

## 特高压直流分层接入方式下层间交互影响研究

管永高, 张诗涵, 许文超

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**为研究特高压直流分层接入方式对电力系统带来的影响,分析了直流分层接入方式下层间交互影响因子的计算方法,对比不同计算方法之间的差异,分析其产生的原因。通过与传统接入方式的对比,研究了直流分层接入方式对层间交互影响、有效短路比以及暂态过电压的影响。结果表明直流分层接入方式下层间交互影响更小,各层有效短路比更大,暂态过电压更小。相比传统接入方式,直流分层接入方式更优。

**关键词:**分层接入; 层间交互影响因子; 有效短路比; 暂态过电压

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)02-0032-06

### 0 引言

随着高压直流输电技术的不断发展,直流接入电力系统的方式得到了越来越多的研究。2013年有学者提出了特高压直流分层的接入方式<sup>[1]</sup>。随后有学者进一步分析了分层接入方式的优点<sup>[2]</sup>,并从无功电压耦合特性<sup>[3]</sup>和受端接纳能力<sup>[4]</sup>等角度分析了特高压直流分层接入方式对电网带来的影响。

特高压直流分层接入方式作为一种新型直流接入方式,其层间交互作用以及给系统带来的影响亟待研究。目前对于直流分层接入系统的分析主要借鉴多馈入直流系统的分析方法,多馈入交互影响因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)是其中主要的指标之一<sup>[5]</sup>,MIIF主要表征多馈入直流系统各馈路间的交互影响程度。对于直流分层接入方式下层间交互影响因子(hierarchical interaction factor, HIF)的研究可借鉴MIIF的分析方法。目前关于MIIF的理论计算方法主要采用Denis提出的近似计算方法<sup>[6,7]</sup>。该方法是建立在受端交流系统等值的基础上,利用节点阻抗矩阵分析得到相应的MIIF,已有研究证明该方法和多馈入电压灵敏度因子、多馈入最大直流功率指标之间具有相同的物理意义<sup>[8]</sup>。同时,有学者对该方法进行了补充<sup>[9-12]</sup>。文献[9]研究发现考虑直流功率外特性后对MIIF计算将带来影响;文献[10]提出用暂态电压支撑强度指标来评估MIIF;文献[11]研究了整流侧换流站与逆变侧换流站之间的交互影响;文献[12]则研究了不同控制方式对MIIF的影响。近年来,随着一系列特高压交直流工程落点江苏,给江苏电网安全稳定运行带来了新的挑战<sup>[13-15]</sup>。其中,锡盟—泰州特

高压直流落点江苏苏北地区后将采用分层方式接入江苏电网,需对其带来的影响进行分析。

综上,直流分层接入方式下层间交互影响因子的计算方法仍需要进一步分析,而直流分层接入方式对层间交互影响又会带来怎样的影响仍不明确。鉴于此,本文将基于锡盟—泰州特高压直流分层接入系统对比分析直流分层接入方式下层间交互影响因子的不同计算方法,分析不同计算方法之间的差别。研究直流分层接入方式对HIF、有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)以及暂态过电压(transient over-voltage, TOV)的影响。

### 1 直流分层接入方式下 HIF 计算方法

图1为一个简单的双桥双极直流分层系统。由图1可知,与传统直流接入方式不同,直流分层接入方式下,换流站低端逆变后接入1000 kV交流电网,换流站高端逆变后接入500 kV交流电网。不同换流母线间存在一定的电气联系,某一换流母线的电压变化将会引起另一换流母线的电压波动,对此需要研究直流分层接入方式下层间交互影响。

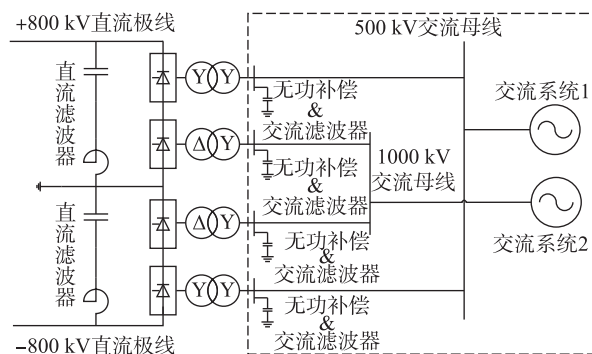


图1 直流分层接入系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of UHVDC hierarchical connection mode

