

特高压直流输电系统接入受端系统方式对比研究分析

刘天宇,王渝红,李 瑾

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:详细阐述了特高压直流受端单层接入、分层接入和分极分层接入方式的拓扑结构及其特点。在单层接入和分层接入方式控制系统结构的基础上提出了分极分层接入方式的控制系统结构。从多馈入短路比、故障特性和受端交流系统的接纳能力等方面对3种不同的结构方式进行了对比研究,得出分层接入和分极分层接入能有效提高多馈入短路比和受端交流系统的接纳能力;相较于单层接入方式、分层接入方式和分极分层接入方式具有更好的故障恢复特性和更强的受端交流系统接纳能力。

关键词: UHVDC; 接入方式; 控制系统结构; 故障特性; 接纳能力

Abstract: The topology structures and characteristics of UHVDC single-layer connection mode, hierarchical connection mode and pole hierarchical connection mode are described in detail. Based on control system of UHVDC pole hierarchical connection mode and UHVDC hierarchical connection mode, the control system structure of UHVDC pole hierarchical connection mode is proposed. The three kinds of UHVDC connection modes are compared from the multi-feed short circuit ratio (MISCR), fault features and acceptance ability of AC system in receiving end. It is obtained that UHVDC hierarchical connection mode and UHVDC pole hierarchical connection mode can effectively improve MISCR and the acceptance ability of AC system in receiving end. Compared with UHVDC single-layer connection mode, UHVDC hierarchical connection mode and UHVDC pole hierarchical connection mode have better recovery characteristics and stronger acceptance ability of AC system in receiving end.

Key words: UHVDC; connection mode; structure of control system; fault features; acceptance ability

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0023-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.005

0 引言

一次能源和负荷的分布特点决定了中国发展特高压直流输电技术的必要性。特高压直流(UHVDC)是指 ± 800 kV及以上电压等级的直流输电技术,它具有输送容量大、电压等级高、可用于电力系统非同步联网等特点^[1-3]。自2009年中国以及世界上第一个特高压直流输电工程——云南—广东 ± 800 kV特高压直流输电工程投产以来,中国特高压直流输电技术高速发展,向上直流的投运更是标志着中国特高压直流相关设备设计制造技术达到世界先进水平。

由于中国大型水电站多由特高压直流送出,其送端整流侧所有阀组都接在同一电压等级下。中国负荷中心相对集中使得多馈入直流集中落入负荷中心成为了电网发展所必须面对的重要的问题^[4-5]。中国学者在特高压单层接入方式的基础上首次创新

性地提出了特高压分层接入的概念,并验证了分层接入有利于提高受端电网的电压支撑能力,引导潮流在不同电压层级间合理分布^[6]。新建的 ± 800 kV蒙锡—泰州、 $\pm 1\,000$ kV准东—皖南两回特高压直流输电工程,其逆变站均采用分层接入 $1\,000$ kV及 500 kV交流电网的方式^[6]。现有文献主要对单一接入形式进行分析,包括分层接入直流控制系统的整体设计^[7-8]、功率的协调控制^[9]、系统接纳能力^[10]等。

为更加全面地分析比较特高压直流接入方式的优缺点,为后续特高压直流接入方式的选取提供参考,有必要对特高压直流的接入方式做一个分析对比。首先详细分析了特高压直流不同接入方式的拓扑结构及其特点,为适应不同的接入方式,提出了相应的控制系统结构;其次计算了不同接入方式的多馈入短路比;最后在PSCAD/EMTDC仿真软件中建立了几种不同接入方式的仿真模型,通过仿真得到

了其相应的故障特性和受端系统接纳能力曲线,并从系统结构和多馈入短路比等方面分析了其中的原因,进一步验证了前面的理论分析。

1 特高压直流接入电网方式

与 ±500 kV 高压直流常常用单极仅有 1 个 12 脉动换流器不同,特高压直流由于其输送容量大、电压等级高,其单极一般采用由 2 个 12 脉动换流器串联的结构^[1]。这也导致在整流侧和逆变侧交流母线接入方式的多样化。

