

高压直流输电系统极母线高阻接地故障仿真研究

高阻接地故障作为高压直流输电系统、超高压直流输电系统常见线路故障类型,由于目前故障检测方法有限,容易造成保护误动作,直接闭锁直流系统。以直流输电系统高阻接地为出发点展开分析,以PSCAD为基础分析工具,分别模拟不同高阻接地故障工况下直流故障特性,并总结故障规律,对应给出改进措施,防止类似保护误动作发生,造成暂态故障情况下,直流系统误闭锁。

李 燕¹ 汪从孝² 龙 洋¹/1.重庆电力工程学院 2.重庆电力公司



李 燕/讲师

关键词/Keywords

高阻接地 ·
PSCAD ·
直流输电 ·
直流电压 ·
直流电流 ·

高压直流输电系统以其直流输送容量大、直流输送距离远、直流功率可调节及对交流系统短路容量无影响等优点,在我国电网互联、能源优化配置等领域占领重要角色。未来,随着 ± 800 kV特高压直流输电系统、 ± 1100 kV超高压直流输电系统投入运行,直流输电系统在我国远距离、大容量电力传输方面,将发挥越来越重要作用。从另一个方面讲,直流输电系统在发挥大容量、长距离功率传输优势同时,其停运也将给大容量电力传输甚至区域电网稳定运行带来重大影响。如存在送端甩负荷,受端切负荷隐患。直流线路高阻接地故障,作为一种常见直流故障类型,如雷击、山火等故障类型,均容易造成直流线路瞬时接地故障,对于此类暂时性故障,一般可以通过直流线路故障重起动策略,恢复直流输电系统运行,可以避免不必要的停运。

然而,由于高阻故障异于一般直流系统故障类型,如换向失败、阀短路等故障,发生直流线路高阻接地后,受接地电阻阻值等因素影响,故障特性不

明显,某些故障控制工况线路保护无法正常起动,易形成其他保护误动作,直接闭锁直流系统,造成直流系统永久停运,影响直流功率传输。

本文将以直流极母线高阻接地故障为分析切入点,模拟不同高阻接地情况下,对直流电压、直流电流形态变化进行研究分析,总结规律,为直流线路相关保护策略设计优化提供理论依据。下面,将以PSCAD为基础分析工具,对不同高阻接地故障进行模拟仿真。

直流输电运行控制机理分析

图1为换流站两端典型控制逻辑框图。如图所示,整流侧控制逻辑由三部分构成,分别为定电流控制段、电压限流控制段以及最小触发角控制段;逆变侧控制逻辑由四部分构成,分别为定电流控制段、 A_{max} 控制段、定熄弧角控制段以及电压限流控制段。正常运行情况下,图中所示0点为系统稳态运行点。该时刻,整流侧处于定电流控制段,将直流极母线电流稳定在预设值,逆变侧运行在 A_{max} 控制段,将直流母线电压稳定在预设值。图中所示其他段为确保系统稳定运行所配置辅助段。如整流侧1段用于当送端交流母线电压下跌情况下,直流母线电压降低,为保证直流母线电流稳定,整流侧自动减少触发角,抬高送端直流母线电压,并将触发角限制在最小触发角处。如逆变侧4段为低压限流控制段,用于当直流母线电压降低情况下,自动减少直流电压参考值,防止逆

变侧换向失败发生。此外，整流侧也配置低压限流控制段。

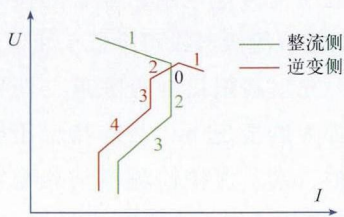


图1 换流站两端典型控制逻辑框图

直流线路高阻故障常见保护设计及不足

上述以常见单极系统为例分析直流输电系统结构及其控制机理。下面将在上述分析基础上，对高阻故障常见保护策略进行分析。目前，对应高压直流输电系统极母线高阻接地故障，主要采用以下几种方式进行故障识别。

(1) 突变量检测

电压突变量保护为线路故障的主保护逻辑。该保护以直流母线电压为检测对象，监测直流母线电压变化，当直流母线电压的变化超过预设动作定值时，保护动作。一般情况下，若该故障为暂时性故障，直流系统能够重起动成功，避免直流输电系统不必要停运。

(2) 直流线路横差保护

一般情况下，当直流线路发生高阻接地后，由于直流线路接地后分流作用，本端直流电流与对端直流电流存在差值。通过实时比较本站电流与对站电流，当二者差值超过预算值后，保护动作。若该故障为暂时性故障，恢复直流系统功率输送。

此外，直流保护系统中还配置有低电压保护。该保护若监测到直流母线电压低于预设值，直接闭锁直流系统。一般情况下，该保护为后备保护，动作时间低于电压突变量保护和线路横差保护。然而，由于受电压突变量保护灵敏度以及站间通信传输延时等影响，容易出现低电压保护先于电压突变量保护或线路横差保护动作，直接闭锁直流系统，存在暂态故障情况下，造成直流系统不必要的停运。

直流线路高阻故障模拟分析

上节分析了受电压突变量保护灵敏度以及站间通信延时等因素影响，当直流线路发生某些高阻接地故障情况下，后备保护先于主保护动作，直接闭锁直流系统，引起直流输电系统不必要停运。下面，在PSCAD上建立直流输电系统模型，分别模拟正常工况下以及不同高阻接地故障下，直流系统故障特征，并对电压、电流参量变化进行分析。异常工况下，分别模拟75 Ω 高阻接地、30 Ω 高阻接地以及10 Ω 高阻接地三种工况。

