

直流输电换流阀晶闸管级阻尼与均压元件快速检测方法

周孝法¹, 施红军¹, 傅 坚², 谢 攀², 闫全全², 黄一铨²

(1. 国网上海市电力公司, 上海市 200122; 2. 国网上海市电力公司检修公司, 上海市 200063)

摘要: 换流阀是直流输电的核心设备,需要定期对其晶闸管级阻尼与均压元件参数进行测量检测。由于换流阀的晶闸管数量众多,传统的检测方法效率低且存在一定安全隐患。文中提出了一种新的检测方法,可以在晶闸管级阻尼与均压元件不解开接线的情况下,在晶闸管级两端施加不同频率的电压信号,生成电路网络方程组,采用加权最小二乘法求解元件参数值。所提方法应用于3种技术路线换流阀的晶闸管级阻尼与均压元件参数的快速检测。仿真和现场实测结果验证了所提检测方法简单、高效且准确度高,能够满足工程应用要求。

关键词: 高压直流输电; 换流阀; 晶闸管级; 阻尼与均压元件; 参数检测

0 引言

换流阀是直流输电系统中实现电能交直流转换的核心设备,被誉为换流站的“心脏”。由于单个晶闸管耐压水平有限,换流阀一般采用多级晶闸管串联结构。同时,还要考虑晶闸管元件的故障率和冗余度来设计换流阀中晶闸管元件数。因此,实际直流输电系统中晶闸管级单元数量庞大,一个换流站内晶闸管的数量可达2 000~3 000只^[1]。

为保证换流阀中多个晶闸管级间电压分布均匀,采用了阻尼、均压电路等措施,以确保在直流、交流、操作、雷电、陡波及其联合电压作用下晶闸管级间电压分布尽可能一致^[2-4]。根据换流阀检修标准要求,需要定期检测阻尼和均压元件的参数值,而传统的检测方法无法满足换流阀检修标准要求,因此,有必要研发快速有效的现场检测方法^[5-9]。

本文提出了一种换流阀晶闸管级阻尼与均压电路元件参数快速检测方法,可以在不解开晶闸管级元器件接线的情况下,在晶闸管级两端施加不同频率的电压信号,生成电路网络方程组,采用加权最小二乘法^[10-15]求解元件参数值,并进一步判断出其参数值是否在标准规定范围内。将该方法应用于3种技术路线的换流阀,进行了仿真和现场样机试验验证,结果证明所提检测方法简单、高效且准确度高,

可以满足实际工程应用要求。

1 晶闸管级阻尼与均压电路分析

换流阀采用多个晶闸管级串联连接,每一级的晶闸管都应当承受相近的电压。阻尼与均压电路一方面能确保阀在承受从直流到冲击波形所有频率的电压时各晶闸管级电压均匀分布,另一方面还用于控制触发和恢复期间的电压、电流暂态应力。

1.1 技术路线1换流阀晶闸管级阻尼与均压电路

换流阀晶闸管级阻尼与均压电路包括与晶闸管元件并联的2个RC阻尼电路和直流均压电阻,如图1所示。图中: R_{d2} 和 C_{d2} 所在支路为主阻尼电路, R_{d1} 和 C_{d1} 所在支路为高频分量提供阻尼。这种双阻尼电路设计增强了阻尼作用的可靠性,使阻尼电路适用于更宽频率范围的电压^[16]。

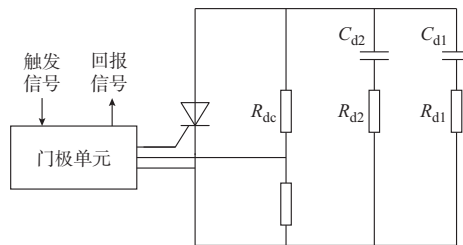


图1 晶闸管级电气原理图(技术路线1)

Fig. 1 Thyristor-level electrical schematic diagram (technical route 1)

