

短路比指标在多直流馈入电网中的应用分析

程 昕

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要 目前, 高压直流输电已经成为我国大区互联和远距离大容量输电的重要形式, 其中以广东的直流落点为最甚, 多个直流逆变站之间的电气距离非常接近, 给电网的安全运行增加了很多潜在的风险。本文以南方电网为研究对象, 研究有多回直流馈入的广东电网各个换流母线的电压支撑能力。本文研究了各种短路比指标与直流闭锁前后受端系统的稳态电压支撑能力间是否存在定量的关系。短路比指标中的两个因素分别是短路容量和直流功率, 因此利用 BPA 进行仿真时, 不断调整电网的线路长度和直流功率, 以研究短路容量和直流功率对受端系统的电压跌落水平的影响。本文在进行直流闭锁后受端换流母线稳态电压跌落时, 同时保留不同的直流线路和直流回数来调整仿真模型, 以研究直流回数对受端电压稳定性的影响。

关键词: 异步电网; 多直流馈入; 短路比

Analysis of Short Circuit Ratio Index Application in Multi-Infeed-HVDC Grid

Cheng Xin

(Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510663)

Abstract At present, HVDC has been the important form in the wide interconnected area and Large-capacity、long-distance transmission. The most number of the HVDC infeed has been formed in Guangdong Power Grid among South China Grid. The electric distance between DC inverter stations very closely and increase a lot of potential risk. South China Power Grid is used as the testing model in the paper, the voltage supporting ability of commutation bus in the multi-HVDC-infeed Guang Dong Power Grid is studied. SCRs are studied to make out if they have relationship with the voltage supporting strength of commutation bus before and after the DC latching fault. In SCR Index, there are two factors which are capacity of short circuit and HVDC power. As the BPA has been used to emulate, line's length and the DC power continuously are adjusted to research the effect on the voltage stability of the receiving grid by the capacity of short circuit and HVDC power. As the static voltage drop level under DC and AC failure are emulated, different HVDC lines have been retained to adjust model, the effect on the voltage stability by different numbers of HVDC has been found out.

Keywords: asynchronous power grid; Multi-Infeed HVDC; short circuit ratio

目前, 高压直流输电已经成为国内大区互联和远距离大容量输电的主要形式。随着直流线路的增加, 计及系统和与之相联的其他直流系统的影响, 与直流感相连的交流端的电压支撑能力的问题变得日益严重。国内外的学者严重关注这类问题并展开了不同程度的研究, 其中有两个交直流电网的安全问题最为关注: 一是交流故障引起直流换相失败; 一是直流故障对受端交流电网的电压稳定冲击。对

于前者, CIGRE 提出了多馈入相互作用因子 MIIF (Multi-Infeed Interaction Factor), 并且文献[1]通过 2008 年南方电网模型下的仿真实证了 MIIF 指标与多馈入直流换向失败间存在明确的关系, 但该指标有待量化。文献[2]中提出了电网结构强度指标 TVSI (Transient Voltage supporting Index), 明晰了 MIIF 指标的物理结构意义, 对电网规划设计和直流落点的选择更具有指导意义。对于后者, 至目前为止,

还没有形成一个统一的、针对性强的方法，基本上是在评估纯交流电网的电压稳定指标的基础上进行小的改动，定义了各种各样的电压稳定评估指标^[3-7]，其中用来评估受端电网强度的短路比指标被广泛应用。随着受端电网直流馈入回数的增加，学术界和工程界开始重视如何在短路比指标中考虑直流间的相互影响及其助增效应的问题，近年来相继提出了考虑多回直流相互影响的各种改进的短路比指标^[8-11]。

面对含有±800kV特高压直流和多直流输电通道的交直流大电网，同时有多回直流馈入广东受端电网内部，广东电网的电压支撑能力的问题变得日益突出和非常重要，因此以广东电网作为典型的多馈入直流的受端电网为研究对象，进行受端电网的稳态电压支撑能力指标的研究是十分必要和有意义的。

