

DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2018.04.007

# 送受端系统短路比关系对直流输电系统最大输送功率的影响

罗 钢<sup>1</sup>, 刘崇茹<sup>2</sup>, 李欣蔚<sup>2</sup>, 娄源媛<sup>1</sup>, 伍双喜<sup>1</sup>, 刘俊磊<sup>1</sup>, 张子泳<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东广州 510699;  
2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

## Effect of the Ratio of Rectifier and Inverter SCR on Maximum Transmission Power of HVDC System

LUO Gang<sup>1</sup>, LIU Chongru<sup>2</sup>, LI Xinwei<sup>2</sup>, LOU Yuanyuan<sup>1</sup>, WU Shuangxi<sup>1</sup>,  
LIU Junlei<sup>1</sup>, ZHANG Ziyong<sup>1</sup>

(1. Power Dispatch Control Centre of Guangdong Power Grid Corp. Ltd, Guangzhou 510699, China;  
2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**摘 要:** 针对直流输电送端系统的运行状况是否对输送功率有影响的问题展开分析, 研究了交直流系统整流侧联于不同强度交流系统的运行特性, 结合逆变侧联于不同强度交流系统的运行情况, 指出送端系统短路比与受端系统短路比的大小关系会影响直流输电系统可输送的最大功率。首先研究了整流站和逆变站的功率曲线, 分别得到送受端系统短路比与其相应的最大输送功率的定量关系。然后分析了在相同的输送功率极限下整流侧和逆变侧短路比的关系, 将两端系统可输送的最大功率相等时的短路比定义为转折短路比, 并得到输送功率转折点。最后指出送受端系统的强度都会影响直流输电系统的输送能力, 当两端系统短路比与转折短路比存在某种关系时, 由其中的一端系统对直流系统的输送能力起决定性作用, 并通过 PSCAD 仿真验证了结论的正确性。

**关键词:** 交直流系统; 整流站; 直流输电; 输送能力; 短路比指标

**Abstract:** As to the influence of the operation status of sending system on transmission power, the operation characteristics of the HVDC rectifier connecting to various strength AC systems are studied. By combining with operation status of the inverter that connect to various strength AC systems, it is pointed out that the size relation of rectifier and inverter SCR (short circuit ratio) can affect maximum transmission power of HVDC system. Firstly, according to power curves of rectifier and inverter, the quantitative relationships be-

tween maximum transmission power and SCR are achieved respectively. Through comparing rectifier and inverter SCR under the same maximum transmission power condition, the turning point of SCR (TSCR) is defined as that obtained when maximum transmission powers of two terminal systems are equal. Finally, it is pointed out that the SCR of both inverter and rectifier sides would affect the transmission capacity. When there is certain relationship between rectifier and inverter SCR with TSCR, the transmission capacity of HVDC system is limited by one terminal side. Simulation results in PSCAD show the correctness of phenomenon founding.

**Keywords:** AC-DC system; rectifier; HVDC; transmission capacity; short circuit ratio(SCR)

## 0 引 言

随着我国直流输电技术的发展以及“西电东送, 全国联网”战略的实施, 直流工程在我国电力输送中发挥着越来越重要的作用。高压直流输电有着经济灵活、可控性强等优点, 在大容量、远距离输电方面有着很大的优势, 但是在输送能力方面, 直流输电系统是有限制的, 其决定性因素是所连交流系统的强度<sup>[1-5]</sup>。

在已有的研究中<sup>[6]</sup>, 交流系统强弱的划分标准是依据其短路比(SCR)的大小, 即交流系统与所连直流系统容量的相对大小, 短路比越小, 交流系统越弱。对于直流输电系统, 换流母线的短路比(SCR)

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(K-GD2014198)