RC阻尼电路使阀电压在每个晶闸管两端均匀分配,为门极单元提供工作电源,限制晶闸管关断时的反向恢复电压过冲,使阀能够耐受正常和非正常负载条件下的应力。

收稿日期: 2019-10-07; 修回日期: 2020-08-08。

上网日期: 2020-10-22。

国家电网公司科技项目(SGSHJX00KXJS1800759);已申请国家发明专利(申请号:2019102529864)。

直流均压电阻 R_{dc} 为门极单元提供晶闸管电压的测量采样,同时使阀承受的低频电压分量在每个晶闸管两端均匀分配。

1.2 技术路线2换流阀晶闸管级阻尼与均压电路

技术路线2换流阀晶闸管级阻尼与均压电路如图2所示,与技术路线1的不同之处在于阻尼电容由 C_1, C_2 和 C_3 组成。 C_1 起到分压作用; C_2 和 R_2 串联构成回路,承担换流阀回路中的阻尼作用,防止由于过电压而损坏晶闸管,同时对整个换流阀模块起到动态均压的作用;阻尼电容 C_3 和快速取能电阻 R_3 串联构成快速取能回路; R_{dc1} 和 R_{dc2} 为直流均压电阻。

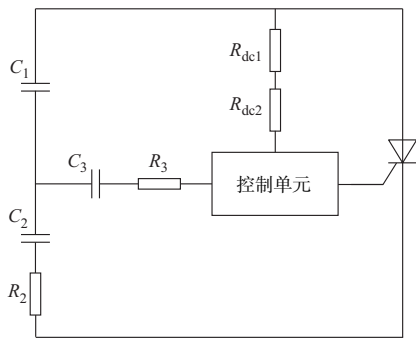


图2 晶闸管级电气原理图(技术路线2)

Fig. 2 Thyristor-level electrical schematic diagram (technical route 2)

1.3 技术路线3换流阀晶闸管级阻尼与均压电路

技术路线3换流阀晶闸管级阻尼与均压电路如图3所示。

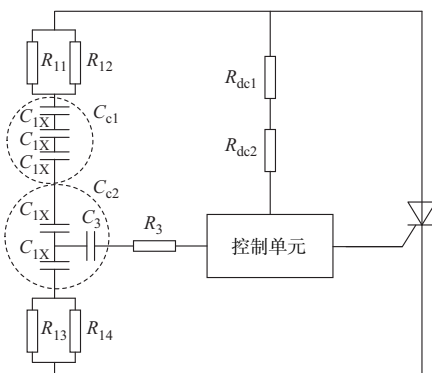


图3 晶闸管级电气原理图(技术路线3)

Fig. 3 Thyristor-level electrical schematic diagram (technical route 3)

图3中: $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}$ 和 C_{c1}, C_{c2} 构成晶闸管级单元阻尼回路; R_{dc1} 和 R_{dc2} 构成晶闸管级单元均压回路; R_3 和 C_3 构成控制单元取能回路。技术路线3的直流均压回路和取能回路与技术路线2基本相同,阻尼回路增加 R_{11}, R_{12} 和 C_{c1} 以改善暂态特性。

1.4 传统的阻尼与均压元件参数检测方法

目前,换流阀生产厂家提供的专用换流阀测试仪具备综合阻抗检测功能,主要是检测晶闸管两端的阻尼与均压电路是否存在短路或者开路情况。测试方法是在不解开阻尼和均压元件电气连接线情况下,在晶闸管级两端施加不同频率(50~100 kHz)的电压,检测各频率正弦信号对应的峰值电压和电流,计算该频率对应的综合阻抗值。

$$Z(f_i) = \frac{U_{\text{peak}}(f_i)}{I_{\text{peak}}(f_i)} \quad (1)$$

式中: $Z(f_i)$ 为测试频率为 f_i 时的综合阻抗, $i=1, 2, \dots, n$; $U_{\text{peak}}(f_i)$ 为峰值电压; $I_{\text{peak}}(f_i)$ 为峰值电流。

这种采用专用测试仪的方法只能检测晶闸管级阻尼与均压电路的综合阻抗,给出定性判断,而无法测量出单个元器件的参数,进而给出其是否合格或存在故障的定量判断。

另一种方法是解开阻尼和均压元件电气连接线,使用万用表或电容表测量单只元件,这种方法容易造成恢复电路接线时接头接触电阻超标等问题,存在安全隐患,而且测试工作量大、效率很低。