本文以近年来主要的直流短路比指标为算法模型，通过BPA仿真分析它们与受端电网的稳态电压支撑强度之间的关系。

1 主要的算法模型和仿真模型的介绍

1.1 算法模型介绍

1) SCR 指标

在评估直流受端的换流母线的短路比，HVDC换流站可以看为一个连接在交流系统上的一个特殊性能的负荷，其特性受到所连接的交流系统的强度影响。

文献[8]给出了交直流系统中换流母线短路比SCR(short circuit ratio)的定义：

$$SCR = \frac{\text{换流母线的系统三相短路容量(MVA)}}{\text{直流换流站馈入的额定直流功率(MW)}} = \frac{S_{CR}}{P_{dN}} \quad (1)$$

式中， S_{CR} 为换流母线上的系统三相对称短路容量， P_{dN} 为换流站馈入的额定功率。从上式可以看出，短路比指标没有考虑系统中存在的直流的回数，也即是说没有考虑直流间可能存在的相互影响对受端系统强度的影响。

2) MSCR 指标^[8-12]

文献[12]提出了一种针对含有多馈入直流电网的短路比指标，其思路是将MIDC换流站简化为戴维南电路的恒电压源、等值的短路阻抗和连接换流站交流母线间的线路等值阻抗，由此定义出MIDC电网中的短路比数学模型如下：

$$M_{SCR_n} = \frac{1}{\sum_{m=1}^k P_{dc}(m) \times z_{n,m}} \quad (2)$$

式中， k 为HVDC换流站总数； $P_{dc}(m)$ 为第 m 回直流的额定功率标幺值； $z_{n,m}$ 为仅保留换流母线时节点阻抗矩阵 Z_{BUS} 的元素标幺值（可通过自行编制的Matlab网络化简程序求得），反映了换流站 m 对换流母线 n 的参与度。实际应用中可用直流运行功率代替额定功率，得出运行 $MSCR$ 指标。相关研究文献对该定义并没有给出定量的解释，仅给出了定性分析和简单的测试。

3) CIGRE-MIESCR 指标^[10-11]

2007年，CIGRE的多馈入直流系统研究工作组(WG B4-41)提出了一组评估多馈入直流系统中邻近逆变站相互作用特性以及交流系统相对强弱的新量化指标 $MIESCR$ ，具体如下：

$$MIESCR = \frac{(S_{sci} - Q_{ci})}{P_{dc} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (MIIF_{ji} \times P_{dcj})} \quad (3)$$

式中， S_{sci} 是直流 i 逆变站换流母线的交流系统三相短路容量； Q_{ci} 为逆变站并联补偿无功功率； P_{dc} 、 P_{dcj} 分别是直流 i 、 j 的功率。

与式(2)相比，式(3)的主要变化是用一个运行指标 $MIIF$ 代替了结构指标(节点阻抗矩阵元素)作为直流功率的加权系数。 $MIIF$ 可通过以下仿真方法获得。

直流输电系统运行于额定功率时，在其逆变站换流母线 i 上投入并联无功负荷以造成换流母线电压约1%的阶跃跌落(ΔV_i)，计算其他逆变站换流母线 j 的电压变化百分数 ΔV_j ，则逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子 $MIIF_{ji}$ 定义为

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (4)$$

1.2 仿真模型介绍

1) 基本的网络模型

本文以2010年丰大方式下的南方电网为研究本，根据研究的需要，采用了以下两种基本的网络模型以分别研究交直流并联网和异步电网：

模型一是全网络结构的2010年丰大方式下的南方电网，网络中存在八回交流通道以及四回直流通道，构成了交直流并联系统。其中八回交流通道

分别为：桂林—贤令山、贺州—罗洞、梧州—罗洞、玉林—茂名，均为 500kV 双回线路。四回直流通道分别为：云广、贵广 I、贵广 II、天广直流线路，在广东电网落点分别为穗东、肇庆、宝安、广州换流站。同时包含三广直流的落点鹅城换流站。

模型二是在模型一的基础上，通过改变送受端负荷和区域间的交换功率，将广西到广东的交流通道切断，网络变成只有四回直流连接送受端的异步电网。

2) 每种模型下的网络调整

在研究分析过程中，需要进行直流间的影响以及电网强度的分析，因此在上面两个基本模型下，需要对网络进行进一步的调整。

(1) 直流回数的调整。

在模型一和模型二下，又可分别建立含有单回直流、五回直流直至五回直流的 5 组电网仿真模型。这 5 组模型是在含有五回直流的南方电网基础模型中逐回删除直流通道构造的。采用了送端加恒功率负荷和受端加恒功率电源的方式消去直流通道。这样做的优点是能保持 5 组模型的稳态潮流分布相同，有利于消除潮流因素对对比分析的干扰。