图2为稳态工况下，额定功率运行过程中，直流输电系统两端电流录播。对波形分析可知，稳态工况下，直流电流稳定，无波动。

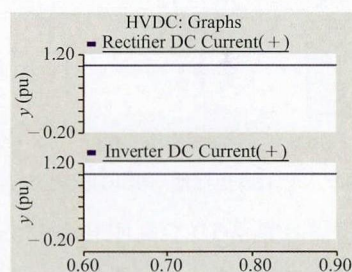


图2 稳态直流侧、逆变侧电流波形

图3、图4分别为75 Ω 高阻接地情况下，极直流母线电流、电压波形。对录波分析可知，发生高阻接地故障后，由于接地故障分流作用，整流

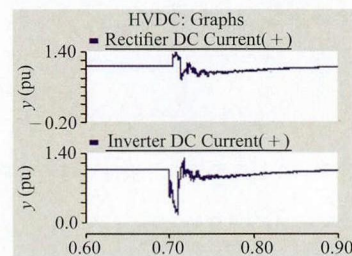


图3 75 Ω 高阻接地，极母线电流波形

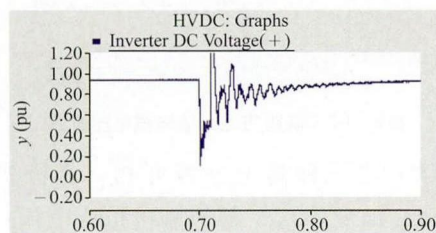


图4 75 Ω 高阻接地，极母线电压波形

侧直流升高、逆变侧直流降低，极母线电压最低降至0.1 pu。

图5、图6分别为30 Ω 高阻接地情况下，极直流母线电流、电压波形。如图所示，发生高阻接地故障后，整流侧直流瞬间增大，逆变侧电流最低降至零，逆变侧直流极母线电压最低降至-0.15 pu。

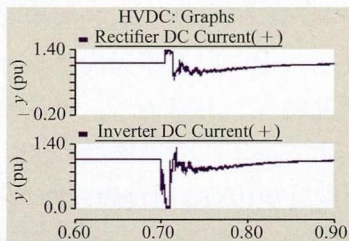


图5 30 Ω 高阻接地，极母线电流波形

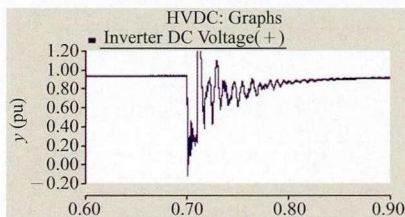


图6 30 Ω 高阻接地，极母线电压波形

图7、图8分别为10 Ω 高阻接地情况下，极直流母线电流、电压波形。如图所示，发生高阻接地故障后，整流侧直流瞬间增大，逆变侧电流最低降至零，逆变侧直流极母线电压最低降至-0.2 pu。

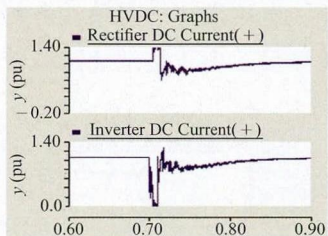


图7 10 Ω 高阻接地，极母线电流波形

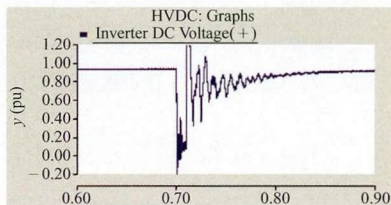


图8 10 Ω 高阻接地，极母线电压波形

综合上述三种情况分析可知，直流极母线发生高阻接地故障后，整流侧极母线电流瞬间升高、逆变侧直流电流瞬间降低，受接地电阻阻值

影响，接地电阻阻值越小，直流电流下降越大，受晶闸管单相导通影响，直流电流最低可降至零。直流电压受接地电阻影响，随接地电阻逐渐降低，逆变侧直流极母线可降低至负值。

因此，发生高阻接地故障后，特别是接地电阻阻值比较大的情况下，故障特性不明显，电压突变量保护、横差保护检测不到故障发生，冗余造成低电压保护动作，闭锁直流系统。因此，在发生线路阀组接地故障情况下，为避免保护误动作发生，可以通过以下几种方式来提高保护灵敏度：

- 1) 改进站间通信传输速率，降低站间信号传输时间。
- 2) 减小线路横差保护出口时间。
- 3) 优化电压突变量保护算法，增强保护检测灵敏度。
- 4) 系统运行情况下，适当延迟低电压保护动作时间。

结束语

目前，高压直流输电系统、超高压直流输电系统主要采用架空线来完成直流功率传输。受雷击、山火等因素影响，直流线路容易发生高阻接地故障。本文以直流线路常见高阻接地故障为分析出发点，以典型直流输电系统为分析典型，以PSCAD为分析软件，首先分析直流输电机理，模拟正常运行情况下直流线路电流波形。在上述分析基础上，模拟分析三种典型高阻接地故障，并对故障结果进行分析，总结高阻接地故障特性，对保护逻辑提出对应改进措施，对实际工程应用有借鉴意义。

参考文献

- [1] 浙江大学直流输电组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 155-168.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 469.
- [3] 朱韬析, 欧开健, 王超. 天广直流输电系统控制策略改进建议 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 27-31.

(收稿日期: 2015-02-08) EA