

基于短路比的VSC-HVDC交流换流母线脆弱性研究

高压直流输电逐渐在现代电网中得到广泛应用,与交流输电相比,直流输电具有输送功率大、输送距离远等优点。直流输电需要消耗大量的无功功率,会对交流系统换流母线电压稳定带来一些问题;同时,柔性直流输电技术在研究和工程上得到了越来越多的关注。然而,柔性直流输电虽然受无功功率影响较小,其换流母线仍然会有电压稳定问题,因此对于直流输电系统换流母线的脆弱性即电压稳定的评估日益受到关注。基于传统短路比的方法提出了适用于评价常规直流输电系统及柔性直流输电系统换流母线的脆弱性指标,最后在PSCAD/EMTDC中验证了所提指标的可行性和有效性。

翟学 郭紫昱 吴俊鹏/武汉大学电气工程学院



翟学/硕士研究生

关键词/Keywords

柔性直流·
电压稳定·
短路比·
脆弱性·

高压直流输电已成为国内大区互联和远距离大容量输电的重要形式,与交流输电相比,高压直流输电在技术上、经济上 and 安全性等方面具有优越性。目前,我国已建成和规划了多条直流输电线路,特别是负荷最为集中的华东和广东地区都建成了三条及以上直流线路的落点^[1-3];随着电力电子技术的进步,柔性直流输电技术^[4-5]也进入了人们的视野,柔性直流输电具有控制灵活、能够与交流系统相连等优点。高压直流系统的一个重要问题是要消耗大量的无功功率,这使得与直流端相连的交流端的电压稳定性变得日益重要;柔性直流输电虽然受无功功率影响较小,但其换流母线的电压稳定问题仍然存在。

当前,对于直流输电系统换流母线脆弱性即电压稳定性评估的研究较多,主要有:短路比法^[6],将交流系统短路容量与直流传输功率的比值定义为短路

比,并通过建模仿真证明了短路比越小,换流母线越脆弱,即电压稳定性越好;最大功率法^[7],通过求取有功-直流电流关系曲线来反映直流传输功率最大值的问题,进而分析换流母线的脆弱性电压稳定性,但其模型过于简化,结果与实际相比往往误差较大;电压稳定因子法^[8],分析中定义在给定的有功功率的水平下,无功功率的变化引起换流变压器交流侧母线电压的变化,该方法仅能定性判断当前系统运行方式下电压是否稳定,不能定量确定电压稳定的裕度问题。以上这些评估方法都是针对常规直流输电系统的,对于柔性直流输电系统而言,目前还没有专门评估交流母线的脆弱性指标。

本文针对直流输电和柔性直流输电的共通性,在短路比的基础上提出一种对柔性直流输电同样适用的交流换流母线脆弱性研究方法。该方法是采用直流传输功率与交流系统短路容量的比值作为评价指标,并将不同情况下的指标进一步进行归一化处理,形成统一评价指标,能更直观地比较各交流母线电压的脆弱性。通过在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型并仿真计算,验证了该指标的合理性和可行性。

短路比定义

交流和直流的相互作用在很大程度上取决于交流系统与所连直流系统容量的相对大小,即短路比指标^[2],这是评价受端电网电压支撑能力和接受直流功率能力的重要量化指标,被广泛应用于受

端电网的结构设计和运行分析。

短路比主要反映的是交流系统之间的相互作用，具体而言，交直流混合电网中，直流输电对交流电网的影响表现为直流功率变化对交流系统的影响；交流系统对直流输电的影响表现在交流故障和扰动对直流输送功率的影响。