同时也是评价交流电网电压支撑能力和接受直流功率能力的重要量化指标,短路比被广泛应用于电网受端系统的结构设计以及直流系统的运行分析。

## 1 问题的提出

由于交直流系统间相互影响的特点以及相关稳定问题在很大程度上决定于交流系统与所连接的直流系统容量的比例关系。送端交流线路故障会使直流系统有功功率产生波动,送端系统的频率、电压稳定性将面临考验,并对受端系统产生相应的影响,进而对交流系统产生更大冲击。而对于密集多送出直流系统,因为送端各子换流站一般建设在能源分布密集区,这样会致使有多条直流线路与送端系统相连接,而且各直流子系统间具有较为紧密的电气耦合特性,此时就不能确定整流侧交直流系统的相互影响是否会给整个系统带来不稳定性。同时,整流侧的运行状况会不会对整个系统的功率极限造成影响,甚至存在相应的临界短路比,是一个亟待解决的问题。

目前的研究认为逆变运行时直流输电对交流系统强度的要求更为突出,因此大都以逆变站为研究对象分析直流输电系统的输送能力及稳定性,几乎没有从理论上分析过连接于不同强度的整流站的运行特性。交直流系统相互作用引起的电压稳定性问题受到了人们的重视,该问题尤其在逆变侧更为突出<sup>[7]</sup>。文献[8]、[9]研究了直流输电系统在逆变侧较为突出的电压稳定性问题,根据换流器母线电压随直流系统侧无功功率的变化而变化的情况,指出了判断系统电压稳定性的标准,并在直流系统处于传统控制和优化改进控制下,将依照该评判指标得出的电压稳定性结论进行比较。文献[10]利用一种常用的简化高压直流输电系统模型,采用经典电压稳定分析判据研究换流节点电压稳定性,分析了整流侧在定功率控制和定电流控制两种方式下,逆变侧直流传送功率极限和换流母线节点电压稳定性之间的关系。文献[11]、[12]提出了适于多馈入交直流系统的短路比定义,分析了该短路比与电压灵敏因子的关系,并在此基础上提出了判断多馈入交直流系统强弱的指标。在两侧换流器不同的控制方式下,无功功率在换流站上的消耗存在差异,会导致直流系统功率传输极限和暂态过电压水平的差异<sup>[13]</sup>,但上述文献主要是针对受端系统来说的,

整流侧和逆变侧控制方式的差异,可能会导致评估结果的不同。

通过本文的研究发现,在交流系统越来越复杂的情况下,直流输电系统输送能力在某些条件下会受到送端交流系统强度的制约。本文从理论上分析了整流站和逆变站的运行特性,并研究了送端系统和受端系统短路比与直流系统输送功率极限的定量关系,指出逆变侧交流系统强度制约直流输电系统稳定性及输送能力的条件,同时发现,当送端和受端的交流系统的强度在某个转折点处变化时,会使整个直流输电系统功率稳定性及输送能力的影响因素发生改变。

## 2 整流站运行特性分析

从以往对逆变站运行特性的研究得知,随着系统短路比的增大,最大可送功率逐渐增大,对应的电流值也逐渐增大<sup>[6]</sup>。短路比值越大,系统的可送功率极限值越大,输送能力越强,功率可调性更加灵活。对于典型的换流站设备,临界短路比CSCR<sup>[14]</sup>的值大致为2,所以通常将短路比 $SCR < 2$ 的系统称为弱系统,联于弱系统的直流输电系统是难以稳定运行的。

整流站和逆变站在正常运行时,通常采用不同的控制方式。在直流输电系统中,根据整流运行和逆变运行各自的特点不同,通常由整流站承担控制直流电流的任务,由逆变站承担控制直流电压的任务。由此建立的整流站运行特性表达式如下:

$$\begin{aligned} P_d &= CU^2[\cos 2\alpha - \cos(2\alpha + 2\mu)] \\ Q_d &= CU^2[2\mu + \sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\mu)] \\ I_d &= KU[\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)] \\ U_d &= P_d/I_d \\ P_{ac} &= [U^2 \cos\theta - EU \cos(\delta + \theta)]/|Z| \\ Q_{ac} &= [U^2 \sin\theta - EU \sin(\delta + \theta)]/|Z| \\ Q_c &= B_c U^2 \\ P_d + P_{ac} &= 0 \\ Q_d + Q_{ac} - Q_c &= 0 \\ I_d &= [kU_r \cos\alpha - mU_i \cos\gamma]/X_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P_d$ 和 $Q_d$ 表示直流换流站交流侧的有功和无功功率; $I_d$ 表示直流电流; $U_d$ 表示直流电压; $P_{ac}$ 和 $Q_{ac}$ 表示交流有功和无功功率; $U_r$ 和 $\delta$ 表示分别表示送端交流母线电压幅值和相角; $B_c$ 表示交流滤波器和无功补偿电容的等效电纳; $Q_c$ 表示无功补偿

