

# 交流系统强度对直流系统稳定运行 状态和故障恢复特性影响的研究

李 乾, 范子强, 黄金海, 吴庆范, 许朋见, 付 艳, 曹 森, 张克辉  
(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘 要:** 随着交流特高压电网的相继建设, 交流系统的强弱将发生改变。交流系统强弱会对直流输电系统的稳定运行状态和故障恢复特性产生影响, 也关系到直流输电系统的控制保护策略和参数是否需要调整。通过对溪浙特高压工程的 RTDS 仿真模型进行试验分析, 研究了各种短路比组合与直流系统最大稳定运行功率的关系, 提出了直流系统能够额定功率稳定运行的临界短路比的概念及溪浙工程的具体数值; 分析了直流系统额定功率稳定运行工况下的扰动试验, 提出了直流系统能够自动恢复的稳态短路比的概念及溪浙工程的具体数值; 研究了不同稳态短路比工况下典型的交流系统故障对直流输电系统故障恢复特性影响的规律, 对实际工程的相关设计提供了有益的参考。

**关键词:** 交流系统强度; 高压直流; RTDS; 短路比; 故障恢复特性

**Abstract:** With the successive construction of ultra high voltage ( UHV ) power grid , the strength of AC system will be changed , and it would impact on the stable operating condition and fault recovery characteristic of DC system , which also relates to the control and protection strategy and parameters of HVDC transmission system whether needs to be adjusted or not. By analyzing RTDS simulation model of XiZhe UHV project , the relationship of various short - circuit ratio ( SCR ) combinations and maximum steady running power of DC system are studied , and the conception of critical SCR that can maintain the system operating with the rated power is proposed as well as the exact figures of XiZhe project. The rules for the influence of typical AC system fault on fault recovery characteristic of DC system are analyzed under various stable SCR , which provides a useful reference for the actual engineering design.

**Key words:** AC system strength; HVDC; RTDS; short - circuit ratio; fault recovery characteristic

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)03 - 0061 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.014

## 0 引 言

特高压直流输电系统(HVDC)换流器处接入的交流系统的强弱直接影响到HVDC系统稳定后的运行状态以及故障时的动态性能和故障恢复特性。随着交流特高压电网的相继建设,交流系统的强度将发生改变,交流系统强度对直流系统的影响会更加明显。相关文献[1-4]对交流系统强度的表征量短路比做了研究,推算了交流系统强弱的划分标准和临界短路比的计算方法。但是在实际工程中,由于控制方式和系统参数的不同,实际的临界短路比和理想状态下的临界短路比有所不同。下面以溪浙特高压直流输电工程的仿真模型和相应控制保护主机为基础,研究各种短路比组合时直流系统能达到的最大输送功率,并推算能使该特高压工程达到

额定功率的临界短路比;对额定功率稳定运行工况下的扰动试验进行了分析,在临界短路比基础上提出能使直流系统在轻微扰动下自恢复的稳态短路比的概念,并通过试验推算出了溪浙工程的稳态短路比。临界短路比及稳态短路比的提出对特高压直流工程设计规划提供了有益的参考。

由于直流系统在建成投运后两侧的交流系统会发生很大变化,针对短路比的变化对直流输电系统的故障恢复特性是否有影响等问题,下面在溪浙特高压直流输电工程的仿真模型和相应控制保护主机上,设置了8种典型的交流系统故障,进行了70余项试验研究。

## 1 交流系统的强弱表征及 RTDS 仿真系统模型

### 1.1 短路比

交流系统的强弱是相对于直流系统输送能力而言的,相关文献[5-7]定义了一些交流系统强度指标,现在普遍采用短路比来表征交流系统的强弱。短路比的定义为系统额定运行时换流站交流母线短路容量  $S_{scN}$  与额定直流功率之比:

$$R_{sc} = \frac{S_{scN}}{P_{dN}} = \frac{U_N^2}{|Z|} \cdot \frac{1}{P_{dN}} \quad (1)$$

式中:  $U_N$  为交流系统基准电压;  $P_{dN}$  为额定直流功率。

在式(1)中当额定电压和功率一定时,短路比为电源阻抗的单值函数,因此可在 RTDS 中通过设置电源的内阻来改变仿真模型中交流系统的短路比。设置方式如图1所示(设置  $Z1$  的值)。