2 晶闸管级阻尼与均压电路元件参数快速检测方法

为实现在不解开晶闸管级元件接线的情况下,进行晶闸管级阻尼电阻、阻尼电容和直流均压电阻各个参数值的快速测量,本文提出了在晶闸管级两端施加不同频率的电压信号,生成电路网络方程组,然后采用加权最小二乘法求解元件参数值的快速检测方法。

2.1 检测原理

图4所示是阀组件电气原理图,图中TU指晶闸管门极单元。检测方法是在图中所示1和2处施加电压信号,采集每个晶闸管级的电压和电流。

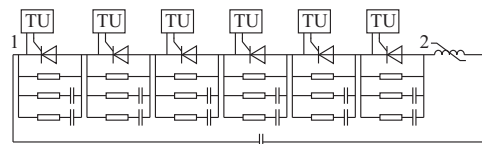


图4 阀组件电气原理图

Fig. 4 Electrical schematic diagram of valve component

直流均压电阻求解比较简单,只需要在阀组件两端施加直流信号,由于电容能隔断直流电流,RC阻尼电路相当于开路,根据此时测量的晶闸管级电压、电流即可计算出 R_{dc} 。

对于RC阻尼电路的参数求解相对复杂,由于

其阻抗跟随频率变化,通过在晶闸管级两端施加幅值为 U 的不同频率的正弦电压信号,可得到多组有功、无功功率方程组,对方程组求解,即可得到阻尼电阻、阻尼电容参数值。

上述检测方法,不需要解开各元件电气连接线,只需要测量晶闸管级端电压、电流,即可计算出阻尼与均压电路元件参数值,而且可以一次性得出阀组件内所有晶闸管级的参数值,达到快速检测阻尼与均压元件参数的目的。

2.2 阻尼与均压电路方程求解

2.2.1 技术路线1换流阀等效电路

技术路线1换流阀的晶闸管级阻尼和均压元件等效电路如图5所示。

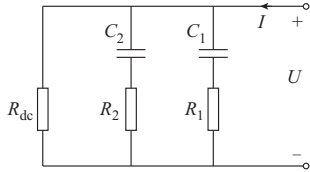


图5 阻尼与均压元件等效电路图(技术路线1)
Fig. 5 Equivalent circuit diagram of damping and voltage balancing components (technical route 1)

R_1 和 C_1 支路的有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 分别为:

$$P_1 = U^2 \frac{R_1 \omega^2 C_1^2}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} \quad (2)$$

$$Q_1 = U^2 \frac{\omega C_1}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} \quad (3)$$

式中: ω 为施加电压信号的角频率。

R_2 和 C_2 支路的有功功率 P_2 和无功功率 Q_2 分别为:

$$P_2 = U^2 \frac{R_2 \omega^2 C_2^2}{1 + R_2^2 \omega^2 C_2^2} \quad (4)$$

$$Q_2 = U^2 \frac{\omega C_2}{1 + R_2^2 \omega^2 C_2^2} \quad (5)$$

R_{dc} 支路的有功功率 P_3 为:

$$P_3 = \frac{U^2}{R_{dc}} \quad (6)$$

则在幅值为 U 的不同频率正弦电压信号下,可得到总有功功率 P 和无功功率 Q 为:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U^2 \left(\frac{R_1 \omega^2 C_1^2}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} + \frac{R_2 \omega^2 C_2^2}{1 + R_2^2 \omega^2 C_2^2} + \frac{1}{R_{dc}} \right) \quad (7)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = U^2 \left(\frac{\omega C_1}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} + \frac{\omega C_2}{1 + R_2^2 \omega^2 C_2^2} \right) \quad (8)$$

2.2.2 技术路线2换流阀等效电路

技术路线2换流阀的晶闸管级阻尼和均压元件等效电路如图6所示。

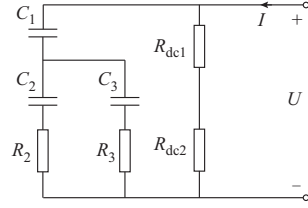


图6 阻尼与均压元件等效电路图(技术路线2)
Fig. 6 Equivalent circuit diagram of damping and voltage balancing components (technical route 2)