容量； $Z$  和  $\theta$  表示交流系统的等效阻抗大小和相位； $E$  表示交流系统等效电动势的幅值； $\alpha$  表示触发延迟角； $k$  和  $m$  为常数； $U_i$  表示受端换流母线电压； $\gamma$  表示受端逆变器熄弧角； $X_d$  表示直流输电线路阻抗。

在分析整流站运行特性时，假设受端系统为理想状况，换流母线电压始终不会崩溃，且熄弧角为额定值  $18^\circ$ 。在这种条件下，绘制不同短路比下整流侧  $P_d$  随  $I_d$  的变化规律，如图 1 所示。需要说明的是，图 1 希望表征随着电流的增大，系统输送功率的变化情况。因此在电流控制权切换至逆变器站之后，仍然使电流持续增大来观察系统输送功率的变化，以获得系统能够输送的最大功率与送端系统 SCR 的关系。

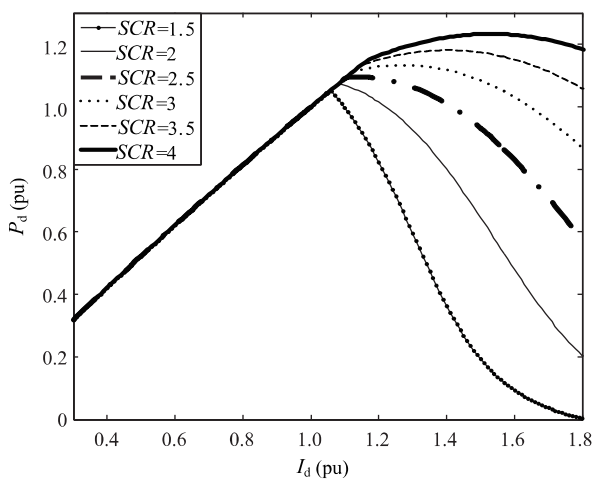


图 1 整流侧  $P_d$  随  $I_d$  的变化曲线  
Fig. 1  $P_d - I_d$  curves of rectifier

可以看出，送端系统的功率最大点总是在控制方式转换之后出现。由于整流站额定运行时通常采用定功率或者定电流控制，通过调节触发角  $\alpha$  的大小来实现电流控制，额定运行时系统的触发角  $\alpha$  留有一定裕度。因此，整流站额定运行点总处于功率曲线的上升沿，即出现在稳定运行区域，所以通常观点认为送端系统不存在稳定性问题，送端系统的短路比对直流系统输送功率和稳定运行不起主导作用；但随着直流电流的提升，整流站可输送的直流功率存在极限值。

### 3 短路比与直流系统最大输送功率的关系

直流系统最重要的两个设备是整流站和逆变

站，二者缺一不可。上述对整流侧运行特性和输送功率极限的分析是在逆变侧能承受整流侧输送过来的功率的基础上，即逆变器站能够保持正常的恒定熄弧角控制。然而，实际情况是受端系统同样存在输送功率极限，只有当其可输送的功率大于送端系统的输送功率极限时，整个直流系统的输送极限功率等于送端系统所能送出的最大直流功率。

#### 3.1 送端系统短路比与直流系统最大输送功率的关系

方程组(1)可以表征整流站的运行特性，其中，交流系统等值阻抗  $Z$  的倒数可以表征短路比 SCR 的大小。那么，通过改变  $Z$  的大小可以调整短路比的大小。设定短路比之后，解析方程组(1)，得到该短路比下整流侧的功率曲线以及其所能传输的最大直流功率。统计在不同短路比的情况下，送端系统所能传输的最大直流功率如表 1 所示。