脆弱性指标的定义

如图1所示，在短路比的基础上，定义新的直流输电系统换流母线的电压稳定的脆弱性评价指标

$$V_{ui} = \frac{P_{di}}{S_{sci} - Q_{fi}} \quad (1)$$

式中， P_{di} 为所研究传输线的直流输送功率； S_{sci} 为逆变侧换流母线的短路容量； Q_{fi} 为该换流母线处的无功补偿。

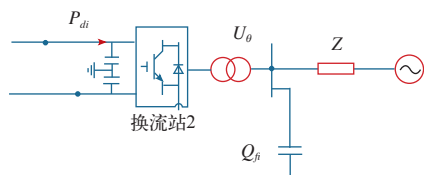


图1 直流输电系统

更进一步，可以定义脆弱性评价指标最大值为 $V_{u\max}$ ，其他情况下的脆弱性指标以 $V_{u\max}$ 为基准，定义为

$$\lambda_i = \frac{V_{ui}}{V_{u\max}} \quad (2)$$

式中， λ_i 值都是处于0~1之间的数值， λ_i 最大为1。

λ_i 值越大，说明此时换流母线的脆弱性指标越大，其电压稳定性越差；反之， λ_i 值越小，说明此时换流母线的脆弱性指标越小，其电压稳定性越好。

显然，新定义的换流母线的脆弱性指标与短路比指标的本质相同，因此，脆弱性指标在常规直流系统的应用上与短路比相同，本文不再对此赘述。

柔性直流输电换流母线脆弱性指标具体表述

1. 柔性直流输电模型概述

柔性直流输电的基本原理如图2所示，送端

和受端均采用VSC型换流器（电压源换流器），两个换流器具有相同的结构。换流器采用的是两电平六脉动型，每个桥臂都由多个绝缘栅双极晶体管（IGBT或门极可关断晶闸管（GTO）串联而成。直流侧电容器可以为逆变器提供一定的电压支撑，同时也能缓冲桥臂关断时的电流冲击，减小直流侧谐波；换流电抗器是VSC与交流侧能量交换的枢纽同时起到滤波的作用；交流滤波器的作用是滤除交流侧的谐波。

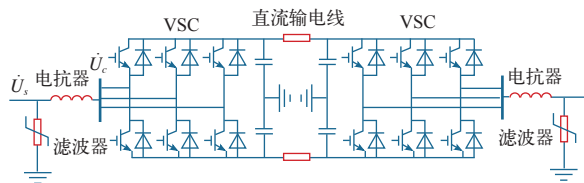


图2 柔性直流输电系统模型

设交流母线电压基波分量为 U_s ，逆变器输出电压基波分量为 U_c ， U_c 滞后于 U_s 角度 δ ，换流电抗器电抗为 X ，则忽略谐波时，换流器吸收的有功功率为

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (3)$$

所吸收的无功功率为

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (4)$$

由式（3）和式（4）可知，柔性直流输电系统的逆变器吸收的有功功率与 δ 有关，吸收的无功功率与 $(U_s - U_c \cos \delta)$ 有关，这也是柔性直流与常规直流的不同之处，柔性直流可以通过控制 δ 来控制直流电流的方向和输送功率的大小；通过控制 U_c 来控制无功功率的传输方向和大小，不需要额外的无功补偿。

2. 两端柔性直流输电换流母线脆弱性指标研究^[12-15]

两端柔性直流输电系统模型如图3所示。

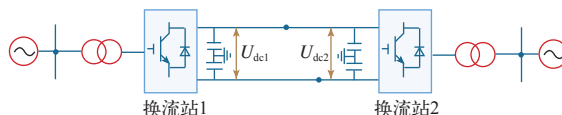


图3 两端柔性直流输电系统模型

从上述中得到，常规直流的换流母线脆弱性

指标为

$$V_{ui} = \frac{P_{di}}{S_{sci} - Q_{fi}} \tag{5}$$

对于两端柔性直流输电而言，与常规直流输电不同的是其换流母线上不需要无功补偿，即没有 Q_{fi} 项，故其换流母线脆弱性指标为

$$V_{ui} = \frac{P_{di}}{S_{sci}} \tag{6}$$

3. 三端柔性直流输电系统

三端柔性直流输电系统模型如图4所示。

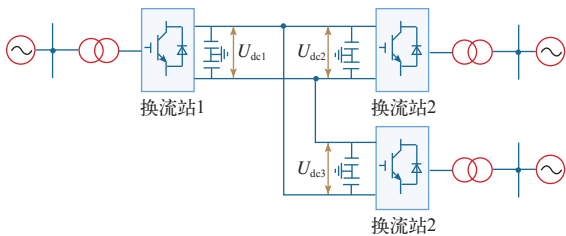


图4 三端柔性直流输电系统模型

当系统为三端系统时^[12]，与常规的多馈入直流系统不同，其交流系统之间没有相互作用，可看作是独立的。在定义多端柔性直流输电系统的换流母线脆弱性指标时，交流系统的短路容量不变，直流功率可看作是所研究端口的直流功率的代数和及输出与输入功率之差，如图5所示。

