[GIL]

特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压的影响

文/杨涛
中油电能供电公司生产部

由于特高压气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）的短路电流幅值大、短路时间长，其内部发生的过电压幅值较高，导致断路器的瞬态恢复电压（TRV）超过额定值。因此，对特高压GIL和断路器瞬态恢复电压的概述进行分析，并探讨特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压的影响。

随着我国特高压电网建设的不断推进，特高压直流输电工程得到了进一步发展，对特高压线路中的气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）的运行稳定性和可靠性提出了更高的要求，以实现特高压直流输电技术向远距离、大容量方向发展。目前国内在大力开展特高压GIL相关技术的研究和应用。

特高压GIL的概述

1. 特高压GIL的结构和工作原理

1）特高压GIL的结构：这是一种具有高绝缘性能和大通流容量的新型电力设备，其中直流高压端为控制保护系统，由绝缘子、静电场屏蔽和绝缘套管等组成。

2）特高压GIL的工作原理。静电场屏蔽在高压端形成非常高的电场，使得高压气体在通过绝缘套管时产生局部放电现象，并抑制气体绝缘设备的其他操作过电压；绝缘子采用大半径、高强度的铝合金材料制作，其主要作用是承受静电场和局部放电；支柱绝缘子采用高压铝合金材料，其主要作用是承受静电场和局部放电，并抑制其他操作过电压；绝缘套管承受高压气体的压力，是高压气体通过绝缘套管时的保护。

2. 特高压GIL的电气特性

特高压GIL的电气特性包括绝缘介质的介质损耗因数、击穿电压和击穿电流等，主要由特高压GIL中的气体介质和绝缘件决定。由于特高压GIL的介质损耗因数远低于金属氧化物避雷器，可认为其绝缘性能很好，是一种理想的绝缘体，但由于特高压GIL中气体介质的气体含量高，所以其绝缘件与金属导体之间的空间电荷量很大。如果不考虑电场的影响，气体绝缘金属封闭开关设备中的电场分布很复杂。与此同时，由于电场强度很高，如果采用工频交流电压，那么由于高场强下气体介质的非线性特性，在气体介质中将产生很多由空间电荷引起的局部放电，对特高压GIL中绝缘件的局部击穿产生很大的影响。

3. 特高压GIL的优势

特高压GIL采用了多个换流阀，换流阀数量的增加使其换流能力显著提高，进而提高了GIL的输送容量，而且特高压GIL具有良好的通流能力、短路能力和能量传输能力，并具有高可靠性，其技术难度和造价成本相对较低。与常规的直流输电方式相比，特高压GIL具有以下优势。

1）节省输电走廊。在一些环境污染较严重的地区，特高压GIL能有效地减少输电走廊和提高输送

容量。

2）降低设备投资和运行成本。特高压GIL的换流阀是由多个开关元件并联组成的，单个开关元件的动作次数少，运行中开关损耗也比较小，降低了设备运行成本。

3）提高设备运行的可靠性。由于特高压GIL技术要求较高，其生产、安装、调试和维护都必须有较高的技术水平和质量要求，而这些都可以通过特高压GIL来实现。

4）可实现资源共享。我国幅员辽阔、资源丰富，在同一地点可建立多个特高压GIL系统。

断路器瞬态恢复电压的概述

1. 断路器的工作原理

断路器作为一种电力设备，具有短路开断、过载保护、分断故障电流以及过电压保护等功能，是电力系统中重要的控制和保护设备。断路器主要由灭弧室、绝缘支撑件、触头系统和机械传动部分等组成，灭弧室是断路器的核心部件，主要作用是将电弧限制在绝缘支撑件内并熄灭，然后由绝缘支撑件传递到触头系统，包括多个触头、分相限位装置等。断路器的灭弧原理是将电弧限制在绝缘支撑件内，同时利用绝缘支撑件传递到触头系统，使电弧熄灭后能够及时转移到下一个触头系统中继续燃烧，断路器的灭弧过程主要包括：开断、转移、重燃和自灭弧等过程。