(2) 线路电气连接强度的调整。

为了进行不同短路比电网间的定量比较，对每个模型均逐步改变电网不同区域的线路参数，形成了以下 7 种网架结构，对应编号如下：

#1：保持南方电网的实际线路长度。

#2—#4：选择受端电网的 12 条线路（北郊—罗洞、北郊—花都、北郊—蓄能、北郊—增城、博罗—花都、博罗—横沥、东莞—横沥、西江—江门、西江—罗洞、西江—砚都、高明—砚都、砚都—肇庆换），将这些线路长度分别增加到实际值的 1.4、1.8 和 2.2 倍。

#5—#7：选择送电通道上的 8 回线路（桂清 I、II 线；贺罗 I、II 线；梧罗 I、II 线；玉茂线 I、II 线），将线路长度分别增加到实际值的 1.4 倍、1.6 倍、1.8 倍。

3) 分析方法介绍

本文利用 BPA 软件，通过仿真记录直流闭锁发生后，在新的稳态运行下的受端电网换流母线的电压水平，并计算出该值相对于直流闭锁前稳态电压的跌落幅度，本文称之为换流母线的稳态电压跌落值，以此值来代表母线的稳态电压支撑能力。

由于直流闭锁涉及到直流功率的转移，对于异

步电网和交直流并联电网，直流功率的转移方式截然不同，前者是通过网络内部自身的发电机进行出力调节以达到功率平衡；后者将会引起输电线路有功潮流的重新分布，丢失的直流功率将会转移到交流通道上来输送到受端系统，而间接又会引起无功潮流的变化，因此将分别对异步电网和交直流并联电网作为对象进行研究。

2 短路比指标在异步电网中的测算与评估

2.1 短路比指标与受端电网稳态电压支撑强度的关系

由式（1）可以看出，短路比 SCR 指标不考虑直流间的相互影响，为获得反映直流功率对交流电网电压冲击的准确的数据和关系，以只含有单回直流的电网为模型，消去其他直流，排除直流换流站之间可能存在的相互影响，以隔离干扰因素。

以模型二为研究对象，分别以系统只含有贵广 I、贵广 II、天广、三广的单直流馈入为例。

从额定功率开始，每次以 300MW 的步长幅度逐步减少直流线路的输送功率，仿真记录直流闭锁前后的各受端母线稳态和母线短路容量，构成分析数据库，按照式（1）计算各个换流母线的短路比，具体的数据见表 1。

表 1 各换流母线的稳态电压跌落值与短路比的关系

短路比	稳态电压 跌落值/ p.u.	短路比	稳态电压 跌落值/ p.u.	短路比	稳态电压 跌落值/ p.u.
6.6258	0.0186	24.3135	0.0193	6.5343	0.0248
7.3326	0.0196	30.3979	0.0149	7.4654	0.0253
8.2451	0.0201	40.5362	0.0117	8.6937	0.0248
9.4240	0.0201	60.8118	0.0072	10.4683	0.0227
10.9927	0.0196	121.6253	0.0033	13.0803	0.0203
13.2489	0.0182	8.4704	0.0592	17.3797	0.0177
...

做成散点图如图 1 所示。

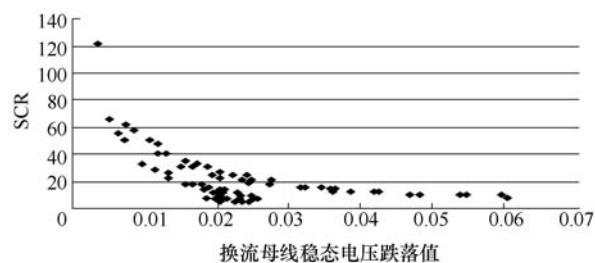


图 1 换流母线的短路比与其稳态电压跌落值的关系图

从图 1 可以发现，换流母线的扰动前后稳态电压的跌落水平与短路比存在着较良好的线性关系。

2.2 各种短路比指标评估稳态电压支撑能力的效果对比

在模型二中，选择只保留贵广 I 和天广两回直流（其他直流转化为等值负荷），在网络结构#1—#4下，通过计算，求得肇庆和北郊换流母线的 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 的数值。为了对比参考，继续增加贵广 II 和云广直流，形成四回直流，将 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 与 SCR 进行对比，计算的结果见表 2。