根据 CIGRE 高压直流工作组对系统直流回路间作用的强弱的定义<sup>[16]</sup>:当直流回路  $i$  的换流母线电压下降 1% 时,直流回路  $j$  的换流母线电压下降率。相应的直流分层接入方式下 HIF 可表示为:

$$R_{\text{HIF}j-1} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (1)$$

相应的  $R_{\text{HIF}}$  在 0~1 变化,当  $R_{\text{HIF}}$  的值越接近 1,层间两换流母线间的电气联系越强;反之,当  $R_{\text{HIF}}$  的值越接近于 0,则表示层间两换流母线间的电气距离越大,两者间的交互影响越小。

从换流母线观测受端交流系统,利用多端戴维南等值理论可得到相应的受端系统等值网络示意图,如图 2 所示。其中  $Z_{\text{eq}11}$  为 1000 kV 换流母线下系统等值阻抗, $Z_{\text{eq}22}$  为 500 kV 换流母线下系统等值阻抗, $Z_{\text{eq}12}$  为换流母线间的联系阻抗。

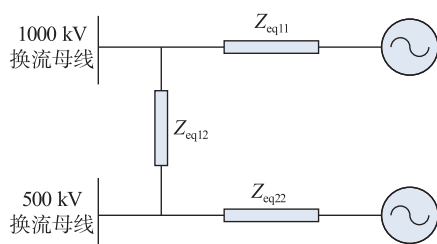


图 2 受端系统等值示意图

Fig.2 Schematic diagram of receiving equivalent system

针对受端等值系统,其采用  $P$ - $Q$  解耦法求解潮流时的无功-电压修正迭代方程为:

$$\Delta Q/V = -B''\Delta V \quad (2)$$

将式(2)左乘  $-B''^{-1}$  得:

$$\Delta V = -B''^{-1}\Delta Q/V = -Z''\Delta Q/V \quad (3)$$

由式(3)可知,若换流母线  $i$  存在无功扰动  $\Delta Q_i$ ,而其他母线无扰动,引起的其他直流母线电压变化可表示为:

$$\Delta V = [Z_{1i}\Delta Q_i/V_i \cdots Z_{ii}\Delta Q_i/V_i \cdots Z_{ni}\Delta Q_i/V_i]^T \quad (4)$$

根据式(1)和式(4)可得:

$$R_{\text{HIF}j-2} = \frac{Z_{ji}}{Z_{ii}} \quad (5)$$

式中: $Z_{ji}$  为受端等值系统阻抗矩阵中  $j$  行  $i$  列的元素; $Z_{ii}$  为受端等值系统阻抗矩阵中  $i$  行  $i$  列的元素。

由式(1)和式(5)得到的  $R_{\text{HIF}}$  不能很好地反应直流分层接入方式下层间的动态特性,参考文献[8]提出了评估直流换流母线间交互影响强度的结构性指标——暂态电压支撑强度指标,直流分层接入方式下的  $R_{\text{HIF}}$  为:

$$R_{\text{HIF}j-3} = \frac{1}{1 + Z_{\text{eq}ij}/Z_{\text{eq}ii}} \quad (6)$$

式中: $Z_{\text{eq}ij}$  为第  $i$  层与第  $j$  层间的联系阻抗; $Z_{\text{eq}ii}$  为第  $i$  层系统等值阻抗。

## 2 锡盟—泰州直流分层接入系统说明

根据规划,±800 kV 锡盟—泰州直流落入江苏苏北地区后,输电工程接入系统方案为:换流站低端逆变后直接接入泰州特高压站 1000 kV 母线,换流站高端接入交流 500 kV 母线。其中换流站 500 kV 母线出线 6 回,将 500 kV 旗杰—凤城双线开断环入换流站,同时建设 500 kV 换流站—双草变双回线路。如图 3 所示。下面将基于锡盟—泰州特高压直流分层接入系统,分析直流分层接入方式下不同 HIF 理论计算值之间的差别,研究直流分层接入方式对 HIF 带来的影响。进一步分析不同接入方式下短路比以及暂态过电压之间的差别。