表 1 送端系统短路比与最大输送功率的关系

Tab 1 Relationship between SCR and maximum transmission power of rectifier

短路比(SCR)	最大功率 $P_{dm}$ (pu)	短路比(SCR)	最大功率 $P_{dm}$ (pu)
1.6	1.068 0	3.4	1.141 8
1.8	1.078 4	3.6	1.148 0
2.0	1.088 0	3.8	1.153 9
2.2	1.097 0	4.0	1.156 8
2.4	1.105 5	4.2	1.165 0
2.5	1.109 6	4.4	1.170 2
2.6	1.113 6	4.6	1.175 2
2.8	1.121 2	4.8	1.180 0
3.0	1.128 4	5.0	1.184 6
3.2	1.135 3	5.2	1.189 0

在对大量参数研究的基础上，对整流侧在不同短路比下的最大功率曲线进行拟合，以得到整流侧短路比与其相应输送功率极限的定量关系。

$$P_{dm1} = -0.0048SCR_r^2 + 0.0658SCR_r + 0.9741 \tag{2}$$

式中： $P_{dm1}$  表示送端系统所能送出的最大直流功率； $SCR_r$  表示送端交流系统的强度。

#### 3.2 逆变侧短路比与直流系统最大输送功率的关系

通过解析逆变侧运行特性方程<sup>[14]</sup>可以得到逆变侧的运行特性曲线及其所能传输的最大直流功率。统计在不同短路比的情况下，逆变侧所能传输的最大直流功率如表 2 所示。

表2 逆变侧短路比与最大输送功率的关系  
 Tab 2 Relationship between SCR and maximum transmission power of inverter

短路比(SCR)	最大功率 $P_{dm}$ (pu)	短路比(SCR)	最大功率 $P_{dm}$ (pu)
2.0	1.003 2	3.4	1.089 2
2.2	1.000 5	3.6	1.109 8
2.4	1.006 4	3.8	1.130 6
2.5	1.011 6	4.0	1.151 6
2.6	1.017 8	4.2	1.172 5
2.8	1.032 9	4.4	1.193 4
2.9	1.041 4	4.6	1.214 0
3.0	1.050 3	4.8	1.234 4
3.1	1.059 6	5.0	1.254 4
3.2	1.069 3	5.2	1.274 1

在对大量参数研究的基础上,对受端系统为不同短路比时对应的最大功率进行曲线拟合,得到逆变侧输送功率极限与受端系统短路比的定量关系如下所示:

$$P_{dm2} = -0.0909SCR_i + 0.97 \quad (3)$$

式中:  $P_{dm2}$  为受端系统输送的直流功率极限;  $SCR_i$  为受端系统短路比。

### 3.3 相同输送功率极限下整流侧与逆变侧短路比的关系

将得到的式(2)、式(3)的定量关系共同表示在图2中。

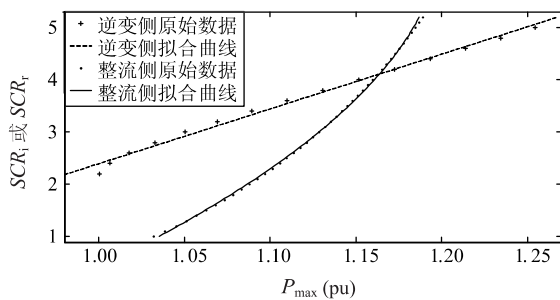


图2 整流侧/逆变侧输送功率极限与其相应端短路比的定性关系

Fig 2 The qualitative relation between transmission power limit of rectifier side/inverter side and the corresponding terminal SCR

从图2中可见,两条曲线必然存在一个交点。对于同一个直流系统,一般来说整流侧输送功率,逆变侧接收功率,需要达到供需平衡的状态,即存在相同的输送功率极限的限制。通过上述分析说明,存在一个短路比值,使得当两侧的短路比均小于该值,系统的输送功率极限受制于逆变侧系统,