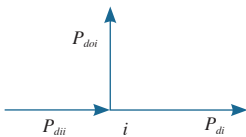


图5 直流功率等效图

$$P_{di} = P_{dii} - P_{doi} \tag{7}$$

式中， P_{dii} 和 P_{doi} 分别为母线 i 处的输入功率和输出功率。

其换流母线脆弱性指标为

$$V_{ui} = \frac{P_{di}}{S_{sci}} = \frac{P_{dii} - P_{doi}}{S_{sci}} \tag{8}$$

仿真验证

对于常规直流及多馈入直流系统而言，其换流母线的脆弱性指标与传统的短路比指标本质一致^[9-11]，本文仅将换流母线的脆弱性指标应用在两

端柔性直流及多端柔性直流系统中。

在PSCAD/EMTDC中搭建的柔性直流输电系统模型（见图3、图4）。

1. 两端柔性直流系统

对于图3的两端柔性直流系统仅研究其逆变侧即换流站2侧母线的脆弱性。

(1) 直流侧故障

在直流输电线路设置接地故障导致直流闭锁，故障起始时间为1 s，0.05 s后切除故障，其换流母线的电压变化情况如图6所示。

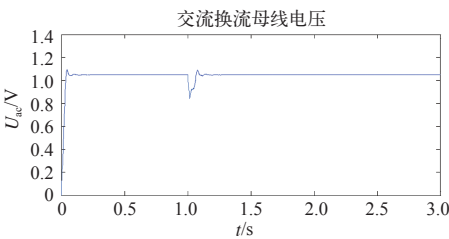


图6 直流侧故障换流母线电压1

从图6可以看到，当1 s时直流线路发生故障，换流母线电压跌落，切除故障电压又恢复到正常水平。这与常规直流输电系统不同，常规直流输电系统在直流故障导致闭锁时换流母线由于无功功率过剩会出现动态过电压。

通过改变逆变侧交流等值阻抗来改变逆变侧交流系统的短路容量，以改变其换流母线的脆弱性指标。根据上述的换流母线脆弱性指标计算公式可以得到不同情况下的脆弱性指标。在不同的换流母线脆弱性指标下得到相同故障下不同的换流母线电压跌落值，整理后得到数据如表1所示。

表1 直流故障时交流母线电压跌落1

脆弱性指标 V_{ui}	归一化指标 λ_i	电压跌落量
0.339 0	1	0.305 2
0.225 7	0.665 8	0.234 1
0.112 7	0.332 4	0.178 9
0.056 5	0.166 7	0.151 1

从表1中可知，当直流线路发生故障时，换流母线脆弱性指标越大，换流母线上产生的电压跌落越大，说明换流母线的电压稳定性越差；反之，换流母线脆弱性指标越小，换流母线上产生的电压跌落越小，说明换流母线的电压稳定性越好。

(2) 交流侧故障

在逆变侧换流母线附近的交流系统中设置三相接地短路故障，故障起始时间为1 s，故障时间为0.05 s。用直流电压的恢复代表直流功率的恢复，比较其在故障切除后的直流功率恢复速度。其直流电压变化情况如图7所示。

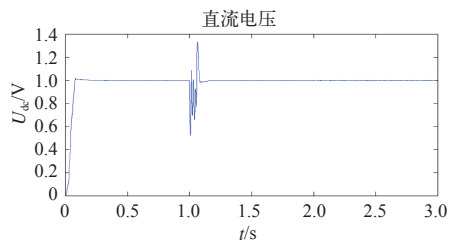


图7 交流侧故障直流电压1

通过改变逆变侧交流等值阻抗来改变逆变侧交流系统的短路容量，以改变其换流母线的脆弱性指标。在不同的换流母线脆弱性指标下得到相同故障下不同的直流电压故障切除后的恢复情况。以切除故障后直流电压回到正常水平的恢复时间为研究对象，整理后得到数据如表2所示。

表2 交流侧故障结果1

脆弱性指标 V_{m1}	λ_1	直流功率恢复时间
0.339 0	1	0.150
0.225 7	0.665 8	0.131
0.112 7	0.332 4	0.078
0.056 5	0.166 7	0.062

从表2中可知，当逆变侧交流系统线路发生故障时，换流母线脆弱性指标越小，直流电压即直流功率的恢复时间越短，说明交流系统对直流的支撑能力越强；反之，换流母线脆弱性指标越大，直流功率的恢复时间越长，说明交流系统对直流的支撑能力越差。

2. 对于多端柔直系统而言

在定义多端柔性直流输电系统的换流母线脆弱性指标时，交流系统的短路容量不变，直流功率可看作是所研究端口的直流功率的代数和及输出与输入功率之差。

本文仅研究换流站3侧的换流母线脆弱性。

(1) 直流侧故障

在直流输电线路路上设置接地故障导致直流闭

锁，故障起始时间为1 s，0.05 s后切除故障。其电压变化情况如图8所示。

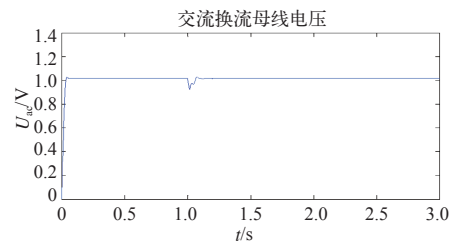


图8 直流侧故障换流母线电压2

通过改变逆变侧交流等值阻抗来改变逆变侧交流系统的短路容量，以改变其换流母线的脆弱性指标。在不同的换流母线脆弱性指标下得到相同故障下不同的换流母线动态过电压情况，整理后得到数据如表3所示。