表 2 SCR 、 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 的对比表

SCR	北郊				肇庆			
	$MSCR$		$MIESCR$		SCR	$MSCR$		$MIESCR$
	双回 直流	四回 直流	双回 直流	四回 直流		双回 直流	四回 直流	双回 直流
32.8	22.2	12.4	14.0	6.9	9.5	8.7	7.9	7.9
27.2	19.2	11.3	11.8	5.9	8.0	7.4	6.9	6.3
25.1	18.0	10.9	10.6	5.5	7.4	6.9	6.5	6.1
23.3	17.0	10.5	10.1	4.9	6.9	6.5	6.1	5.6
								3.5

做成散点图如图 2 所示。

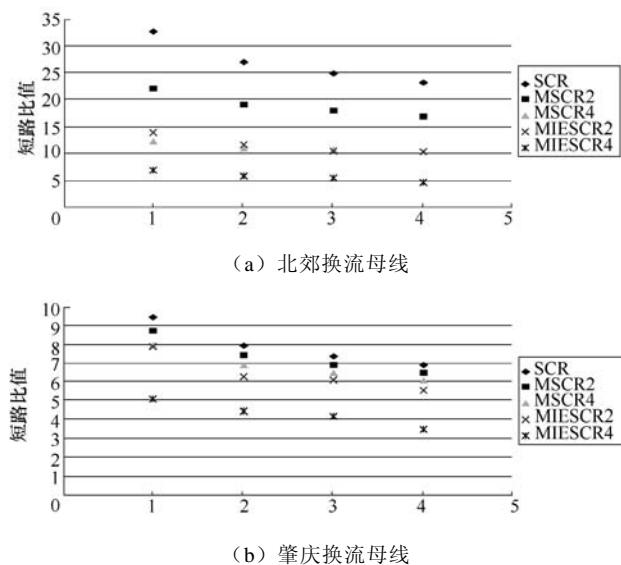


图 2 SCR 、 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 的对比图

可以发现，受端电网嵌入直流动数越多，各换流母线的 $MSCR$ 、 $MIESCR$ 指标下降幅度越大。在相同网架下，各指标在数值上一般有如下规律： $MIESCR < MSCR < SCR$ 。

3 短路比指标在交直流电网中的测算与评估

3.1 短路比指标与受端电网稳态电压支撑强度的关系

以模型一为研究对象，分别选择贵广 I 回和贵广 II 回直流为代表，它们各自的落点分别为肇庆和宝安换流站，分别位于远离广东电网的负荷中心及处于广东电网的负荷中心。将其他直流全部转化为等值电源和等值负荷，分别形成单直流馈入系统，从额定功率开始，每次以 300MW 的步长幅度逐步减少直流线路的输送功率，仿真记录直流闭锁前后的各受端母线稳态电压值和系统三相短路容量，构成分析数据库，并按照式（1）计算各个换流母线的短路比。

1) 肇庆换流母线

将模型一中除了贵广 I 回的其他直流全部转化为等值电源和等值负荷，直流落点在广东电网的肇庆站。

获得的肇庆换流母线短路比与电压跌落的关系数据见表 3。

表 3 肇庆换流母线的稳态电压跌落值与短路比的关系

直流功率 /MW	改变受端所选长度		改变送端所选长度	
	短路比	电压跌落/ p.u.	短路比	电压跌落/ p.u.
3000	8.62197	0.03704	8.63803	0.03177
2700	9.56285	0.03679	9.58111	0.03179
2400	10.73817	0.03586	10.75863	0.03118
2100	12.24833	0.03428	12.2719	0.03
3000	7.81063	0.03633	8.59273	0.03836
2700	8.66256	0.03648	9.52926	0.03829
2400	9.72692	0.03592	10.69938	0.03729
2100	11.09405	0.0346	12.20243	0.03602
...
2100	8.27448	0.03512	12.00648	0.06273

将肇庆换流母线的稳态电压跌落值与短路比关系做成散点图，如图 3 所示。

从图 3 可以看出：

(1) 改变受端所选线路的长度时，从对应的散点可以很明显的看出，肇庆换流母线的短路比在很大的范围内变化，但是肇庆换流母线的稳态电压跌落值变化很小，在 0.035p.u.附近浮动。