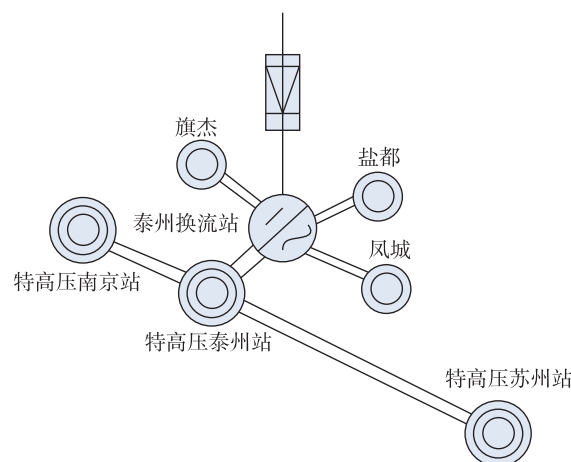


图 3 ±800 kV 锡盟—泰州直流分层接入系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the hierarchical connection to AC system for ±800 kV Ximeng-Taizhou UHVDC

## 3 不同计算方式下 HIF 对比分析

在 1000 kV 换流母线和 500 kV 换流母线上分别改变其无功负载的大小,得到无功负载变化前后换流母线电压变化量,根据式(1)得到相应的 HIF 计算结果,如表 1 所示。

表 1  $R_{\text{HIF}j-1}$  计算结果

换流母线	1000 kV 换流母线 存在扰动	500 kV 换流母线 存在扰动
1000 kV 换流母线	1.000	0.184
500 kV 换流母线	0.526	1.000

由表 1 可以看出,直流分层接入方式下层间均存在一定的交互影响,且 1000 kV 换流母线给 500 kV 换流母线带来的影响 ( $R_{\text{HIF}j-1} = 0.526$ ) 大于 500 kV 换流母线给 1000 kV 换流母线带来的影响

( $R_{\text{HIF}j_{-1}} = 0.184$ )。进一步对如图 2 所示的受端等值系统进行分析,等值系统中各阻抗等值结果为: $Z_{\text{eq}11} = 0.000\ 046\ 5 + j0.002\ 181$ ;  $Z_{\text{eq}22} = 0.000\ 238\ 1 + j0.004\ 954$ ;  $Z_{\text{eq}12} = 0.000\ 3 + j0.008\ 5$ 。

相应的阻抗矩阵  $Z$  为:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{Z_{\text{eq}11}(Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22})}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}} & \frac{Z_{\text{eq}11}Z_{\text{eq}22}}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}} \\ \frac{Z_{\text{eq}11}Z_{\text{eq}22}}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}} & \frac{Z_{\text{eq}22}(Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12})}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000\ 045 + j0.001\ 88 & 0.000\ 022 + j0.000\ 69 \\ 0.000\ 022 + j0.000\ 69 & 0.000\ 146 + j0.003\ 39 \end{bmatrix}$$

据此可以得到相应的  $R_{\text{HIF}j_{-2}}$ ,  $R_{\text{HIF}j_{-3}}$ , 如表 2 和表 3 所示。

表 2  $R_{\text{HIF}j_{-2}}$  计算结果

Table 2 Calculated results of  $R_{\text{HIF}j_{-2}}$

换流母线	1000 kV 换流母线 存在扰动	500 kV 换流母线 存在扰动
1000 kV 换流母线	1.000	0.204
500 kV 换流母线	0.368	1.000

表 3  $R_{\text{HIF}j_{-3}}$  计算结果

Table 3 Calculated results of  $R_{\text{HIF}j_{-3}}$

换流母线	1000 kV 换流母线 存在扰动	500 kV 换流母线 存在扰动
1000 kV 换流母线	1.000	0.204
500 kV 换流母线	0.368	1.000

从表 2 和表 3 的计算结果同样可以看出,1000 kV 换流母线对 500 kV 换流母线的影 响 ( $R_{\text{HIF}j_{-2}} = 0.368$ ) 大于 500 kV 换流母线对 1000 kV 换流母线的影 响 ( $R_{\text{HIF}j_{-2}} = 0.204$ )。

