

特高压直流分层接入方式的落点选择研究

李传栋¹, 杨桂钟², 陈晶腾¹, 陈惠聪³

(1. 国网福建省电力有限公司 电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 国网福建电力调度控制中心, 福建 福州 350003; 3. 福建中天电力咨询有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 基于 CIGRE 直流工作组的多馈入直流短路比(MISCR)的定义,引入直流权重因子,建立了分层接入方式下直流落点的稳定性指标,并结合经济性指标,构造线性权重的目标函数进行落点优化。算例分析表明本研究方法切实可行,便于工程应用。

关键词: 特高压直流; 分层接入方式; 多馈入直流短路比; 直流权重因子

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2014)06-0567-06

Study on DC links termination selection of UHVDC hierarchical connection mode

Li Chuandong¹, Yang Guizhong², Chen Jingteng¹, Chen Huicong³

(1. State Grid Electrical Power Research Institute, Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;

2. Distribution Control Centre, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;

3. Fujian Zhong Tian Electric Consultant Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: There are limited studies on the selection of DC links termination in ultra high voltage DC (UHVDC) hierarchical connection mode due to the speciality of the mode. Based on the definition of multi-infeed short circuit ratio, the index to screen terminal location schemes under the hierarchical connection mode was established combined with the DC weight factors. The objective function of the DC links selection based on the linear weighted summation method was formulated to select the optimal scheme as the commutation bus. Numerical tests show that the method is effective, feasible and convenient for engineering applications.

Keywords: ultra high-voltage direct current (UHVDC); hierarchical connection mode; multi-infeed short circuit ratio; DC weight coefficient

随着国内沿海发达城市日益增长的负荷需求,将有更多的直流输电工程投入运行,^①合理的落点方案及其接入方式的选择就显得越来越重要。

目前我国特高压直流接入方式均为直接接入受端系统的 500 kV 交流网架^[1],将导致功率分配转移困难,对系统安全稳定造成较大的负面影响。考虑到华中、华东等负荷密集地区,未来将建成 1 000 kV 等级的交流同步电网,因此有专家提

出将特高压直流接入受端系统 1 000 kV 的特高压交流网架^[2],然而特高压交流网架尚处于初期建设阶段,短路容量相对较小,特高压交直流间建设进度的配合问题将制约该方案的实施。为此,文献^[3]提出分别接入受端系统 500 kV 和 1 000 kV 交流网架的方案(分层接入方式)来综合解决上述问题。但由于特高压直流分层接入方式存在的特殊性,导致传统落点选择方法无法合理地选择落点方案^[4]。

① 参见国家电网公司《国家电网发展规划(2013—2020 年)》,2013。

收稿日期: 2014-09-10

第一作者简介: 李传栋(1979-),男(汉),福建安溪人,高级工程师,博士,研究方向:电力系统仿真计算。

为解决特高压直流分层接入方式中落点选择缺少合理的研究方法与手段的问题,本文基于 CIGRE 直流工作组的多馈入直流短路比 (multi-infeed short circuit ratio, MISCRC) 概念,^①引入直流权重因子^[5],建立了分层接入方式下直流落点的稳定性指标,并结合网络损耗,构建直流落点选择的目标函数,为特高压直流分层接入方式下落点方案的筛选提供有效的技术手段。

1 特高压直流接入电网方式

1.1 特高压直流单层接入方式

逆变侧接入受端系统的 1 000 kV 或 500 kV 网架,其中交流滤波器和无功补偿装置经小组开关直接接入 1 000 kV 或 500 kV 交流母线。接入方式见图 1。