当两侧的短路比均大于该值,系统的输送功率极限受制于整流侧系统;相应的可以得到该短路比对应的输送功率极限,如果系统需要输送的功率小于该值,则逆变侧短路比决定该系统的输送能力,若系统需要输送的功率超过该值,则整流侧短路比决定该系统的输送能力。将整流侧短路比与其相应输送功率极限的关系曲线和逆变侧短路比与其相应输送功率极限的关系曲线的交点对应的短路比定义为转折短路比,记为  $TSCR$ ; 对应的输送功率极限定义为输送功率转折点,记为  $P_{m,T}$ 。

在实际工程中,整流站在额定运行状态下的延迟触发角  $\alpha_N$  可能会略高于  $20^\circ$ , 此时得到的整流侧输送功率极限曲线会整体略高于上面呈现的曲线,因此得到的转折短路比和输送功率转折点也会跟着相应的增大。

在本文的模型中,考虑到实际情况中由于直流系统传输线路上的损耗,导致的整流侧输送功率极限通常需要稍高于逆变侧,由式(2)、(3)可以得到:

$$-0.05SCR_r^2 + 0.7SCR_r + 2 = SCR_i \quad (4)$$

令上式中的  $SCR_r = SCR_i = TSCR$ , 得到  $TSCR$  为 4。输送功率转折点(标么值)可以通过下式得到:

$$P_{m,T} = 0.09TSCR + 0.8 \quad (5)$$

计算得到  $P_{m,T}$  为 1.16。那么,当需要输送的功率极限  $P_m > P_{m,T}$  时,整流侧交流系统对直流系统的功率输送影响更大,提高整流侧的短路比能够帮助直流系统输送更多的功率,而且当需要输送的功率越大,要求的整流侧短路比越大于逆变侧短路比;当需要输送的功率功率极限  $P_m < P_{m,T}$  时,逆变侧交流系统对直流系统的功率输送影响更大,此时提高逆变侧的短路比能够有效提高直流系统输送的能力。

因此,当送端系统的输送能力强于受端系统时,在提升直流系统输送功率的过程中,送端系统还没达到其输送功率极限值,受端系统已经由于系统强度的制约,而不允许输送功率继续提升,此时由受端系统来决定整个交直流系统的输送能力。同理,当送端系统所能传输的最大功率小于受端系统的输送功率极限时,尽管逆变侧交流系统足够强大,可以承受较大的直流功率,但是由于送端系统强度的限制,致使直流系统传输的有功功率从供给方就受到制约,以至于不能满足受端系统想要输送最大功率的需求。也就是说,此时整个交直流系统的输送能力主要受限于送端系统的强度。所以,直

流系统最大输送功率既受整流侧系统短路比的影响，也受逆变侧系统短路比的影响。

如果两个换流站交流系统短路比均小于转折短路比( $TSCR$ )，即使整流侧交流系统短路比在一定范围小于逆变侧交流系统短路比，直流系统输送功率极限仍然受到逆变侧系统强度的限制。而当两个换流站交流系统短路比均大于转折短路比( $TSCR$ )，即使整流侧交流系统短路在一定范围内大于逆变侧交流系统短路比，整个直流系统输送能力依然完全由整流侧来决定。如果一个换流站交流系统短路比小于  $TSCR$ ，另一个换流站交流系统短路比大于  $TSCR$ ，则直流系统输送功率极限由短路比小的一侧来决定。

在实际工程中，往往已知送端系统可能达到的最大输送功率，可以通过与输送功率转折点相对比，结合送、受端短路比，来判断该系统是否能够稳定传输有功功率。对于送端系统来说，若是传输的功率小于输送功率转折点，在受端系统能够承受的情况下，那么送端短路比只要不小于受端短路比就可以了，更为精确的，可以根据式(4)得到送端短路比的最小值；若是传输的功率大于输送功率转折点，那么送端短路比绝对不能小于  $TSCR$ ，否则该系统不能承受如此大的有功功率。