另外表 2 和表 3 中通过两类方法得到的 HIF 计算结果相等。这主要是因为对于 2 层系统,式(5)可表示为:

$$R_{\text{HIF}21,2} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} = \frac{\frac{Z_{\text{eq}11}Z_{\text{eq}22}}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}}}{\frac{Z_{\text{eq}11}(Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22})}{Z_{\text{eq}11} + Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}}}} = \frac{Z_{\text{eq}22}}{Z_{\text{eq}12} + Z_{\text{eq}22}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{\text{eq}12}}{Z_{\text{eq}22}}} = R_{\text{HIF}21,3} \quad (7)$$

同理可得  $R_{\text{HIF}12,2} = R_{\text{HIF}21,3}$ 。可见,对于直流分层接入方式下 2 层系统的  $R_{\text{HIF}j_{-2}}$  和  $R_{\text{HIF}j_{-3}}$  计算结果一致。

需要说明的是, $R_{\text{HIF}j_{-3}}$  是考虑暂态扰动下,换流母线与短路节点、发电厂之间的电气距离而提出的结构性指标,虽然对于 2 层接入系统  $R_{\text{HIF}j_{-2}}$  和

$R_{\text{HIF}j_{-3}}$  计算结果相同,然而两者本质上仍然有所区别。因此对于直流分层接入方式下 ESCR 的计算,  $R_{\text{HIF}j_{-3}}$  并不适用。

综合表 1—3 可以看出,三类 HIF 计算结果之间存在差异,其中的原因在于,表 2 和表 3 中所采用的方法是建立在受端交流系统等值的基础上,未考虑直流系统之间的影响,而表 1 所采用的方法建立在电压扰动的基础上,考虑了直流系统之间的交互影响。下面将进一步分析忽略直流系统带来 HIF 计算结果差异的原因。

式(2)中的无功-电压迭代修正方程是建立在受端等值系统的基础上,未考虑直流系统的功率特性。在考虑直流系统的功率特性后,换流母线  $i$  的无功电压关系为:

$$\Delta Q_i = Q_{is} + Q_{in} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

式中: $Q_{is}$  为受端等值系统节点  $i$  注入系统的无功功率; $U_i$  为受端等值系统节点  $i$  的电压; $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  分别为受端等值系统节点导纳矩阵第  $i$  行、第  $j$  列元素的实部和虚部的值; $\theta_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  的相角差; $Q_{in}$  为直流系统注入换流母线的无功功率。 $Q_{in}$  可以表示为关于换流母线电压  $U_i$ 、直流线路电流  $I_{DC}$  以及逆变侧熄弧角  $\gamma$  的函数,即:

$$Q_{in} = f(U_i, I_{DC}, \gamma) \quad (9)$$

考虑直流系统的无功功率特性后,可将式(2)表示为:

$$\Delta Q/V = [-B'' + \text{diag}(\frac{1}{V} \frac{\partial Q_n}{\partial V})] \Delta V \quad (10)$$

式中: $Q_n$  为各直流系统注入各换流母线的无功功率向量; $\text{diag}(X)$  表示以向量  $X$  为对角线元素的对角矩阵。

对式(10)进行求逆运算可得:

$$\Delta V = [-B'' + \text{diag}(\frac{1}{V} \frac{\partial Q_n}{\partial V})]^{-1} (\Delta Q/V) \quad (11)$$

根据式(11)可以得到换流母线无功变化而带来的母线电压变化量,结合式(1)可得到相应的 HIF 计算值。由式(11)可知,由于直流系统的无功功率是与换流母线电压有关的量,电压变化量中增加了有关直流系统无功功率的微分项。而式(3)中电压变化量的计算是建立在受端等值交流系统的基础之上,忽略了直流系统的无功功率特性,从而导致了 2 种计算方法之间的差异。

综上,根据理论计算结果与分析结论,式(1)关于 HIF 的计算方法更为可靠,接下来的分析中将主要采用式(1)的计算方法进行分析。

## 4 分层接入方式对系统影响分析

### 4.1 分层接入方式对 HIF 的影响

为了分析分层接入方式对 HIF 带来的影响,对比分析 3 种情况下 HIF 的变化特点。

情况一:换流站低端逆变后接入特高压站 500 kV 母线,换流站高端逆变后仍接入 500 kV 母线。

情况二:换流站低端逆变后仍接入特高压站 1000 kV 母线,换流站高端逆变后同样接入特高压站 1000 kV 母线。

情况三:换流站高端逆变接入 500 kV 母线,低端逆变接入特高压站 1000 kV 母线,即直流分层接入方式进行对比分析。

需要说明的是,换流站逆变后均接入 500 kV 换流母线或 1000 kV 母线即不存在分层接入方式,本文为了分析分层接入方式将对 HIF 带来的影响,仍保留高端逆变换流母线和低端逆变换流母线。通过在换流母线上改变无功负载得到相应的电压变化量,从而得到相应的 HIF 计算值,如表 4、表 5 和表 6 所示。