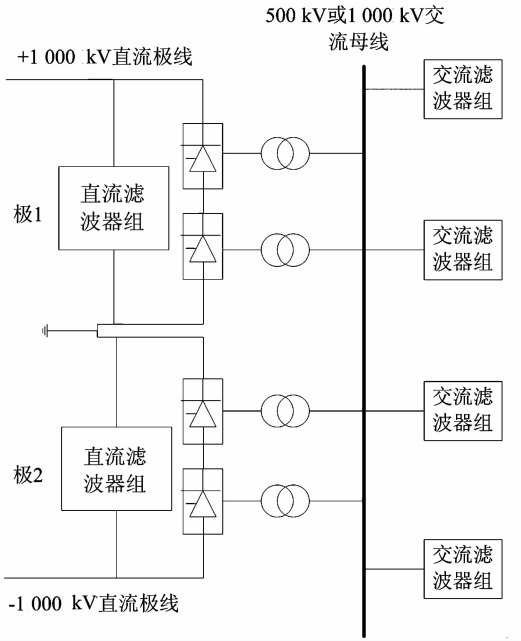


图 1 特高压直流单层接入方式

Fig. 1 UHVDC single-layer connection to AC

1.2 特高压直流分层接入 1 000/500 kV 方式

特高压直流高端换流变、低端换流变分别接入 500 kV 和 1 000 kV 网架,交流滤波器和无功补偿装置也分别接入 500 kV 和 1 000 kV 交流母线。接入方式见图 2。

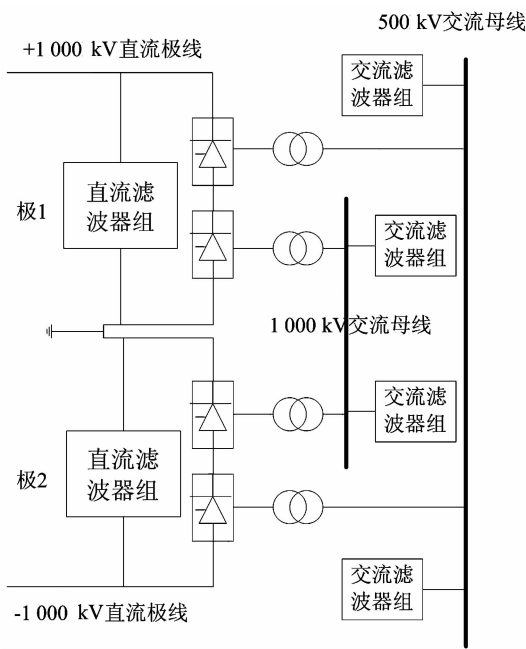


图 2 特高压直流分层接入方式

Fig. 2 UHVDC hierarchical connection to AC

2 特高压直流分层接入方式下短路比研究

2.1 CIGRE 多馈入短路比

为解决多馈入直流系统间各逆变站电气距离接近,耦合特性明显,采用短路比概念评估交直流系统会产生较大偏差的问题,2007 年 CIGRE 成立工作组并提出了多馈入直流系统短路比的定义。

$$M_i = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n MIF_{ji} P_{dj}} = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} P_{dj}} = \frac{U_{iN}^2}{|Z_{eqi}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqj}| P_{dj}} \quad (1)$$

式中: S_{aci} 为第 i 回直流换流母线侧的短路容量; M_i 为第 i 回直流所对应的多馈入短路比,为行文方便,后文所列表式均用字母“ M ”表示 MISCRC 的含义; MIF_{ji} 为第 j 回直流系统与第 i 回直流系统之间的交互影响因子; ΔU_i 为在第 i 回换流母线上投切小容量电容器引起的该母线电压的变化

① 参见 CIGRE Working Group. B4. 41. Systems with multiple DC infeed. CIGRE, 2008。

量; P_{di} 和 P_{dj} 分别为第*i*回和第*j*回直流系统输电功率; U_{iN} 为第*i*回换流母线上的额定电压; Z_{eqii} 为等值阻抗矩阵中第*i*回换流母线对应的自阻抗; Z_{eqij} 为等值阻抗矩阵中第*i*回换流母线和第*j*回换流母线之间的互阻抗。

文献[6]证明了上述多馈入短路比与多直流集中馈入受端的电压稳定性具有一致性关系,即多馈入短路比越高,电压稳定性越好。因此多馈入短路比可以作为直流落点选择安全性衡量指标的一个因子。