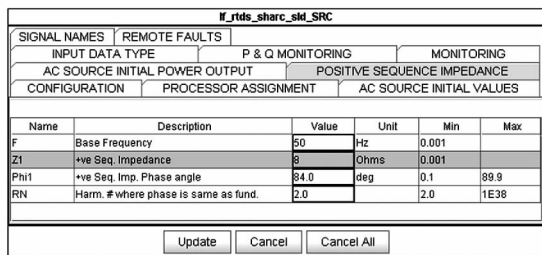


图1 仿真系统短路比的设置

### 1.2 RTDS 仿真系统模型

研究采用溪浙特高压工程的仿真试验模型<sup>[8-10]</sup>,通过 RTDS 搭建的仿真试验模型包括交流系统等值系统、双12脉动阀组、换流变压器、直流滤波器、交流滤波器、平波电抗器、中母线电容器、阻波器、直流线路、接地极等元件。仿真系统中,直流场开关和交流场开关通过 Profisim 来模拟,其状态在 RTDS、Profisim 和控制保护系统间相互传输; RTDS 模型的输出信号经 A/D 转换后,小电压信号直接输出至控制保护设备,部分信号通过功率放大器实时地输出模拟量并连接至控制保护设备;控制保护系统输出控制信号或保护动作信号至 RTDS,构成一个闭环系统,能够真实地反映直流输电系统的特性。

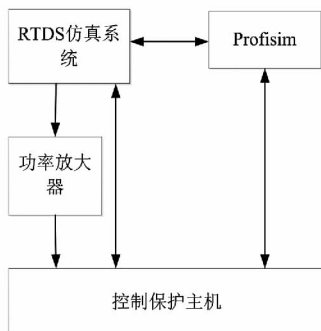


图2 RTDS 仿真系统结构图

这里选用许继集团 DPS - 3000 平台下的 HCM3000 控制保护平台与 DS3000 运行人员控制系统配合完成试验研究。HCM3000 系统控制保护主机及控制保护程序与某实际特高压工程现场一致。控保主机通过 LAN 网与 DS3000 运行人员控制系统相连,可以实时显示控制保护动作信息。

## 2 交流系统强弱对直流系统稳定运行状态的影响

交流系统强弱对直流系统稳定运行状态的影响有很多方面,下面从以下两方面入手进行研究。

### 2.1 临界短路比

当交流系统过弱时,直流系统无法达到额定功率运行,IEEE 工作组提出了针对单馈入直流系统临界短路比的计算公式:

$$R_{CSC} = \frac{1}{U^2} [I_d \sin \theta \tan(\gamma + u) - Q_d + Q_c + \sqrt{[\frac{P_d}{\cos(\gamma + u)}]^2 - \cos^2 \theta (P_d \tan(\gamma + u) - Q_d)^2}] \quad (2)$$

式中:  $U$  为换流站交流母线电压;  $P_d$  为直流输送功率;  $Q_d$  为逆变器消耗的无功;  $Q_c$  为换流站提供的无功;  $\gamma$  为逆变器熄弧角;  $u$  为逆变器换相角;  $\theta$  为交流系统等值阻抗的相角。

但在实际工程中,由于直流系统控制策略、系统参数、交流系统无功补偿能力等因素的差异,利用上述公式求得的临界短路比存在一些偏差。这里从试验角度研究了在各种短路比组合时直流系统能达到的最大运行功率,寻求能在额定功率运行的临界短路比。研究过程采用溪浙工程的控制保护系统主机以及相应的 RTDS 模型进行,换流站无功补偿容量与现场情况一致,会随着直流功率的提升多投滤波器加大无功补偿,仿真中交流系统未加电压自动调节功能。交流系统强度用换流母线短路比表示,由弱至强分别为 2、2.5、3、4、5。进行了 3 组试验,分别是整流侧交流系统短路比最小逆变侧逐渐增大时系统稳态状况;逆变侧交流系统短路比最小整流侧逐渐增大时系统稳态状况;逆变侧短路比大于整流侧且整流侧短路比逐渐增大时系统稳定状态,试验数据如表1、表2、表3所示。

整流侧短路比均为最小,逆变侧短路比逐渐增

大时,直流输电系统所能达到的最大稳态功率均为6 800 MW,此时交流滤波器已全部投入,分接头也已调到极限挡位,交流电压不再有上升空间,说明整流侧过弱的交流系统不足以支撑直流功率达到额定值。

表1 整流侧短路比最小逆变侧逐渐增大时系统稳态状况

短路比 (整流/逆变)	稳定功率 /MW	整流侧	
		交流电压/kV	逆变侧 交流电压/kV
2/2.5	6 800	478	491
2/3	6 800	480	498
2/4	6 800	481	493
2/5	6 800	480	486

表2 逆变侧短路比最小整流侧逐渐增大时系统稳态状况

短路比 (整流/逆变)	稳定功率 /MW	整流侧	
		交流电压/kV	逆变侧 交流电压/kV
2.5/2	7 100	490	491
3.1/2	7 100	485	490
5/2	7 100	496	491