表 4 情况一下  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  计算结果

Table 4 Calculated results of  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  in case 1

换流母线	500 kV 换流母线一 存在扰动	500 kV 换流母线二 存在扰动
500 kV 换流母线一	1.000	0.351
500 kV 换流母线二	0.591	1.000

表 5 情况二下  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  计算结果

Table 5 Calculated results of  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  in case 2

换流母线	1000 kV 换流母线一 存在扰动	1000 kV 换流母线二 存在扰动
1000 kV 换流母线一	1.000	0.657
1000 kV 换流母线二	0.657	1.000

表 6 情况三下  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  计算结果

Table 6 Calculated results of  $R_{\text{HIF}_{j-1}}$  in case 3

换流母线	1000 kV 换流母线 存在扰动	500 kV 换流母线 存在扰动
1000 kV 换流母线	1.000	0.184
500 kV 换流母线	0.526	1.000

由表 4—6 可以看出,情况一和二中换流站接入 500 kV/1000 kV 换流母线后,两换流母线之间的交互影响因子均大于分层接入方式下的层间交互影响因子。进一步通过对受端系统进行等值分析两

换流母线间的电气联系,不同情况下各阻抗的等值结果如表 7 所示。

表 7 不同情况下等值阻抗计算结果

Table 7 Calculated results of equivalent impedance with different cases

等值阻抗	情况一	情况二	情况三
$Z_{\text{eq11}}$	0.000 089+ j0.002 67	0.000 08+ j0.004 37	0.000 046 5+ j0.002 181
$Z_{\text{eq22}}$	0.000 237+ j0.005 90	0.000 08+ j0.004 37	0.000 238 1+ j0.004 954
$Z_{\text{eq12}}$	0.000 3+ j0.005 3	0.000 02+ j0.002 94	0.000 3+ j0.008 5

由表 7 可知,情况三中层间联系阻抗  $Z_{\text{eq12}}$  最大,即中层间电气联系最弱。3 种情况下等值系统联系阻抗的变化规律与表 4—6 中 HIF 计算结果反映出的变化规律一致,即换流母线间联系阻抗越小,则交互影响越大。

结合 HIF 与等值系统联系阻抗的计算结果可知,分层接入方式下的联系阻抗较大,层间电气联系相对较弱,从而层间交互影响也较小。

### 4.2 分层接入方式对系统短路比的影响

短路比作为表征交流系统强弱的主要指标之一,可用于评估换流站交流母线电压稳定性。分层接入方式下层间有效短路比(hierarchical effective short circuit ratio, HESCR)可表示为:

$$R_{\text{HESCR}_i} = \frac{S_{\text{aci}} - Q_{\text{ci}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n R_{\text{HIF}_{ji}} P_{\text{dj}}} \quad (12)$$

式中: $S_{\text{aci}}$ 为第  $i$  层直流回路换流母线的三相短路容量; $P_{\text{di}}$ 为第  $i$  层额定直流功率; $Q_{\text{ci}}$ 为第  $i$  层换流母线额定无功补偿容量。

为分析分层接入方式对系统短路比的影响,对比 4.1 节中 3 种情况下系统有效短路比。计算结果如表 8 所示。

表 8 不同接入方式下有效短路比  $R_{\text{ESCR}}$  结果对比

Table 8  $R_{\text{ESCR}}$  of different connection modes

不同接入情况	换流母线	$R_{\text{ESCR}}$
情况一	500 kV 换流母线	5.85
情况二	1000 kV 换流母线	8.32
情况三	1000 kV 换流母线	9.67
	500 kV 换流母线	7.71