2.2 多馈入相互作用因子 MIIF

在多直流输电系统中直流间是存在相互作用的,且不可忽略。CIGRE WG B4 工作组提出了用于评估多直流系统中各换流站之间交互作用的指标——多馈入相互作用因子 MIIF^[7],定义为

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \quad (2)$$

式中: ΔU_i 是某直流系统运行在额定状态时,在其换流站母线上投切小容量电容器,使其换流母线电压阶跃变化的变化量(以百分数表示),通常为1%; ΔU_j 是由 ΔU_i 改变所引起的某一回直流输电换流站换流母线电压变化量响应值(以百分数表示)。

2.3 特高压直流分层接入方式下的短路比

特高压直流采用分层接入方式时,相当于2个容量各半的直流子系统,经过换流母线分别接入1000 kV和500 kV网架。设1000 kV和500 kV母线分别为1和2, z_1 和 z_2 分别为1000 kV母线与500 kV母线后的层面等值阻抗, z_{12} 为两母线间的层间等值联系阻抗,等值系统如图3所示。通过对图3等值系统中交流网络的节点导纳阵求逆,得到节点阻抗阵,即可得如下式子:

$$\begin{cases} Z_{eq11} = \frac{z_1 z_{12} + z_1 z_2}{z_{12} + z_1 + z_2} \\ Z_{eq22} = \frac{z_2 z_{12} + z_1 z_2}{z_{12} + z_1 + z_2} \\ Z_{eq12} = Z_{eq21} = \frac{z_1 z_2}{z_{12} + z_1 + z_2} \end{cases} \quad (3)$$

据此,假设有一回特高压直流以分层接入方式馈入交流系统,传送有功功率为 P_d ,因此可得到 $P_{d1} = P_{d2} = P_d/2$ 。单馈入直流分层接入1000/500 kV方案,从图3可知该方式可看作两个直流系统,需考虑两者间的耦合特性,为此,根据式

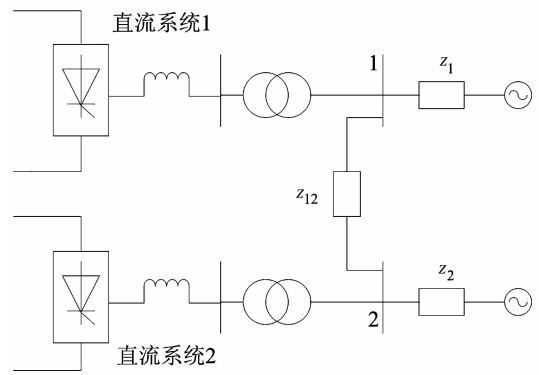


图3 分层接入方式的直流等值系统

Fig.3 HVDC equivalent system of hierarchical connection to AC

(1)可求得分层接入1000 kV/500 kV母线方案1的多馈入短路比为 M_{11} 和 M_{12} 。

综上可知,分层接入方式的短路比具有特殊性,不能直接进行优劣比对。目前国内缺少对分层接入方式下直流落点选择合理的研究方法与手段,因此,寻求合理的落点选择方法具有重要意义。

3 分层接入方式下直流落点的筛选指标

3.1 直流权重因子

为解决分层接入方式的短路比存在特殊性的问题,通过权重系数对 M_{11} 和 M_{12} 进行线性加权求和以达到化多为一的效果,其中权重系数的合理求解是关键。

合理的直流权重系数的取值需要满足以下几点要求:(1)权重系数应根据电网拓扑结构及网络参数求解,不依赖于人为赋值与调整;(2)直流权重系数应与直流落点有关,直流落点的变化将导致直流间的电气距离发生变化,因此可以采用直流间的电气距离来表达权重系数,其表达式如下:

$$\begin{cases} w_{li} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}}{|Z_{eqii}| P_{di}} \\ \hat{w}_{li} = \frac{w_{li}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, w_{li} 为分层接入方式中落点方案*l*中的第*i*回直流的权重,其余因子与式(1)相同。