表3 直流故障时交流母线电压跌落2

脆弱性指标 V_{m2}	归一化指标 λ_2	电压跌落量
0.585 2	1	0.322 3
0.495 2	0.846 2	0.285 9
0.256 1	0.437 6	0.135 6
0.098 5	0.168 3	0.095 0

从表3中可知，当直流线路发生故障时，换流母线脆弱性指标越大，换流母线上产生的电压跌落越大，说明换流母线的电压稳定性差；反之，换流母线脆弱性指标越小，换流母线上产生的电压跌落动态过电压越小，说明换流母线的电压稳定性越好。

(2) 交流侧故障

在逆变侧换流母线附近的交流系统中设置三相接地短路故障，故障起始时间为1 s，故障时间为0.05 s。其电压变化情况如图9所示。

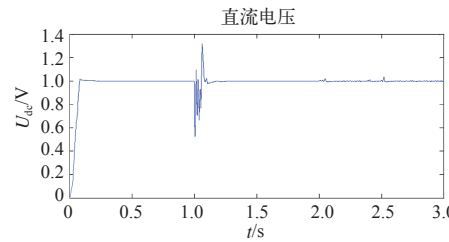


图9 交流侧故障直流电压2

通过改变逆变侧交流等值阻抗来改变逆变侧交流系统的短路容量，以改变其换流母线的脆弱

性指标。与两端柔性直流相同，得到其不同脆弱性指标下的直流电压恢复时间，整理后得到数据如表4所示。

表4 交流侧故障结果2

脆弱性指标 V_{cr}	λ_i	直流功率恢复时间
0.585 2	1	0.243
0.495 2	0.846 2	0.210
0.256 1	0.437 6	0.163
0.098 5	0.168 3	0.102

与两端柔性直流输电相同，从表4中得到，当逆变侧交流系统线路发生故障时，换流母线脆弱性指标越小，直流功率的恢复时间越短，说明交流系统对直流的支撑能力越强；反之，换流母线脆弱性指标越大，直流功率的恢复时间越长，说明交流系统对直流的支撑能力越差。

结束语

本文分析研究了常规直流输电和柔性直流输电的异同点，在传统短路比的基础上，提出了换流母线脆弱性的分析方法并形成了统一的评价指标，并将该指标运用到两端柔性直流输电系统及多端柔性直流输电系统中，通过在PSCAD/EMTDC中搭建相关模型并进行仿真，验证了文章提出的换流母线脆弱性指标的有效性和合理性。

换流母线脆弱性评价指标物理意义清晰，计算简便，适用于各类直流输电系统。后续研究中要进一步形成换流母线的临界脆弱度指标（即电压稳定临界点所对应值的脆弱性指标），为提高直流输电系统电压稳定性提供指导和参考。

参考文献

[1] 黄弘扬，徐政，许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性分析 [J]. 电力自动化设备，2012，32 (11)：46-50.

[2] 韩显芳. 交直流受端电网电压稳定性研究 [D]. 济南：山东大学，2013.

[3] Paulo F D T, Bernt B, Gunnar A. Multiple infeed short circuit ratio: aspects related to multiple

HVDC into one AC network [C]. Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, Dalian, China, IEEE, 2005: 1-6.

[4] 汤广福，贺之渊，庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化，2013，37 (15)：3-13.

[5] Hammad A E, Kuhn W. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1 (1)：209-215.

[6] 林伟芳，汤涌，郭小江. 多馈入直流系统短路比影响因素分析 [J]. 电网技术，2011，35 (8)：64-68.

[7] 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.

[8] 胡艳梅. 交直流混联电力系统静态电压稳定性分析及FACTS优化配置研究 [D]. 北京：北京交通大学，2014.

[9] 洪潮，饶宏. 对馈入直流系统的量化分析指标及其应用 [J]. 南方电网技术，2008，2 (4)：37-41.

[10] 李召兄. 直流多落点系统量化指标的研究 [D]. 保定：华北电力大学，2010.

[11] 郭启伟. ± 660 kV银东直流系统动态特性研究 [D]. 济南：山东大学，2012.

[12] 黄建涛，王晓虹，艾芊. 三端无源网络柔性直流输电的仿真研究 [J]. 华东电力，2013，41 (8)：1658-1662.

[13] 郑超，滕松，宋新立. 百万千瓦级柔性直流接入大连电网后的系统特性分析 [J]. 电力系统自动化，2013，37 (15)：15-20.

[14] 顾益磊，唐庚，黄晓明. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析 [J]. 电力系统自动化，2013，37 (15)：27-34.

[15] Zhang L, Harnefors L, Nee H P, et al. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (2)：783-793.

(收稿日期：2015-03-08) **EA**