2. 断路器瞬态恢复电压的产生机制

在断路器触头断开过程中，由于触头材料、温度等因素的影响，会产生暂态恢复电压（TRV），该电压的大小与触头材料、温度等因素有关，一般可分为两个部分。

1）电弧熄灭瞬间的TRV。当断路器在开断时，在触头金属面的电弧熄灭瞬间，由于触头金属表面产生的温度差以及空气中存在的空气热容以及电极间的电容效应等原因，使得金属面产生了瞬时高温。此时，触头金属面形成了一个由大到小的温度梯度，当这个梯度与电弧电压相平衡时，就会产生TRV。

2）触头分断过程中的TRV。触头分断时，在电弧熄灭瞬间，触头表面温度迅速降低，电弧的电阻迅速减小，电流迅速增加，电弧在电流作用下运动到触头分断过程的最大位置处，触头的表面形成了一个由大到小的温度梯度。

特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压的影响

1. 特高压GIL接入对断路器操作过电压的影响

特高压GIL接入电力系统后，其内部短路电流幅值大、短路时间长，导致断路器在开断过程中产生的瞬态TRV超过额定值，其中特高压GIL安装在架空线中段示意图如图1所示。

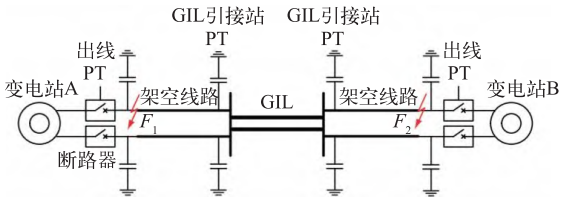

图1　特高压GIL安装在架空线中段示意

特高压GIL接入对断路器TRV的影响主要表现在以下几个方面。

1）增大断路器操作过电压幅值。特高压GIL内部短路电流幅值较大，导致断路器在开断过程中产生的操作过电压幅值增大。根据操作过电压的产生机制，可知操作过电压与电流的大小有关，而电流大小与短路电流幅值有关。因此，特高压GIL接入会导致断路器操作过电压幅值增大。

2）延长断路器操作过电压持续时间。特高压GIL内部短路时间较长，使得断路器在开断过程中需要承受较长时间的过电压。根据操作过电压的产生机制，可知操作过电压持续时间与短路时间有关。因此，特高压GIL接入会导致断路器操作过电压持续时间延长。

3）增加断路器设备损耗和故障风险。特高压GIL接入导致断路器操作过电压幅值和持续时间增大，这将增加断路器设备的损耗，降低设备寿命，并增加故障风险。过高的TRV可能导致断路器不能正常跳闸，影响电网运行的稳定性和安全性。

2. 特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压波形的影响

在特高压GIL中，断路器瞬态恢复电压波形可以达到数千安培，断路器分断时产生的冲击电压也可以达到数千伏，其中典型的波形如图2所示。

但是特高压GIL的引入加速了TRV波形的变化，主要体现在以下三个方面：

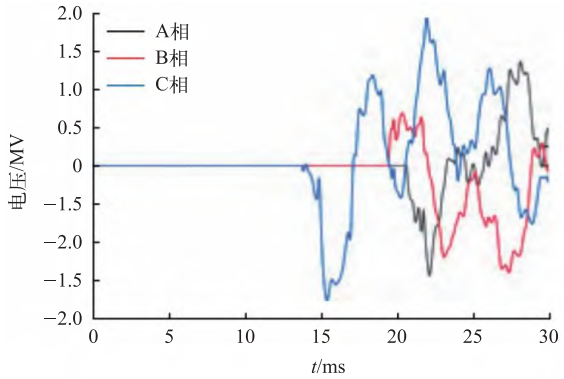

图2　TRV典型波形

1）TRV波形峰值增大。特高压GIL中的短路电流幅度很大，因此断路器分断时TRV波形高峰值也会增加，所以断路器工作时将面临更大的电压峰值，这将导致设备的损失和失效。