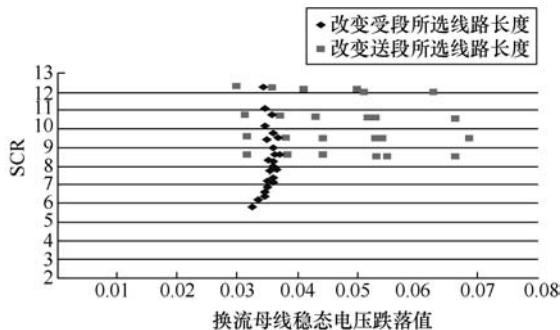


图3 肇庆换流母线的短路比与肇庆换流母线的稳态电压跌落值的关系图

(2) 端所选线路的长度时，在直流输送功率一定的情况下，肇庆换流母线的短路比变化很小，但是此时肇庆换流母线的稳态电压跌落值随着送端所选线路长度的改变而发生明显的变化，从约0.03p.u.增到了约0.07p.u.。

表明在交直流并联系统中，肇庆换流母线的短路比与直流闭锁后的肇庆换流母线电压跌落水平不存在定量关系。

2) 宝安换流母线

将模型一中除了贵广II回的其他直流全部转化为等值电源和等值负荷，直流落点在广东电网的宝安站。

获得的宝安换流母线短路比与电压跌落的关系数据见表4。

表4 宝安换流母线的稳态电压跌落值与短路比的关系

直流功率/ MW	改变送端所选长度		改变受端所选长度	
	短路比	电压跌落 /p.u.	短路比	电压跌落 /p.u.
3000	10.21923	0.00971	10.21577	0.01009
	10.21300	0.01006	9.54597	0.01022
	10.20720	0.01060	8.97020	0.01041
	10.20150	0.01130	8.46957	0.01064
	10.19417	0.01138	8.02993	0.01094
2700	11.34937	0.01042	11.34552	0.01066
	11.34230	0.01086	10.60133	0.01094
	11.33552	0.01121	9.96159	0.01130
	11.32867	0.01134	9.40548	0.01172
	11.32526	0.01166	8.91719	0.01206
2400	12.76258	0.01041	12.75808	0.01087
	12.75417	0.01091	11.92096	0.01132

将宝安站换流母线的稳态电压跌落值与短路比关系绘成散点图，如图4所示。

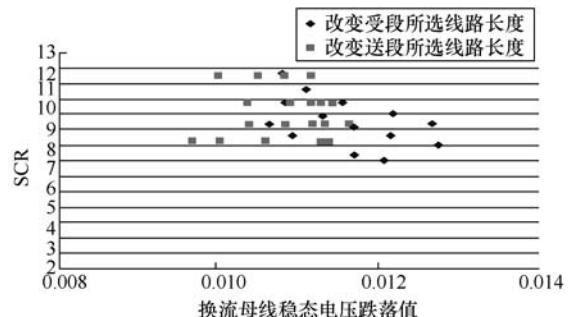


图4 宝安换流母线的短路比与肇庆换流母线的稳态电压跌落值的关系图

对比表3和表4可以看出以下规律：

1) 直流落点深入到广东电网内部，送端和受端线路长度变化对换流母线短路容量的影响程度及其规律基本不变。仍然体现出“西电东送”线路长度对短路比的影响远小于广东电网线路长度的影响这一规律。

2) 由于宝安站深入负荷中心，兴安直流闭锁对宝安换流母线电压水平的影响相对较小。同等直流功率下，宝安站电压在兴安直流闭锁后的跌落幅度只有0.01p.u.左右，远小于肇庆换流母线在高肇直流闭锁后的电压跌落范围(0.03~0.05p.u.)。

3) 从表2、表3的 $|\Delta V/\Delta SCR|$ 结果可以看出，随着送端线路长度从1.0增大到1.8倍，肇庆换流母线的电压跌落变化量相对于短路比变化的比值高于宝安换流站，但是可以看出，“西电东送”线路长度对电压跌落的影响远远高于受端电网线路长度变化这一结论始终成立。