由表 8 可知,2 种接入方式下,系统均为强系统( $R_{\text{ESCR}} > 3$ )。对比三类情况可知,同一电压等级下,分层接入方式下各层有效短路比相比传统接入方式均得到了改善。采用分层接入方式交流系统对直流系统的电压支撑能力变强。并且分层接入方式下,1000 kV 换流母线的  $R_{\text{HESCR}}$  大于 500 kV 换流母线的  $R_{\text{HESCR}}$ ,即分层接入方式下,1000 kV 交流受

端系统对直流系统的电压支撑作用强于 500 kV 交流受端系统。

### 4.3 分层接入方式对暂态过电压的影响

额定工况下,换流站无功补偿容量为直流额定输送功率的 40%~60%,直流系统闭锁停运后,由于换流站无功补偿装置产生过量的无功将导致暂态过电压。考虑分层接入方式下,换流母线无功补偿装置提供的无功功率与换流站传输的有功功率比例为  $\eta$ ,即  $Q_{di}=\eta P_{di}$ 。相应的 TOV 可表示为<sup>[17]</sup>:

$$R_{TOVi} = \sqrt{\left(\frac{\eta}{\sqrt{1+\eta^2}} + \frac{\sqrt{1+\eta^2}}{R_{HESCRi}}\right)^2 + \frac{1}{1+\eta^2}} \quad (13)$$

由式(13)可知,在  $\eta$  一定的情况下,若  $R_{HESCRi}$  越小,即交流系统越弱,则  $R_{TOVi}$  将越大,因此对连接弱交流系统的直流工程,需采取一定的措施防止过电压带来的危害。反之,则  $R_{TOVi}$  将越小。

基于 4.2 节中得到的  $R_{ESCR}$ ,考虑换流母线无功补偿装置提供的无功功率与换流站传输的有功功率比例  $\eta$  在 40%~60% 变化,进一步分析分层接入方式下暂态过电压,并与传统接入方式进行对比,结果如图 4 所示。

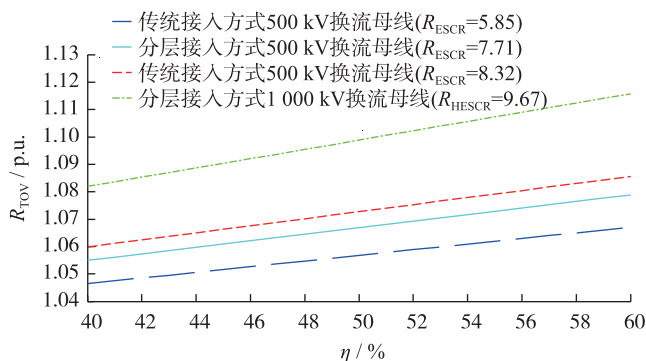


图 4 不同接入方式下 TOV 结果对比

Fig.4 TOV of different connection modes

由图 4 可知,不同接入方式下, $\eta$  变大都会导致  $R_{TOVi}$  的增大。就同一电压等级而言,采用分层接入方式后,各层 TOV 均小于传统接入方式的 TOV。即直流分层接入方式后,直流系统故障导致的暂态过电压问题将小于传统接入方式。对比 3 种情况,分层接入方式下 1000 kV 换流母线的 TOV 最小,即直流系统故障导致的暂态过电压问题对 1000 kV 换流母线带来的危害最小。

## 5 结语

针对锡盟—泰州直流分层接入系统研究了直流分层接入方式对层间交互影响、有效短路比以及暂态过电压的影响,得到的结论如下:

(1) 三类 HIF 计算值之间存在差异,差异的产

生主要是在计算 HIF 过程中是否考虑直流无功功率特性对 HIF 的影响。

(2) 采用分层接入方式层间交互影响小于采用传统接入方式的交互影响。

(3) 相比传统接入方式,采用分层接入方式后各层有效短路比均得到改善,即交流系统对直流系统的电压支撑能力更强;而采用分层接入方式后,同一电压等级下,暂态过电压则将比传统接入方式小。

(4) 综合层间交互影响、有效短路比以及暂态过电压指标研究可知,与传统接入方式相比,分层接入方式更优。

本文的研究仍是侧重于直流分层接入系统的静态特性分析,直流输电系统的控制方式及其动态过程也会对层间交互影响带来影响,分层接入方式同样也会对直流系统的响应特性带来影响,这些都是后续需要开展的工作。