2）TRV波形上升速度加快。特高压GIL的直流输电线路的引入，使其短路电流大幅增加，从而加速了停弧时刻的TRV升高。与此同时，快速升高的温升会引起接触表面温度梯度的快速变化，这将增加接触表面的磨损，缩短接触寿命。

3）TRV波形持续时间延长。由于特高压GIL具有很长的内部短路时间，因此其中的断路器在开断时要经受很长一段时间的过电压，所以会使得TRV波形的时间变长，因此在很大程度上增加了断路器装置的损坏和失效的危险。

3. 特高压GIL接入对断路器性能的影响

由于特高压GIL内部短路电流大且时间长，所以断路器需要具备更高的灭弧能力和更快的分断速度，以应对特高压GIL接入带来的挑战。与此同时，特高压GIL接入导致断路器承受的操作过电压幅值和持续时间增大，这对断路器的设计和制造提出了更高的要求，所以人们需要采用更先进的技术和材料，以提高断路器的耐压能力和可靠性。此外，特高压GIL接入电力系统后，断路器需要承受较大的操作过电压，这将导致设备的损耗增大，而且特高压GIL接入对断路器性能的要求较高，因此对运行人员的技术水平和操作规范也提出了更高的要求。同时，特高压GIL接入导致的操作过电压幅值和持续时间的增大，将加速断路器设备的损耗，降低设备的寿命，而且过高的TRV可能导致断路器不能正常跳闸，影响电网运行的稳定性和安全性。

4. 特高压GIL绝缘特性对断路器瞬态恢复电压的影响

特高压GIL的绝缘特性是影响其能否正常运行的关键因素，所以人们必须从绝缘材料的耐压性能、绝缘层的均匀性和绝缘电阻等方面分析其对断路器瞬态恢复电压的影响。

1）绝缘材料的耐压性能。特高压GIL所使用的绝缘材料需要具备较高的耐压性能，以承受断路器操作过程中产生的高电压。当特高压GIL接入电力系统时，其内部短路电流大，导致断路器产生的瞬态TRV增大，这对绝缘材料的耐压性能提出了更高的要求。若绝缘材料耐压性能不足，可能导致绝缘击穿，进而影响断路器的正常运行。

2）绝缘层的均匀性。特高压GIL的绝缘层需要具备较好的均匀性，以减小电场分布不均引起的局部放电。当特高压GIL接入电力系统时，断路器分断过程中产生的高电压可能导致绝缘层内部电场分布不均，从而引发局部放电，而且局部放电会加速绝缘材料的损伤，降低绝缘层的绝缘性能，甚至可能导致绝缘击穿。

3）绝缘电阻。特高压GIL的绝缘电阻对其耐压性能和绝缘性能具有重要意义，因为断路器分断过程中产生的高电压可能导致绝缘电阻降低，而且绝缘电阻的降低会增加绝缘层的泄漏电流，进而影响断路器的正常运行。

4）绝缘寿命。由于特高压GIL接入电力系统后，断路器承受的操作过电压幅值和持续时间增大，这将加速绝缘材料的衰老，降低绝缘寿命，所以在设计特高压GIL时，需要充分考虑绝缘材料的耐压性能、均匀性、电阻和寿命等因素。

结束语

总之，为提高特高压GIL的可靠性和安全性，应该改善特高压GIL内部电场分布，避免因电场集中而产生局部过电压现象，同时提高GIL的绝缘水平，采取有效的防护措施，降低GIL内部过电压的影响。与此同时，提高断路器的开断能力，优化开断间隙和动作时序，有效控制断路器动作时产生的过电压，以保证特高压GIL能够在实际电网中安全运行。

（收稿日期：2024-04-25）