参考技术路线1的求解方法,可以推导出在幅值为 U 的不同频率正弦电压信号下的总有功功率、无功功率。计算式简化为:

$$P = U^2 \left(\frac{A_1 A_3 + A_2 A_4}{A_3^2 + A_4^2} + G_1 \right) \quad (9)$$

$$Q = U^2 \frac{A_2 A_3 - A_1 A_4}{A_3^2 + A_4^2} \quad (10)$$

式中: A_1, A_2, A_3, A_4 和 G_1 的具体计算式见附录A。

2.2.3 技术路线3换流阀等效电路

技术路线3换流阀的晶闸管级阻尼和均压元件等效电路如图7所示。将图3中 C_{c1} 的3个电容合并为1个电容 C_1 , 将 C_{c2} 的3个电容分别等效为 C_{21}, C_{22} 和 $C_{23}, R_{11} // R_{12}$ 等效为 $R_1, R_{13} // R_{14}$ 等效为 R_2 。

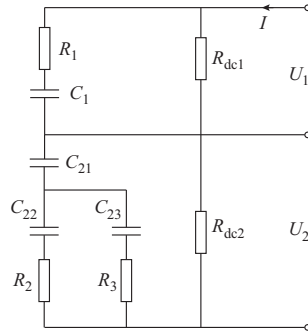


图7 阻尼与均压元件等效电路图(技术路线3)
Fig. 7 Equivalent circuit diagram of damping and voltage balancing components (technical route 3)

根据图7,在阀组件两端施加直流信号,测量晶闸管级电压、电流即可计算出直流均压电阻。由于 C_1 和 C_{21} 串联关系,需要测试 C_1 和 C_{21} 连接点电压,然后将等效电路分成两部分求解元件参数。

R_1 和 C_1 支路的有功功率和无功功率分别为:

$$P_1 = U_1^2 \frac{R_1 \omega^2 C_1^2}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} \quad (11)$$

$$Q_1 = U_1^2 \frac{\omega C_1}{1 + R_1^2 \omega^2 C_1^2} \quad (12)$$

$C_{21}, C_{22}, C_{23}, R_2$ 和 R_3 所在支路原理图与技术路线 2 换流阀的相同, 该支路的有功功率 P_2 和无功功率 Q_2 分别为:

$$P_2 = U_2^2 \left(\frac{B_1 B_3 + B_2 B_4}{B_3^2 + B_4^2} + G_2 \right) \quad (13)$$

$$Q_2 = U_2^2 \frac{B_2 B_3 - B_1 B_4}{B_3^2 + B_4^2} \quad (14)$$

式中: B_1, B_2, B_3, B_4 和 G_2 的具体计算式见附录 A。

2.3 阻尼与均压元件参数求解

本文采用加权最小二乘法, 对于在幅值为 U 的不同频率正弦电压信号下的电路网络方程组进行求解, 进而计算出电路的电阻、电容参数。

2.3.1 加权最小二乘法求解方法

在给定电压情况下测量量为有功功率 \hat{P} 、无功功率 \hat{Q} 的测量误差为:

$$\Delta P = \hat{P} - P(R, C) \quad (15)$$

$$\Delta Q = \hat{Q} - Q(R, C) \quad (16)$$

式中: ΔP 为有功功率测量误差; $P(R, C)$ 为有功功率, R 和 C 分别为待求电阻和电容值; ΔQ 为无功功率测量误差; $Q(R, C)$ 为无功功率。

对于不同技术路线, $P(R, C)$ 分别采用式(7)、式(9)、式(11)、式(13)求解; $Q(R, C)$ 分别采用式(8)、式(10)、式(12)、式(14)求解。

根据加权最小二乘法, 定义各量测量的误差平方和为目标函数:

$$J(R, C) = \sum_{i=1}^n \Delta P^2 + \sum_{i=1}^n \Delta Q^2 \quad (17)$$

式中: n 为不同频率注入电压信号的个数。

由于 $P(R, C)$ 和 $Q(R, C)$ 为 R 和 C 的非线性函数, 无法直接计算 R 和 C , 需要用迭代的方法求解。

先假定状态量初值为 $R^{(0)}$ 和 $C^{(0)}$, 将 $P(R, C)$ 和 $Q(R, C)$ 在 $R^{(0)}$ 和 $C^{(0)}$ 处用泰勒级数展开后将其线性化, 使目标函数最小, 从而求得 R 和 C 初值测量误差 $\Delta R^{(0)}$ 和 $\Delta C^{(0)}$, 得到修正方程式:

$$\begin{bmatrix} R^{(1)} \\ C^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^{(0)} \\ C^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R^{(0)} \\ \Delta C^{(0)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $R^{(1)}$ 和 $C^{(1)}$ 分别为 R 和 C 经一次迭代后的值。