仿真表明在交直流并联系统中，宝安换流母线的短路比与直流闭锁后的宝安换流母线稳态电压跌落水平不存在定量关系。

3.2 各种短路比指标评估稳态电压支撑能力的效果对比

在模型一中，选择只保留贵广I和贵广II两回直流(其他直流转化为等值负荷)，在网络结构#1—#7下，通过计算，求得肇庆和宝安换流母线的 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 的数值。为了对比参考，继续增加天广和云广直流，形成四回直流，将 $MSCR$ 和 $MIESCR$ 与 SCR 进行对比，计算的结果见表5。

散点图如图5所示。

表 5 SCR、MSCR 和 MIESCR 的对比表

宝安				
SCR	MSCR		MIESCR	
	双回直流	四回直流	双回直流	四回直流
13.546	12.885	11.006	6.729	3.107
13.526	12.918	11.050	7.117	3.472
13.512	12.945	11.090	7.338	3.708
13.501	12.967	11.127	7.497	3.921
13.544	12.871	10.982	6.460	3.216
...

肇庆				
SCR	MSCR		MIESCR	
	双回直流	四回直流	双回直流	四回直流
9.690	9.347	6.815	8.032	5.523
8.025	7.807	6.004	6.869	5.149
6.937	6.784	5.404	6.028	4.707
6.153	6.040	4.935	5.392	4.335
9.637	9.291	6.744	8.592	7.172
...

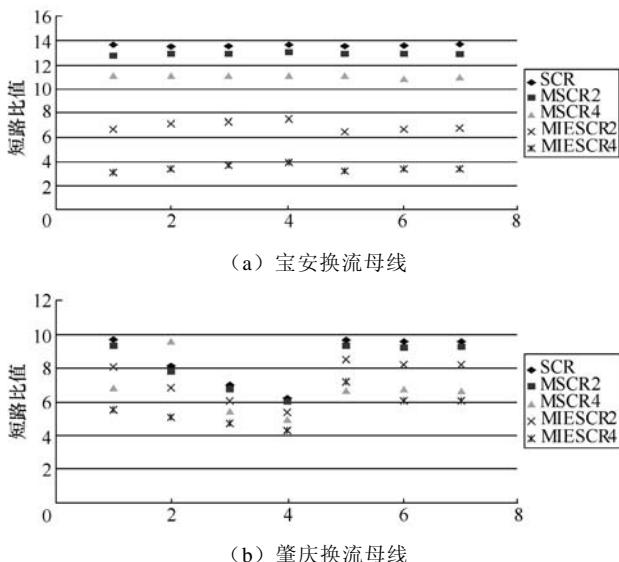


图 5 多直流馈入系统换流母线短路比指标对比图

通过以上的仿真和计算结果可以看出，在交直流并联系统中，短路比公式中的母线短路容量和直流动率不再是影响受端换流母线的稳态电压跌落水平的决定性因素，与直流并行的交流通道的电气长度以及落点距离负荷中心的远近是影响受端换流母线的电压跌落水平的主要因素。

各种短路比指标数值上的规律与异步电网的相

似，即受端电网馈入直流回数越多，各换流母线的 $MSCR$ 、 $MIESCR$ 指标下降幅度越大。相同网架下，各指标在数值上一般有如下规律： $MIESCR < MSCR < SCR$ 。

下面将继续研究直流回数对受端电网换流母线稳态电压跌落水平的影响，而多馈入短路比指标是否与直流比锁后受端电网的电压跌落水平之间存在定量关系。

4 短路比指标在多馈入直流电网中的效用分析

在模型一和模型二中，即异步电网和交直流并联电网中，依次保留一回、两回、三回、四回及全部直流线路。不保留的直流线路被转化为送端等值负荷和受端等值电源。由此构造出含有单回和多回直流馈入的仿真电网模型。

为了考察不同直流落点和电气距离下直流之间的相互影响关系，仿真采用了以下 2 种网架结构调整方式：

1) 人为调整肇庆、北郊、穗东、鹅城等逆变站间的交流线路长度。

2) 人为开断广东 500kV 内环网和外环网的部分线路，包括江门—西江、砚都—高明和横沥—东莞等双回线路以改变网架结构，削弱换流站与受端系统的联系强度。

为了研究直流相互影响与运行条件和潮流水平的关系，仿真中同样采用了两种负荷调整方式：①整体比例增大广东电网全部负荷节点的负荷水平；②局部增大某个或者某几个换流站邻近负荷母线的本地负荷两种方式逐步改变运行条件，降低受端电网的整体电压稳定水平，以此观察和研究多回直流换流站节点电压和无功需求的变化和相互影响。