将式(4)代入式(1)可得如下式子:

$$M_{li} = \frac{S_{aci}}{P_{di} \left(1 + \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqj}| P_{dj}}{|Z_{eqi}| P_{di}} \right)} = \frac{S_{aci}}{P_{di}(1 + w_{li})} \quad (5)$$

式中,由于是特高压直流分层接入方式,因此有 $P_{di} = P_{dj}$ 。

3.2 分层接入方式下直流落点的稳定性指标

分层接入方式下直流落点方案的优选取决于该方案短路比 M_{li} 和 M_{L2} 的大小,但该方式下短路比不具备直接优劣比对的条件。因此,一般是通过对该方案的短路比进行求和并取均值,作为反映该方案整体特性的指标,如下式:

$$C_{sum}(l) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 M_{lj} \quad (6)$$

式中 $l = 1, 2, \dots, p$, 对应第 l 个落点方案。在各方案中, $C_{sum}(l)$ 值越大,说明该方案越具有优越性,即稳定性就越好。

但采用平均值描述落点方案的整体性,忽略了直流间相互影响的特性。在直流容量确定的前提下,分层接入方式的短路比由 2 个因素决定,即短路容量和其它直流对本直流的影响,如果因为短路容量较小,同时直流间的相互影响小,而造成的该方式下短路比较小,则采用求和取均值的 $C_{sum}(l)$ 越小不一定代表系统稳定性较差,因此 $C_{sum}(l)$ 需要引入能够代表直流“影响力”的因子,即各直流的权重系数,整理后 $C_{sum}(l)$ 改写为

$$C_{sum}(l) = \sum_{j=1}^2 \hat{w}_{ij} M_{ij} \quad (7)$$

其中 \hat{w}_{ij} 为第 l 个直流落点方案中第 j 回直流的权重系数。

结合图 3,再根据式(1)、(4)可知 MIIF 对其短路比有较大的影响,可得以下结论:当落点方案 l 中 M_{li} 越低,并不一定代表它本身短路比越小,而是由于受到直流间耦合关系的影响导致的,此时从权重的根本意义出发,其权重应越大,保证指标的真实性,且从式(5)可知本文所采用的直流权重因子与短路比成反比,满足上述的要求,该权重系数具备合理性。

3.3 分层接入方式下直流落点选择的目标函数

直流馈入落点的选择是一个非常复杂的系统

决策问题,涉及方面较多,因此,本文将多目标 (C_{sum} 最大、网络损耗 P_{loss} 最小) 线性加权并求和来建立直流落点选择的目标函数。假设其权重系统分别为 w_1, w_2 , 则目标函数 $F(x)$ 可表示为:

$$\max F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \quad (8)$$

式中 $f_1(x), f_2(x)$ 分别为 C_{sum} 与网络损耗 P_{loss} 归一化后的值。本文认为目标函数最大的点是直流换流站最优落点。

3.3.1 指标的归一化处理

由于 C_{sum} 与网络有功损耗 P_{loss} 的量纲不同,在建立兼顾安全性与经济性的指标前,需对两者进行标准化处理。

对 C_{sum} , 由于其值越大越合理,故有:

$$\alpha'(l) = \frac{\alpha(l) - \min \alpha}{\max \alpha - \min \alpha} \quad (9)$$

式中: α, α' 分别表示 C_{sum} 与归一化后的 C_{sum} ; l 表示第 l 个直流落点方案。

对网损 P_{loss} , 由于其值越小越合理,故有:

$$\beta'(l) = \frac{\max \beta - \beta(l)}{\max \beta - \min \beta} \quad (10)$$

式中: β, β' 分别表示网损 P_{loss} 与归一化后的网损 P_{loss} ; l 表示第 l 个直流落点方案。

通过式(9)、(10)的标准化处理,两指标均同向单调,即经过标准化后的指标数值越大,方案则越好。

3.3.2 确定权重的方法

层次分析法(AHP)是确定权值的一种方法,将所有的评价指标 x_1, x_2, \dots, x_n 分别按行和列排列,构成一方阵;再根据标度的表格,其指标间相对重要的程度用 1 至 9 的数及其倒数进行描述,构成一判断矩阵 A ,文中 C_{sum} 与 P_{loss} 所组成的 A 如式(11)所示;最后对其求特征值,并选取最大特征值进行一致性的校验,若满足条件,该最大特征值所对应的特征向量经过归一化处理后即是所需权重向量。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