$R^{(0)}$ 和 $C^{(0)}$ 取阻尼与均压电路元器件的设计参数额定值(可方便地从换流阀说明资料或元器件的铭牌上获得, 事先一次性录入基于本文方法研制的测试仪样机中), 然后继续迭代计算; 第 k 次迭代后, 若满足迭代终止判据 $|\Delta(R, C)^{(k)}| < \epsilon$ (ϵ 为判据阈值), 则结束迭代计算, 给出阻尼、均压电路的电阻 R 和电容 C 的参数值计算结果; 若不满足迭代终止判

据, 则继续进行迭代计算, 直至最终满足迭代终止判据。具体求解步骤见附录 A。

2.3.2 测量频率的设定

对于 R 和 C , 电阻 R 不受频率影响, 而容抗大小与频率成反比。所以低频时容抗大, 电阻效应不明显, 采用工频 50 Hz 时电路综合阻抗以容抗为主, 随着频率增大, 在高频时容抗很小, 超过 100 kHz, 电路综合阻抗以阻性为主。在最低与最高频率之间, 适当增加测量点, 电阻与电容耦合效应明显。因此, 测量频率应当同时包括低频、高频及中间频率, 否则会影响计算精度。

3 仿真及现场测试

为验证算法的正确性, 以技术路线 1 换流阀为例, 使用 MATLAB 软件搭建换流阀组件模型。根据上述算法编写程序求解阻尼电阻、电容参数值。

由于待求解的参数为 5 个, 在电路网络施加幅值为 100 V 的 5 个不同频率电压信号, 得到总有功功率和无功率值, 见附录 A 表 A1。计算得到阻尼与均压元件参数值, 见附录 A 表 A2。由表 A2 可见, 仿真计算结果与额定值最大偏差为 0.21%, 精度较高。

按照本文所提出的方法研制出换流阀晶闸管级阻尼与均压元件参数测试仪样机。为进一步验证其有效性和准确性, 选取国内某 ± 500 kV 换流站进行了现场实测。该换流站采用技术路线 2 换流阀, 由图 2 可知, 除去直流均压电阻外, 还有 5 个未知参数, 因此设置 6 个频率。根据换流阀检修的标准要求, 将元件参数测量偏差设定为 1%, 据此设定 $\epsilon = 0.002$ 。

结合换流站年度大修, 现场对单极的一相换流阀塔的 480 个晶闸管级进行了测试, 测试结果与额定值偏差在 $\pm 1\%$ 以内, 符合相关标准要求。以其中一个晶闸管级电路为例, 施加 6 个不同频率的电压信号, 得到的 6 组有功功率和无功率值见附录 A 表 A3, 得到阻尼与均压元件参数检测结果见附录 A 表 A4。为了验证其检测精度, 解开阻尼和均压元件电气连接线, 使用数字万用表进行测量, 检测结果见表 A4, 可见测量偏差均在 $\pm 1\%$ 以内, 精度满足工程应用要求。

另外, 为验证本文所提出测试方法的适应性, 选取某一晶闸管级阻尼回路, 在阻尼电容 C_2 上并接可调电容器作为新的 C_2 , 在阻尼电阻 R_2 上并接可调电阻器作为新的 R_2 , 改变 C_2 和 R_2 的值, 用本文所提测试方法和解开元件电气连接线使用数字万用表分别进行测试, 测试结果见表 1。

表1 2种测试方法测试结果
Table 1 Testing results of two test methods

元件	解开连接线测量值	本文方法测量			
		$\epsilon = 0.002$		$\epsilon = 0.001$	
		测量值	偏差/%	测量值	偏差/%
C_2	5.00 μF	5.02 μF	0.40	5.00 μF	0
	6.00 μF	6.04 μF	0.67	6.01 μF	0.17
	8.00 μF	8.07 μF	0.88	8.03 μF	0.38
R_2	24.00 Ω	24.10 Ω	0.42	24.02 Ω	0.08
	15.00 Ω	15.15 Ω	1.00	15.04 Ω	0.27
	6.00 Ω	6.07 Ω	1.17	6.03 Ω	0.50