### 4 算例与验证

仿真模型以 Cigre \_\_Benchmark 模型为基础在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建。两侧交流系统均用由戴维南等值定理得到的等效阻抗来表示，如果改变某侧阻抗的模值，而保证相角不变，就可以达到调整对应的交流系统强度的效果。在不同的交流系统强度下，进行 3 组仿真，其中直流系统换流变压器的基本仿真参数如表 3 所示。

表 3 基本仿真参数

Tab 3 Basic simulation parameters

仿真参数	逆变侧	整流侧
换流变变比/(kV/kV)	230/209.23	345/213.46
换流变漏抗标么值	0.18	0.18
换流变额定容量/MVA	591.79	603.73

A 组：固定整流侧所连接的交流系统的短路比为 3.0，分别仿真逆变侧的系统短路比为 2.5, 3.0, 4.0 的运行情况。在每次仿真的过程中，使

直流电流的指令逐步提升。最后得到 3 次仿真下，在送端系统侧测量得到的直流功率的变化情况，如图 3 所示。

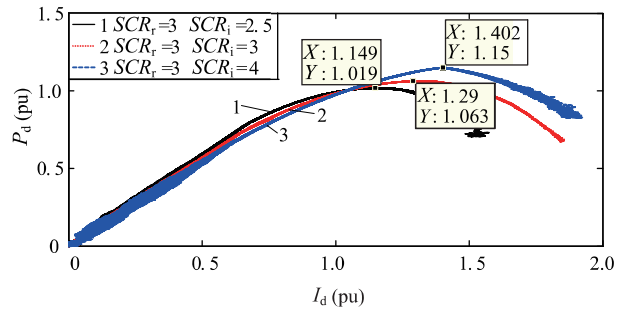


图 3 A 组仿真功率曲线图

Fig 3  $P_d - I_d$  curves of simulation A

在该组仿真中，整流侧所连交流系统的短路比 3.0 小于本文分析得到的转折短路比 4.0，同时逆变侧所连交流系统的短路比的变化范围也不超过转折短路比值。根据理论推导，整个系统的输送能力应该受到逆变侧强度的限制，也就是说随着逆变侧短路比的增大，输送功率极限也应该增大。

从图中仿真结果可以看到，在依次调整逆变侧短路比不断增大的过程中，送端直流功率与直流电流的关系曲线整体向右上偏移，输送功率极限点也呈增大趋势。与理论推导出的逆变侧运行特性相比较，送端直流功率随直流电流的变化情况与仅受逆变侧影响的输送功率极限随直流电流的变化情况<sup>[1]</sup>相同。说明，此时限制系统输送能力的主要因素是逆变侧的强度，这和本文的理论分析结果一致。

B 组：保持逆变侧所连交流系统的短路比为 4.5 不变，依次调整整流侧的短路比为 4.0, 4.5, 5.0。在每次仿真的过程中，控制设定的直流电流值逐渐增加。最后获得 3 次仿真后，在送端系统侧测量得到的直流功率随直流电流变化的情况，见图 4 所示。

在该组仿真中，逆变侧所连交流系统的短路比 4.5 大于本文分析得到的转折短路比 4.0，而且整流侧所连交流系统的短路比的变化范围也小于转折短路比值。根据理论推导，整个系统的输送能力应该受到整流侧强度的限制，也就是说随着整流侧短路比的增大，输送功率极限也应该增大。

从图中仿真结果可以看到，在依次调整整流侧短路比不断增大的过程中，当直流电流小于额定值 1 时，送端直流功率随直流电流增大而增大的轨迹相同；当直流电流大于额定值 1 之后，3 次仿真依