4 分层接入方式下直流落点选择方法

在对大电网进行规划设计时,直流落点是不能随意选择的,可以结合工程实际,根据规划目的

事先确定直流落点的范围或提前通过某些技术手段确定若干落点,例如通过比对短路比的大小(筛选不满足短路比 $SCR > 2$ 的母线),确定 m 个 $1\,000\text{ kV}$ 母线和 n 个 500 kV 母线,并进行排列组合,形成直流落点备选的方案集合 P (注意:在上述排列组合过程中,暂不考虑各母线间的地理环境)。

选用相关计算软件(例如,中国电力科学研究院的PSD-BPA计算程序),根据式(2)计算各方案所对应的MIIF,并对 $MIIF < 0.15$ 的方案进行筛选,最后根据式(1)、(4)和(7-11),计算筛选后的集合 P 所含方案中各直流在分层接入方式下对应的稳定性指标 C_{sum} 、经济性指标 P_{loss} 以及两指标的归一化值和权重系数 W ,然后通过线性加权和法建立落点选择的目标函数,最后从目标函数值的角度对各直流落点方案进行评估,获取最优方案,即选择目标函数值 $F(x)$ 最大时所对应的落点方案作为最优方案。

5 算例应用

以某省级电网为例,该电网预规划在2020年通过 $\pm 1\,100\text{ kV}$ 特高压直流输电系统与区外形成异步联网,接受约 $10\,000\text{ MW}$ 的有功功率,因此,该电网需对送入的直流功率进行分配,送至各个用电区域,合理分摊各用电区域的直流受入功率比例,可有效提高其供电可靠性。当特高压直流逆变站直接接入 500 kV 交流网架,将造成功率分配转移的困难;而特高压交流电网处于初期建设阶段时,短路容量相对较小,对系统安全稳定性将造成较大的负面影响。因此,可结合 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流建设进度与特高压交流电网建设进度的配合情况,以及特高压交直流在安全稳定性方面的相互影响,考虑特高压交流系统强输电能力和完善的超高压交流输电网络,分层馈入特高压直流,以实现大功率分层合理分配,有效提高系统安全可靠稳定运行水平。

本文结合该省级电网的工程实际情况,选用分层接入方式作为预规划的 $\pm 1\,100\text{ kV}$ 特高压直流馈入受端系统的接入方式,并利用第4节所提的分层接入方式下的直流落点选择方法对落点方案进行优选。

5.1 落点方案选择具体过程

(1)首先根据该省级电网的实际情况,首先

在电网内所有 500 kV 节点中,筛选与电厂直接相连的交流母线(由于其易造成电厂与换流站间的相互干扰,工程上不建议在这些节点附近建造换流站),并通过比对短路比的大小得知 $m = 3, n = 10$,即直流落点备选的方案数为 $m \times n = 30$;

(2)再通过PSD-BPA软件计算各直流方案所对应的多馈入相互作用因子MIIF,其中 $1\,000\text{ kV}$ 母线FuZhouHV与备选的 500 kV 母线间的MIIF均小于 0.15 ,可认为直流子系统间的相互作用近似为 0 ,说明两母线间的电气距离较远,但该类分层接入方案中逆变站的建设困难,并不满足工程实际要求,因此筛选这类方案,即可根据式(1)、(2)、(4)和式(7~11)求得各直流方案所对应的直流权重因子、稳定性指标 C_{sum} 、经济性指标 P_{loss} 、两指标的归一化值和对应的权重系数 $W = [0.75\ 0.25]$,即可整理得经济性和安全性指标所构成的落点选择的目标函数值(详见附录表A1、A2),因篇幅有限,仅给出其目标函数值,如表1所示。