### 参考文献:

- [1] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.  
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [2] 徐箭,张华坤,孙涛,等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):444-448.  
XU Jian, ZHANG Huakun, SUN Tao, et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015, 35(6): 444-448.
- [3] 汤奕,陈斌,王琦,等. 特高压直流分层接入下混联系统无功电压耦合特性分析[J]. 电网技术,2016,40(4):1005-1011.  
TANG Yi, CHEN Bin, WANG Qi, et al. Analysis on reactive power and voltage coupling characteristics of hybrid system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1005-1011.
- [4] 汤奕,陈斌,皮景创,等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1790-1800.  
TANG Yi, CHEN Bin, PI Jingchuang, et al. Analysis on absorbing ability of receiving AC system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(7): 1790-1800.
- [5] 张啸虎,白加林,陈陈,等. 长三角地区多馈入直流输电系统交互影响特性分析[J]. 华东电力,2009,37(7):58-63,92.  
ZHANG Xiaohu, BAI Jialin, CHEN Chen, et al. Interaction characteristics of multi-infeed HVDC systems in Yangtze River

- Delta region[J]. East China Electric Power, 2009, 37(7): 58-63, 92.
- [6] DENIS L H A, ANDERSSON G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [7] AIK D L H, ANDERSSON G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 203-211.
- [8] 汤涌, 贺仁睦, 鞠平, 等. 电力受端系统的动态特性及安全性评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 86-105.  
TANG Yong, HE Renmu, JU Ping, et al. Dynamic characteristics and security evaluation of power receiving end system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 85-105.
- [9] 郭小江. 多直流馈入系统特性及其评估方法研究[D]: 天津: 天津大学, 2013.  
GUO Xiaojiang. Research on characteristics and evaluation methods of multi-infeed DC system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [10] 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.  
JIN Xiaoming, ZHOU Baorong, GUAN Lin, et al. HVDC-interaction-strength index for multi-infeed-HVDC power system[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(15): 98-102.
- [11] 陈修宇, 韩民晓, 刘崇茹, 等. 含整流站接入的多馈入直流系统强度评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 101-107.  
CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru, et al. System strength evaluation of multi-infeed HVDC system integrated with rectifier stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 101-107.
- [12] 陈修宇, 韩民晓, 刘崇茹. 直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 58-63.  
CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 58-63.
- [13] 朱鑫要, 汪惟源, 汪成根. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 39-42.  
ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [14] 陈倩, 汤奕. 江苏特高压建设时期短路电流限制措施[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5): 21-24.  
CHEN Qian, TANG Yi. A new method of fault location for hybrid transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(5): 21-24.
- [15] 董宸, 周霞, 李威, 等. 提升特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 1-4.  
DONG Chen, ZHOU Xia, LI Wei, et al. A method for enhancing the transmission capacity of UHV power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(05): 1-4.
- [16] CIGRE WG B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. CIGRE, 2008.
- [17] DE TOLEDO P F, BERGDAHL B, ASPLUND G. Multiple infeed short circuit ratio-aspects related to multiple HVDC into one AC network[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, Dalian, 2005: 1-6.

## 作者简介:



管永高

管永高(1990—),男,江苏如皋人,工程师,从事电力规划与设计工作;

张诗滔(1979—),男,江苏苏州人,高级工程师,从事电力规划与设计工作;

许文超(1979—),女,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统规划、新能源并网工作。

## Study on Hierarchical Interaction of UHVDC Hierarchical Connection Mode

GUAN Yonggao, ZHANG Shitao, XU Wenchao

(China Energy Engineering Group, Jiangsu Power Design Institute Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** To study the impact of ultra high-voltage direct current (UHVDC) hierarchical connection mode on power system, the calculation methods of hierarchical interaction factor (HIF) are proposed and the causes of the deviation between different methods are analyzed. The impacts of UHVDC hierarchical connection mode on HIF, effective short circuit ratio (ESCR) and transient over-voltage (TOV) are investigated compared with the traditional connection mode. The results indicate that the HIF is smaller, the ESCR is larger and the TOV is smaller under the hierarchical connection mode. The hierarchical connection mode is more superior with the traditional one.

**Key words:** hierarchical connection mode; hierarchical interaction factor (HIF); effective short circuit ratio (ESCR); transient over-voltage (TOV)

(编辑 刘晓燕)