逆变侧短路均为最小,整流侧短路比逐渐增大时,直流输电系统所能达到的最大稳态功率为7 100 MW,此时交流滤波器已全部投入,分接头已调到最高挡位,交流电压不再有上升空间,说明逆变侧过弱的交流系统不足以支撑直流功率达到额定值。

表3 逆变侧短路比大于整流侧且整流侧短路比逐渐增大

短路比 (整流/逆变)	稳定功率 /MW	整流侧	
		交流电压/kV	逆变侧 交流电压/kV
2/2.5	6 800	478	501
2.5/3	7 400	481	483
3.1/5	8 000	484	480
4/5	8 000	485	480
5/5	8 000	496	480

由以上试验数据可知,当整流侧短路比与逆变侧短路比不一致时,直流输电系统所能达到的最大稳态功率将由短路比较小的一侧决定。逆变侧短路比大于整流侧短路比时,随整流侧短路比的逐渐增大,直流输电系统最大稳态功率随之增大。在短路比增大到3.1及以上时,直流输电系统所能达到的最大稳态功率均能达到额定功率8 000 MW,因此溪浙特高压工程的临界短路比为3.1。

### 2.2 稳态短路比

在临界短路比情况下,虽然系统能够正常运行,但遇到轻微扰动,直流输电系统不能够正常恢复。因此这里提出稳态短路比的概念,并对在轻微故障扰动时直流系统能够自恢复的稳态短路比进行研究。仿真模型中无功补偿容量与实际工程一致,仿

真中交流系统未加电压自动调节功能。

推算溪浙特高压工程稳态短路比的试验过程如下:设置轻微故障为交流系统单相接地100 ms、交流系统三相接地100 ms、直流线路接地100 ms。将交流系统的强度从临界短路比开始逐步增大,重复进行上述故障试验。故障后直流系统能够自恢复时的短路比即为稳态短路比。图3、图4分别为短路比为3.4和3.5时交流系统单相接地100 ms故障时直流电压、直流电流波形图。

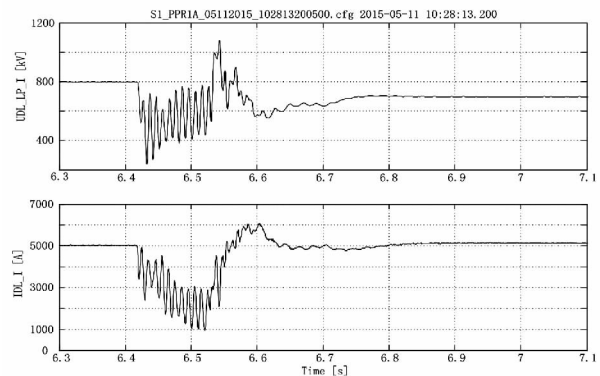


图3  $R_{sc} = 3.4$  发生交流系统单相接地波形图

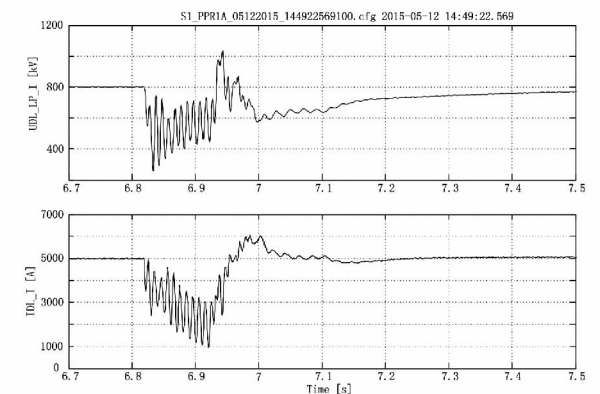


图4  $R_{sc} = 3.5$  发生交流系统单相接地波形图

由图3、图4可以看到:在短路比为3.4时发生交流系统单相接地故障,故障结束后直流电压停留在695 kV左右,没能恢复到额定值800 kV,直流电流也没能恢复到额定值;在短路比为3.5时发生交流系统单相接地故障,直流系统经振荡后恢复到额定值运行。进行其余扰动试验时试验现象与上述试验一致,据此推算溪浙特高压直流输电工程稳态短路比为3.5。

### 3 交流系统强弱对直流系统故障恢复特性的影响

直流输电工程建设完成后,使用期内两侧交流

系统会发生很大的变化。这种变化等效起来,相当于短路比发生变化。相关文献[11-12]对直流系统的故障恢复特性做出了研究,指出交流系统较弱会导致直流系统故障恢复速度变慢,容易发生换相失败。那么,交流系统强度是否会对高压直流输电系统的故障恢复特性产生影响,直流输电的控制保护策略是否需要做某些调整。下面针对这些问题对交流系统不同强度下交流系统故障对直流系统故障恢复特性进行了研究。