表 1 各直流落点方案所对应的目标函数值
Tab. 1 The objective function values of individual direct current location scheme

地点	直流落点方案	F 值
QuanZhou	XiaMenHV	1
NanAn	XiaMenHV	0.888 1
XiaDong	XiaMenHV	0.849 1
ZiLing	XiaMenHV	0.700 0
JinJiang	XiaMenHV	0.696 4
WuFeng	XiaMenHV	0.542 6
HaiCang	XiaMenHV	0.413 7
HuiQuan	XiaMenHV	0.312 3
JiMei	XiaMenHV	0.422 0
DongLin	QuanZhHV	0.096 7
NanAn	QuanZhHV	0.945 0
XiaDong	QuanZhHV	0.887 3
ZiLing	QuanZhHV	0.928 4
JinJiang	QuanZhHV	0.814 5
WuFeng	QuanZhHV	0.795 3
HaiCang	QuanZhHV	0.680 9
HuiQuan	QuanZhHV	0.557 0
JiMei	QuanZhHV	0.455 5
DongLin	QuanZhHV	0.610 1
	QuanZhHV	0.339 7

观察表 1 可知,直流落点最优方案是直流系

统分别接入 500 kV 交流母线 QuanZhou 和 1 000 kV 交流母线 XiaMen HV。

5.2 潮流合理分析

结合 2020 年该规划电网的开机负荷情况分析,可知北部电源装机较为充足;相反,东南地区总装机容量 6 819.8 MW,而该地区负荷将会达到 20 872 MW,具有较大的功率缺额,所以特高压直流落点优先考虑落点东南地区,使区域发电与负荷就地平衡,实现潮流的合理分布。

因此,从该电网潮流总体合理分布的角度来看,特高压直流落点方案是直流系统分别接入 500 kV 交流母线 QuanZhou 和 1 000 kV 交流母线 XiaMen HV 是合理的。

根据上述选择方法对直流落点进行优选后,选用分别接入 500 kV 交流母线 QuanZhou 和 1 000 kV 交流母线 XiaMen HV 的落点方案,并对其进行潮流分析。换流站附近潮流 500 kV 交流通道的潮流分布情况,如表 2 所示。

表 2 直流不同接入方式换流站附近潮流较重的 500 kV 交流通道的潮流分布

Tab.2 Power flow distribution of relative 500 kV lines near the converter station under different connection modes

换流站附近 500 kV 交流通道	线路有功功率/(MW/回)(正常方式/ N-1 方式)	
	直接接入 500 kV	分层接入
QuanZhou - - - JiMei	1 649.3/2 930	1 111.9/1 767
QuanZhou - - XiaDong	1 771.9/3 067	880/1 440

参考文献:

[1] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):1-8.

[2] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. ±1 000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):1-5.

[3] 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.

[4] 王康,刘崇茹,韩民晓,等. 兼顾稳定性与经济性的交直流系统直流落点选择研究[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):73-78.

[5] 周勤勇,刘玉田,汤涌. 计及直流权重的多直流馈入落点选择方法[J]. 电网技术,2013,37(12):3336-3341.

[6] 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.

[7] 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.

比对表 2 可知,由于直流输电系统传送的有功约为 10 000 MW,直接接入 500 kV 交流网架,将引起功率转移困难的问题,而分层接入 500 kV 及 1 000 kV 交流网架能较好地解决这一难题,潮流分布更具合理性。

6 结论

1) 根据电网实际需求和落点期望结果,在多馈入短路比的基础上,引入直流权重因子,建立了分层接入方式下直流落点的稳定性指标,结合网络损耗,构建直流落点选择的目标函数,解决特高压直流分层接入方式中,落点选择缺少合理的研究方法与手段的问题。

2) 通过对实际规划电网进行筛选,可知所提落点选择方法可实现对落点方案的快速评估和方案优劣排序,便于工程应用。

3) 所提方法经过适当扩展,可应用于含有多直流系统的实际规划电网中,进一步深入研究含有该分层接入方式的多馈入直流落点选择方法。

(责任编辑:肖锡湘)