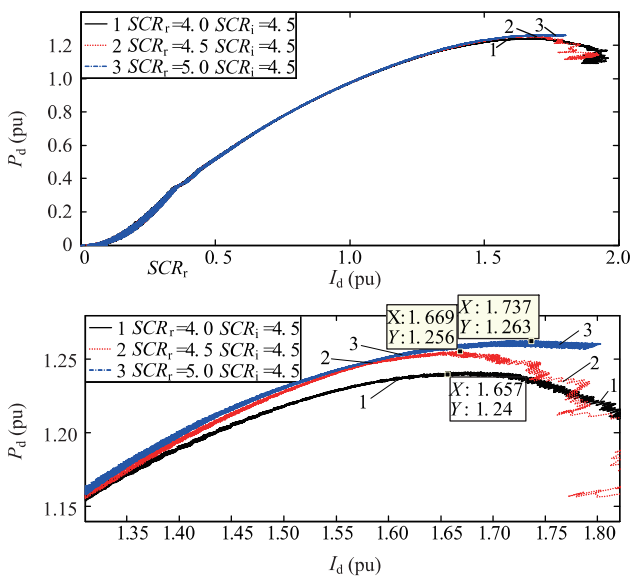


图4 B组仿真功率曲线图(第二张为放大图)  
Fig 4  $P_d - I_d$  curves of simulation B  
(the second one is the close-up figure)

次呈现出逐渐增大的功率极限点。与理论推导的整流侧运行特性相比,送端直流功率随直流电流的变化情况与仅受整流侧影响的输送功率极限随直流电流的变化情况相同(图1)。说明,此时限制系统输送能力的主要因素是整流侧的强度,这和本文的理论分析结果一致。

C组:首先调整两侧交流系统等效阻抗的模值均为0.25,即短路比为转折短路比4.0,按照前两组的仿真过程,得到送端系统的功率电流曲线;接着,降低受端系统短路比到2.5,增加送端系统短路比到4.5,得到送端系统功率曲线的变化情况;最后,将受端系统短路比增加为4.5,而降低送端系统短路比为2.5,得到送端系统的功率电流曲线。图5展示的是3次仿真的曲线图。

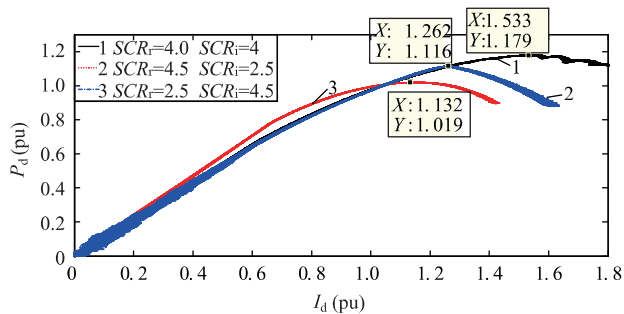


图5 C组仿真功率曲线图  
Fig 5  $P_d - I_d$  curves of simulation C

在上述仿真过程中,首先选择两侧的系统短路比相等,且近似等于该系统的转折短路比时的系统运行情况进行参考。如果整流侧短路比相对参考情况降低了,那么由于整个系统的输送功率极限制于整流侧短路比,功率输送的极限值也会降低;如果逆变侧短路比相对参考情况降低了,那么由于整个系统的输送功率极限制于逆变侧短路比,功率输送的极限值也会降低。

分析图5所示的仿真结果图,  $SCR_r = SCR_i = 4.0$  时的最大输送功率值是该组仿真中的最大者。如果降低整流侧短路比为2.5,即使升高逆变侧短路比为4.5,系统输送功率与直流电流的关系曲线与该组中  $SCR_r = SCR_i = 4.0$  的仿真相比,前半部分的变化情况相同,只是系统可输送功率的极限转折点提前了;更具体的,如果与图4中的  $SCR_r = 4.0$ 、 $SCR_i = 4.5$  仿真得到的输送功率极限值为1.24(pu)相对比,其所能输送的功率极限1.116(pu)小于1.24(pu),满足在B组仿真中得到的结论:逆变侧所连交流系统的短路比大于转折短路比时,系统输送功率能力随整流侧短路比的减小而减小;所以可以说明此时的仿真系统受限于整流侧的强度。相反的,如果降低逆变侧短路比为2.5,即使升高整流侧短路比为4.5,系统输送功率与直流电流的关系曲线与该组中  $SCR_r = SCR_i = 4.0$  的仿真相比,曲线整体做了一个近似向左下移动的调整,说明此时的仿真系统受限于逆变侧的强度;更具体的,如果与图3中的  $SCR_r = 3.0$ 、 $SCR_i = 2.5$  仿真得到的输送功率极限值为1.019(pu)相对比,其所能输送的功率极限为1.019(pu),二者相等,说明当系统逆变侧的强度只能维持在一个较小值时(可以保证系统在额定情况下稳定运行),加强系统整流侧的强度并不能提升系统输送功率的能力。那么,在系统输送功率的能力与短路比的变化关系中,存在转折短路比,且能够验证转折短路比的大小在4.0左右。