潮流仿真结果如下：

(1) 随着负荷水平的加重，广东电网整体电压水平逐步下降。但无论保留 1 回、两回、三回、四回还是全部五回直流，BPA 计算得出的各节点电压完全相同。

(2) 无论采用哪种负荷增长方式，当部分节点电压低到一定水平时，BPA 潮流不再收敛，无法获得较低电压水平下的电网潮流分布和电压水平。

(3) 采用削弱网架结构方式来降低电压水平同样遇到了 BPA 潮流不收敛的问题，无法研究较低电压水平下的直流相互影响。

通过以上仿真可以看出，当交流系统电压在一定范围内变化时，由于换流变的有载调压能力，此时直流闭锁后换流母线的稳态电压跌落与系统的直流通道回数无关，各模型中潮流计算出的节点电压相同。同时，*MSCR* 和 *MIESCR* 指标的数值是随着直流回数的增多而下降，因此是不能有效的反映直流闭锁后的受端电网的稳态电压支撑能力的。

针对流系统电压水平跌落到一定程度的仿真环境，由于 BPA 的潮流程序无法分析低电压水平下的交直流电网电压水平，还没有办法构造，因此本文暂时无法验证。

5 结论

本文通过一系列的有目的的仿真计算与分析，得出了以下结论：

1) 异步电网中短路比 *SCR* 指标与受端电网的稳态电压跌落值之间的确存在良好的定量关系。但是在交直流并联的同步电网中，短路比不再适用，短路比公式中的母线短路容量和直流功率不再是受端换流母线的的电压跌落水平的决定性因素，与直流并行的交流通道的电气长度以及落点距离负荷中心的远近是影响受端换流母线的的电压跌落水平的主要因素。

2) 系统在一定的电压水平下，直流闭锁后换流母线的稳态电压跌落与系统的直流通道回数无关。

3) *MSCR* 和 *MIESCR* 指标的数值是随着直流回数的增多而下降，因此不能反映直流闭锁后的受端电网的稳态电压支撑能力的。并且在同一个系统中，各指标在数值上一般有如下规律：*MIESCR* < *MSCR* < *SCR*。

参考文献

- [1] 吴冲，李兴源，何朝荣. 多馈入直流交互作用因子在换相失败研究中的应用[J]. 继电器，2007, 35(9): 26-31.
- [2] 金小明，周保荣，管霖，等. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化，2009, 33(15): 98-102.
- [3] 周双喜，姜勇，朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
- [4] 管秀鹏. 南方电网暂态电压稳定分析研究[D]. 北京：清华大学, 2004.
- [5] 王莉丽. 影响电力系统电压稳定性的因素分析[D]. 重庆：重庆大学, 2004.
- [6] 段献忠，何仰赞，陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.
- [7] 王义红，梅生伟. 基于稳定裕度指标的暂态电压稳定分析[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(2): 39-44.
- [8] Paulo Fischer de Toledo, Bernt Bergdahl, Gunnar Asplund. 多馈入 HVDC 交直流混合系统短路比的定义和应用[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(6): 19-25.
- [9] de TOLEDO, P BERGDAHL B, ASPLUND Gunnar. Multiple Infeed Short Circuit Ratio-Aspects Related to Multiple HVDC into One AC Network[C1]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.08.
- [10] Krishayya P C S, Adapa R, Holm M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities. Part I: AC/DC system interactionphenomena[R]. France: CIGRE, 1997.
- [11] DAVIES J B. CIGRE WG B4. 4 1 Report: Systems with Multiple DC Infeed[R]. CIGRE ELECTRA, August 2007.
- [12] Aik Lee Hau Denis, Andersson G. INFLUENCE OF LOAD CHARACTERISTICS ON THE POWERNOLTAGE STABILITY, part 1: BASIC EQUATIONS AND RELATIONSHIPS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, October, 1998, 13(4): 1347-1444.

作者简介

程昕（1983-），女，安徽安庆人，汉族，工程师，硕士研究生，主要从事变电站变电一次设计工作。