### 3.1 试验项目设置

研究仍采用溪浙特高压工程的控制保护系统主机以及相应的RTDS模型进行,交流系统强度用换流母线短路比表示,由弱至强分别为3.5、4、5,最小短路比采用上述试验总结出的该工程稳态短路比。设置的交流系统典型故障为:整流侧交流系统单相接地100 ms、整流侧交流系统三相接地100 ms、整流侧交流系统高阻接地100 ms、整流侧交流系统单相接地5 s、逆变侧交流系统单相接地100 ms、逆变侧交流系统三相接地100 ms、整流侧交流系统高阻接地100 ms、逆变侧交流系统单相接地5 s。

### 3.2 试验结果及分析

由于试验项目较多,下面选取两组典型试验,对交流系统不同强度下交流故障对直流系统故障恢复特性的影响进行分析。

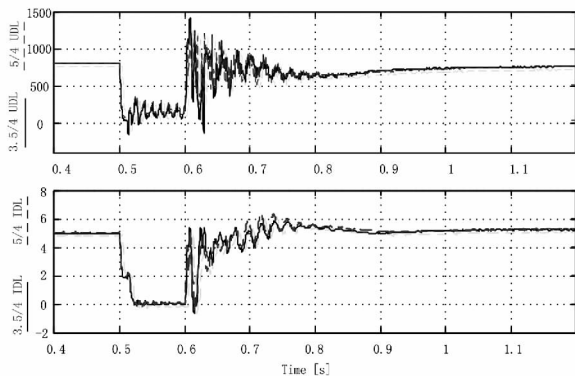


图5 整流侧三相接地波形

表4 整流侧三相接地100 ms故障恢复特性

短路比 (整流/逆变)	直流电流、 直流电压 正常运行值	直流电流、 直流电压 振荡峰值	直流电流、 直流电压 恢复时间
3.5/4	$I_{DL}: 4.98 \text{ kA}$	$I_{DL}: 5.85 \text{ kA}$	$I_{DL}: 108 \text{ ms}$
	$U_{DL}: 799 \text{ kV}$	$U_{DL}: 1393 \text{ kV}$	$U_{DL}: 246 \text{ ms}$
5/4	$I_{DL}: 4.98 \text{ kA}$	$I_{DL}: 6.23 \text{ kA}$	$I_{DL}: 111 \text{ ms}$
	$U_{DL}: 800 \text{ kV}$	$U_{DL}: 1309 \text{ kV}$	$U_{DL}: 256 \text{ ms}$

第1组典型试验:整流逆变短路比分别为3.5/4和5/4时发生整流侧三相接地100 ms故障,直流电压和直流电流录波以及故障恢复特性对比如图5、表4所示(故障恢复时间取最后一次低于0.9 p.u.的时间)。

由上述试验数据可知发生整流侧三相接地100 ms故障时,逆变侧短路比一致,整流侧短路比较大时,直流电流振荡峰值稍大,但直流电流、电压的振荡趋势和恢复时间基本一致,控制保护系统的响应也完全一致。

第2组典型试验:整流逆变短路比分别为3.5/3.5和3.5/5时发生逆变侧单相接地100 ms故障,直流电压和直流电流故障录波以及故障恢复特性对比如图6、表5所示(故障恢复时间取最后一次低于0.9 p.u.的时间)。

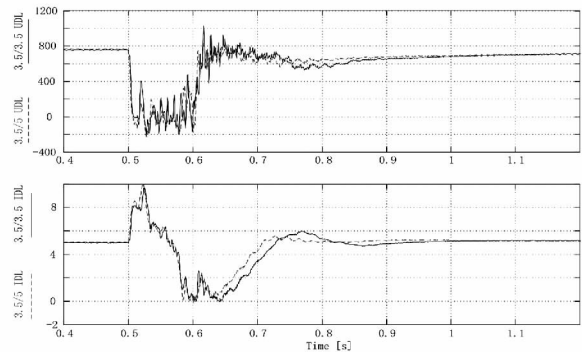


图6 逆变侧单相接地100 ms故障

表5 逆变侧单相接地100 ms故障恢复特性

短路比 (整流/逆变)	直流电流、 直流电压 正常运行值	直流电流、 直流电压 振荡峰值	直流电流、 直流电压 恢复时间
3.5/3.5	$I_{DL}: 4.98 \text{ kA}$	$I_{DL}: 9.95 \text{ kA}$	$I_{DL}: 126 \text{ ms}$
	$U_{DL}: 755 \text{ kV}$	$U_{DL}: 1178 \text{ kV}$	$U_{DL}: 400 \text{ ms}$
3.5/5	$I_{DL}: 4.98 \text{ kA}$	$I_{DL}: 9.91 \text{ kA}$	$I_{DL}: 103 \text{ ms}$
	$U_{DL}: 758 \text{ kV}$	$U_{DL}: 1113 \text{ kV}$	$U_{DL}: 205 \text{ ms}$

