.6
第四组	200.3	0.0	200.3	199.5	199.5	199.6
第五组	200.3	0.0	200.3	199.5	199.5	199.6

由表2中的数据可知,第二个晶闸管级辅助电路中的电压与其他晶闸管两端电压差别很大,可以判断第二个晶闸管不能正常工作,需要查找不能正常工作的原因。

3.2.2 交流电压下分压测试试验

根据上述参数代入式(7)可得: R_{d1} 支路的转折频率 f_1 ,其值为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_{d1} C_{d1}} = 2893 \text{ Hz} \quad (11)$$

R_{d2} 支路的转折频率 f_2 ,其值为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_{d2} C_{d2}} = 2210 \text{ Hz} \quad (12)$$

为使测量数据更加准确,将试验电压选取为工频50 Hz和高频10 kHz的1 000 V交流电压。

1. 工频交流电压下分压测试试验

在工频条件下,图3中的RC串联电路中的电容容抗远大于电阻阻抗,晶闸管级的总阻抗Z由电容容抗决定,因此,工频条件下只能测试出电容的

故障。将第一个晶闸管级辅助电路中的 C_{d1} 短接,然后测量各个晶闸管级两端的电压,测量结果如表3所示。

表3 C_{d1} 短接下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	13.5	199.7	199.7	199.7	199.7	199.7
第二组	13.5	199.7	200.0	199.7	199.5	199.6
第三组	13.5	199.7	200.0	199.7	199.5	199.6
第四组	13.5	199.7	200.0	199.7	199.7	199.7
第五组	13.5	199.7	200.0	199.7	199.5	199.7

由表3中的数据可知,第一个晶闸管级辅助电路中的电压与其他晶闸管两端电压差别很大,可以判断第一个晶闸管不能正常工作,需要查找不能正常工作的原因。

将第一个晶闸管级辅助电路中的 C_{d1} 开路,然后测量各个晶闸管级两端的电压,测量结果如表4所示。

表4 C_{d1} 开路下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	230.9	153.9	153.8	153.8	153.8	153.8
第二组	230.9	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8
第三组	230.9	153.9	153.8	153.9	153.9	153.8
第四组	230.9	153.8	153.9	153.8	153.8	153.9
第五组	230.9	153.8	153.8	153.8	153.8	153.9

由表4中的数据可知,第一个晶闸管级辅助电路中的电压与其他晶闸管两端电压差别很大,可以判断第一个晶闸管不能正常工作,需要查找不能正常工作的原因。 C_{d2} 的开路和短路试验现象类似,在此不再赘述。

2. 高频交流电压下分压测试试验

在高频条件下,图3中的RC串联电路中的电阻阻抗远大于电容容抗,晶闸管级的总阻抗Z由电阻阻抗决定,因此,高频条件下只能测试出电阻的故障。将第一个晶闸管级辅助电路中的 R_{d1} 短接,然后测量各个晶闸管级两端的电压,测量结果如表5所示。

由表5中的数据可知,第一个晶闸管级辅助电路中的电压与其他晶闸管两端电压差别很大,可

表5 R_{d1} 短路下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	111.4	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
第二组	111.4	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
第三组	111.4	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
第四组	111.4	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
第五组	111.4	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0

以判断第一个晶闸管不能正常工作,需要查找不能正常工作的原因。

将第一个晶闸管级辅助电路中的 R_{d1} 开路,然后测量各个晶闸管级两端的电压,测量结果如表6所示。

表6 R_{d1} 开路下的试验数据

(单位: V)

晶闸管两端电压	1	2	3	4	5	6
第一组	217.2	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
第二组	217.2	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
第三组	217.2	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
第四组	217.2	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5
第五组	217.2	156.5	156.5	156.5	156.5	156.5

由表6中的数据可知,第一个晶闸管级辅助电路中的电压与其他晶闸管两端电压差别很大,可以判断第一个晶闸管不能正常工作,需要查找不能正常工作的原因。 R_{d2} 的开路和短路试验现象类似,在此不再赘述。

3.3 试验数据分析

上述试验表明,通过本文叙述的测量方法,在晶闸管模块两端分别施加直流电压、工频交流电压及高频交流电压,其中某一个晶闸管级的辅助电路电气性能变化时,可以测量每个晶闸管级两端的电压并与其他晶闸管级的电压进行比较,即可发现其辅助电路的故障,故障晶闸管级辅助电路的电压变化情况,如表7所示。

表7 试验数据分析表

辅助电路元件	直流开路电压	直流短路电压	工频开路电压	工频短路电压	高频开路电压	高频短路电压
R_{dc}	—	0	—	—	—	—
C_{d1}	—	—	变化	变化	—	—
R_{d1}	—	—	—	—	变化	变化

(续)

辅助电路元件	直流开路电压	直流短路电压	工频开路电压	工频短路电压	高频开路电压	高频短路电压
C_{d2}	—	—	变化	变化	—	—
R_{d2}	—	—	—	—	变化	变化

4 结束语

本文对传统的换流阀测试方法进行深入分析,指出了该测试方法存在的问题和不足,通过理论研究提出了新型换流阀均压测试方法。该方法具有如下特点:①利用不同频率电压源对换流阀中晶闸管均压辅助回路进行测试,能快速检测出故障和参数发生变化的元件,可单次对一个阀组件或阀模块完成测试;②在测试电压提高的条件下可对更多数量的晶闸管均压回路完成测试,具有测试效率高、故障定位速度快且故障定位准确等特点;③有效缩短了换流阀晶闸管级辅助电路的检查项目用时,大大节省了时间,提高了工作效率,缩短了检修工期。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 国家电网公司运维检修部. 换流阀及阀控系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 杨晓楠, 郑林, 汤广福, 等. ± 660 kV直流输电工程换流阀控制保护接口技术 [J]. 电力建设, 2011, 32(7): 25-28.
- [4] 罗湘, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 电压源换流器高压直流输电换流阀的试验方法 [J]. 电网技术, 2010(5): 25-29.
- [5] 王维庆, 刘俊勇, 王海云, 等. HVDC换流阀故障特性分析及直流侧100 Hz谐波计算方法研究 [J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 33-38.
- [6] 贺恒鑫, 何俊佳. 用于高压直流输电的晶闸管换流阀运行试验回路等价性比较 [J]. 高压电器, 2006, 42(3): 201-204.

(收稿日期: 2017-02-25) **EA**