由表1可以看出,随着元件参数值偏离设计额定值越大(模拟元件老化或损坏导致 C_2 参数偏离设计额定值达200%, R_2 参数偏离设计额定值达80%),采用本文方法得到的测量值偏差越大,当算法的迭代终止判据取 $\epsilon = 0.002$ 时,最大偏差可达1.17%。当减小迭代终止判据时可减小测量偏差,如当取 $\epsilon = 0.001$ 时,测量偏差已显著减小,测量精度足够准确定位故障元件。当然,随着迭代终止判据的减小,计算迭代次数将增加,测量耗时也将有所增加,经实测取 $\epsilon = 0.001$ 比 $\epsilon = 0.002$ 测量耗时增加约5.5 s左右,对测量快速性影响不大。

可见,本文所提出的方法由于不需要解开阻尼与均压回路电气连接线,大大简化了检测流程,提高了工作效率,同时也避免了接头复引导致接触电阻不合格带来的接头发热故障隐患。

4 结语

本文介绍了3种技术路线换流阀晶闸管级阻尼与均压元件参数传统测试方法。通过分析晶闸管级阻尼与均压电路电气结构及特性,提出了一种快速参数检测方法。在不解开电气连接线的情况下,通过在晶闸管级两端施加不同频率的正弦波电压信号,获得阻尼与均压支路的有功功率和无功功率方程组,采用加权最小二乘法求解该方程组并得到元件参数。所提方法能够实现换流阀晶闸管级阻尼与均压元件参数的快速、安全检测,对高压直流输电工程建设、检修等工作具有参考意义。随着应用中检测数据的积累,辅以大数据分析等智能算法,可提升换流阀晶闸管级阻尼与均压元件的隐患预警能力。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 杨晓楠,汤广福,彭玲,等.±660 kV直流输电工程换流阀电气

设计综述[J].电力建设,2011,32(7):89-91.

YANG Xiaonan, TANG Guangfu, PENG Ling, et al. Review of thyristor valve design for ±660 kV HVDC transmission project[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(7): 89-91.

[2] 姜彦涛,刘宁,王江平.两种结构形式特高压换流阀均压设计对比分析[J].高压电器,2016,52(10):153-157.

LOU Yantao, LIU Ning, WANG Jiangping. Comparative analysis on grading design of two different structural HVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 153-157.

[3] 查鲲鹏,高冲,汤广福,等.哈密南-郑州特高压直流输电工程晶闸管阀设计与试验[J].电力建设,2014,35(12):54-60.

ZHA Kunpeng, GAO Chong, TANG Guangfu, et al. Design and test of thyristor valve for southern Hami-Zhengzhou ±800 kV/5 000 A UHVDC transmission project [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 54-60.

[4] 李侠,SACHS G,UDER M.±800 kV特高压直流输电用6英寸大功率晶闸管换流阀[J].高压电器,2010,46(6):1-5.

LI Xia, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for ±800 kV UHVDC transmission [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.

[5] 樊宏伟,王红青,孟学磊,等.UHVDC换流阀晶闸管级阻抗检测仪设计与实现[J].信息技术,2015,11:65-72.

FAN Hongwei, WANG Hongqing, MENG Xuelei, et al. Design and implementation of thyristor level impedance detector in UHVDC converter valve[J]. Information Technology, 2015, 11: 65-72.

[6] 查鲲鹏,高冲,温家良,等.宁东至山东±660 kV直流输电工程晶闸管阀运行试验[J].电网技术,2012,36(2):13-16.

ZHA Kunpeng, GAO Chong, WEN Jialiang, et al. Operational tests of thyristor valves for ±660 kV DC power transmission project from Ningdong to Shandong [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 13-16.

[7] 王华昕,汤广福,蓝元良,等.限流器晶闸管阀过电流试验等效机理及方法[J].电力系统自动化,2011,35(12):80-94.