由上述试验数据可知:发生逆变侧单相接地100 ms故障时,整流侧短路比一致,逆变侧短路比较小,直流电压、直流电流振荡幅值稍剧烈一些,故障恢复时间也稍长,但电压电流的恢复趋势一致,电流电压的变化差异不大。

其余试验项目结果经分析后与上述试验一致。

在哈郑±800 kV特高压直流输电工程EMTDC仿真模型进行了类似试验<sup>[13]</sup>,交流系统强度分别选取3.5、5,故障设置为:整流侧、逆变侧交流系统单

相金属性接地,持续时间 100 ms;整流侧、逆变侧交流系统三相金属性接地,持续时间 100 ms;整流侧、逆变侧交流系统单相高阻接地,持续时间 100 ms,双极直流输出功率为额定 8 000 MW。试验现象和结论与本次试验一致。

在试验所做短路比范围内,发生各类典型故障,交流系统强度不同对直流电压、直流电流的故障恢复特性影响不大。直流控制特性、参数以及直流保护定值等均未出现异常,表明在长距离直流工程,控制保护参数在 3.5 以上的短路比范围内是适应的,控制保护策略和参数不需要进行调整。

### 4 总 结

1) 针对交流系统强弱对直流系统稳定运行状态的影响进行研究,把能使直流输电系统以额定功率运行的短路比定义为临界短路比,通过不同短路比组合与直流输送功率最大值之间关系的研究,推算出了溪浙特高压工程临界短路比为 3.1;把在轻微扰动下直流输电系统能够自恢复的短路比定义为稳态短路比,通过额定功率稳定运行工况下几种典型的扰动试验研究出了溪浙特高压工程稳态短路比为 3.5。临界短路比和稳态短路比的提出和推算对交直流电网的相关设计规划提供了有益的参考。

2) 针对交流系统强弱对交直流系统故障恢复特性的影响进行研究,对试验项目设置和试验过程进行详细的阐述,通过对所有试验结果的对比分析总结出下列结论:在短路比为 3.5 及以上发生交流系统故障,短路比不同对直流系统的故障恢复特性影响较小,直流系统的控制保护的策略和参数不需调整。该结论对直流工程投运后两侧交流系统强度发生变化时控制保护系统是否需要调整提供了有益的参考。

(上接第 51 页)

虑工程造价的基础上,选取经济性好、治理效益佳的治理方案对低电压问题进行治理。

#### 参考文献

[1] 潘朝毅. 针对如何解决农村配网低电压问题的探讨[J]. 广东科技, 2011(24): 159-160.

[2] 焦玉振. 解决电网低电压的基本技术手段[J]. 农村电

#### 参考文献

[1] 肖俊, 李兴源, 王海燕. 交直流系统强度指标分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1856-1861.

[2] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一——直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.

[3] 徐政, 黄弘扬, 周煜智. 描述交直流并列系统电网结构品质的 3 种宏观指标[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 1-7.

[4] 王鹏飞, 张英敏, 陈虎, 等. 直流输电系统临界短路比的研究[J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1780-1783.

[5] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.

[6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 153-156.

[7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 61-66.

[8] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡—浙江 ±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.

[9] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 72-76.

[10] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.

[11] 魏星. 交流系统强度对 HVDC 故障恢复特性影响的仿真分析[J]. 电力科学与工程, 2007, 23(3): 24-26.

[12] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.

[13] 林少伯, 庞广恒, 王华伟, 等. 直流控制保护仿真技术提升及保护功能试验研究[R]. 中国电力科学研究院, 2015: 231-235. (收稿日期: 2017-02-13)

工, 2012, 20(4): 31.

[3] 贡德忠, 刘永军. 客户端低电压产生的原因及解决方案[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2011(32).

[4] 张高峰, 黄芳. 农村低压问题的解决措施[J]. 农村电子技术, 2011(3): 26-27.

#### 作者简介:

徐田磊(1992), 本科, 从事电能计量、线损管理工作, 主要研究课题为县级供电企业线损管理。

(收稿日期: 2016-01-26)