## 5 结论

本文基于对整流站运行特性的分析,联系逆变站功率运行特点,提出了影响直流系统输送最大功率的短路比指标,并建立算例进行分析计算,验证所提模型及指标的有效性。研究得到的结论如下:

- ① 送端交流系统强度会在一定程度上制约直

流输电系统的输送能力。在两侧交流系统的强度均能保证直流输电系统在额定控制状态时稳定运行的情况下，直流输电系统输送功率的能力在某种状况下主要受制于逆变侧交流系统的强度，而在另一种状况下主要受限于整流侧交流系统的强度，其中存在一个转折短路比，可以作为判断整个系统输送功率主要受哪一侧强度的影响的指标。

② 如果两侧的系统强度都弱于定义的转折短路比，那么直流输电系统的输送功率能力主要受受端交流系统强度的影响；如果两侧的系统强度同时强于转折短路比，主要由送端交流系统强度来决定系统的输送功率能力。

本文的研究成果将对直流系统落点选择位置以及直流系统规划阶段确定其额定运行功率的大小具有指导意义。在论文研究的基础上，进一步需要确定当已知送端和受端交流系统短路容量的情况下，如何确定直流系统最大输送功率与额定功率的大小。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.  
XU Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems part I: HVDC transmission capability [J]. Power System Technology, 1997, 21 (1): 12-16.
- [2] KUNDER P. Power system stability and control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 351-354.
- [3] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(17), 24-30.  
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems [J]. Power System Technology, 2009, 33 (17), 24-30.
- [4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 106-112.
- [5] 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: 153-155.
- [6] 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, 2004: 61-66.
- [7] DENIS L H A, ANDERSSON G. Impact of dynamic modeling on power system of HVDC system [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(3): 1427-1437.
- [8] FRANKEN B. Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems [J]. IEEE Transaction on Power System, 1990, 5(1): 235-242.
- [9] HAMMAD A E, KVHN W. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1): 209-216.
- [10] 邱革非, 束洪春, 董俊等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究 [J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005(3): 50-55.  
QIU Gefei, SHU Hongchun, DONG Jun, et al. Analysis of power transmission capability and voltage stability of HVDC system connected to weak AC system [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2005, 30 (3): 50-55.
- [11] 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.  
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28 (31): 1-8.
- [12] DENIS L H A, ANDERSSON G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13 (3): 923-931.
- [13] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源等. 基于无功有效短路比的交直流交互影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 74-78.  
WANG Pengfei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Interaction analysis of AC/DC systems based on multi-infeed effective short circuit ratio [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40 (6): 74-78, 85.
- [14] 陈静, 刘涤尘, 廖清芬等. 多送端直流紧急功率相互支援的评估标准 [J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2416-2421.  
CHEN Jing, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Assessment index of emergency DC power mutual support for HVDC transmission system with multiple sending ends [J]. Power System Technology, 2013, 37 (9): 2416-2421.

收稿日期: 2017-03-20

作者简介:

罗 钢(1987—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统分析与控制等, E-mail: luoganghust@163.com;

刘崇茹(1977—), 女, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为交直流混合系统分析、仿真、运行与控制, E-mail: chongru liu@ncepu.edu.cn;

李欣蔚(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流混合系统稳定与控制, E-mail: 461426782@qq.com.

(责任编辑: 林海文)