WANG Huaxin, TANG Guangfu, LAN Yuanliang et al. Equivalent mechanism and approach of over-current tests on thyristors of fault current limiters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 80-94.

[8] 郭贤珊,李探,李高望,等.张北柔性直流电网换流阀故障穿越策略与保护定值优化[J].电力系统自动化,2018,42(24):196-201.

GUO Xianshan, LI Tan, LI Gaowang, et al. Fault ride-through strategy and protection setting optimization of converter valve for Zhangbei VSC-HVDC grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 196-201.

[9] 查鲲鹏,周万迪,高冲,等.高压直流换流阀例行试验方法研究及工程实践[J].电网技术,2013,37(2):465-470.

ZHA Kunpeng, ZHOU Wandi, GAO Chong, et al. Research on routine test of HVDC converter valve and its engineering practice [J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 465-470.

[10] 曹磊,赵庆生,王旭平,等.基于改进泰勒加权最小二乘法的相量测量算法[J].电力系统保护与控制,2018,46(7):24-30.

CAO Lei, ZHAO Qingsheng, WANG Xuping, et al. A phasor measurement algorithm based on improved Taylor weighted least squares [J]. Power System Protection and Control, 2018,

- 46(7): 24-30.
- [11] 黎小林, 曹侃, 谢开贵, 等. 基于最小二乘法的高压直流输电系统可靠性灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 12-16.
LI Xiaolin, CAO Kan, XIE Kaigui, et al. Sensitivity analysis of HVDC transmission system reliability using the least square method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 12-16.
- [12] 罗琴琴, 苏建徽, 林志光, 等. 基于递推最小二乘法的虚拟同步发电机参数辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 215-221.
LUO Qin, SU Jianhui, LIN Zhiguang, et al. Parameter identification method for virtual synchronous generators based on recursive least squares algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 215-221.
- [13] 龚成明, 於益军, 路铁, 等. 加权最小二乘状态估计量测权值计算的实用方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 143-147.
GONG Chengming, YU Yijun, LU Yi, et al. Practical method for calculating measurement weights in weighted least square state estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 143-147.
- [14] 谢仕伟, 胡志坚, 吴方劫, 等. 基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 26-34.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 26-34.
- [15] 李霄, 王昕, 郑益慧, 等. 基于改进最小二乘支持向量机和预测误差校正的短期风电负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 63-69.
LI Xiao, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Short-term wind load forecasting based on improved LSSVM and error forecasting correction [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 63-69.
- [16] 周亮, 张蕴馨, 林志光, 等. 交流系统故障下高压直流输电晶闸管触发监测单元储能方式[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 160-164.
ZHOU Liang, ZHANG Yunxin, LIN Zhiguang, et al. Energy storage method of thyristor triggering and monitoring unit for HVDC transmission system with fault of AC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 160-164.

周孝法(1973—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 高压直流输电。E-mail: jackiezhou_no.1@163.com
施红军(1976—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 交直流电网建设技术与管理。E-mail: 13621926960@126.com
傅 坚(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 高压直流输电。E-mail: jfu_1@163.com

(编辑 代长振)

Fast Inspection Method for Thyristor-level Damping and Voltage Balancing Components of DC Transmission Converter Valve

ZHOU Xiaofa¹, SHI Hongjun¹, FU Jian², XIE Pan², YAN Quanquan², HUANG Yicheng²

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

2. Maintenance Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200063, China)

Abstract: The converter valve is the core equipment of DC transmission, and parameters of its thyristor-level damping and voltage balancing components need to be measured and tested regularly. Due to the large number of thyristors in the converter valve, traditional inspection methods are inefficient and have certain safety risks. In this paper, a new inspection method is proposed, which can apply voltage signals of different frequencies at both ends of the thyristor-level without disconnecting the wiring of the thyristor-level damping and voltage balancing components to generate a circuit network equation set, using the weighted least squares method to solve component parameters. The proposed method is applied to the rapid inspection of thyristor-level damping and voltage balancing component parameters of converter valves in three technical routes. The results of simulation and field measurement verify that the proposed inspection method is simple, efficient and highly accurate, and can meet engineering requirements.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGSHJX00KXJS1800759).

Key words: high-voltage direct current (HVDC) transmission; converter valve; thyristor-level; damping and voltage balancing component; parameter test