主要从受端交流母线接入方式的不同,区分不同的接入方式,其整流侧高低压阀组在一个换流站内并且接入同一个交流系统中。当其逆变侧接入同一换流母线时,将这种结构称为单层接入方式;当逆变侧高、低压阀组分别接入不同的电压等级时,将这种结构叫做分层接入方式;当逆变侧同一极的高、低压阀组接入同一换流母线时,将这种结构叫做分极分层接入方式。

3 种不同的接入方式其结构上的主要区别体现在逆变侧高、低压阀组接入不同电压等级换流母线的方式上。为减轻 500 kV 通道潮流,分层接入和分极分层接入方式的逆变侧一般接入 1 000 kV 和 500 kV 两个不同电压等级的交流系统。

1.1 特高压直流单层接入方式

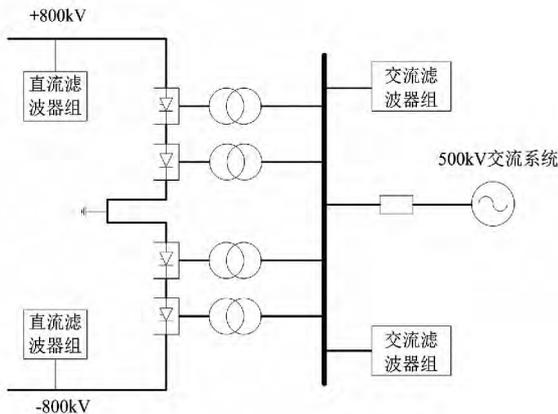


图1 特高压直流单层接入方式

如图 1 所示,逆变侧高、低压阀组直接接入 1 000 kV 或者 500 kV 换流母线上,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 和 500 kV 交流母线。由于其逆变侧接入同一换流母线,所以将这种结构叫做特高压直流单层接入方式,它是一种单馈入结构。当直流输送容量相对较小

时,受端系统接入同一母线最简单,也最合理。

1.2 特高压直流分层接入方式

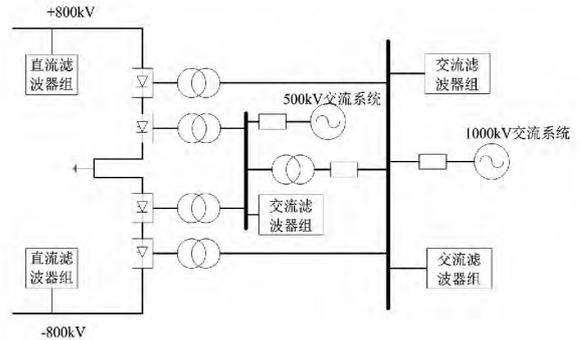


图2 特高压直流分层接入方式

如图 2 所示,逆变侧低压阀组接入 500 kV 交流母线,高压阀组接入 1 000 kV 交流母线^[6]。两换流母线需要分别配置相应的交流滤波器组,并且独立地控制各自的交流电压和无功功率。由于逆变侧接入了不同的电压等级,接入不同电压等级的换流变压器的参数也不同。特高压直流分层接入方式可以等效为一个特殊的两馈入系统。特高压分层接入方式直流额定输送容量最高可达 11 000 MVA^[6]。通过两电压等级接入交流系统可相应地降低交流系统的短路电流,同时较换流变压器直接接入 1 000 kV,降低了换流变压器的绝缘强度和工程造价。

1.3 特高压直流分极分层接入方式

为了解决分层接入方式下同一电压等级的逆变站发生换相失败时,造成非故障电压等级的逆变站也同时发生换相失败的问题,有学者提出了特高压直流分极分层接入方式^[11],其接入方式如图 3 所示。

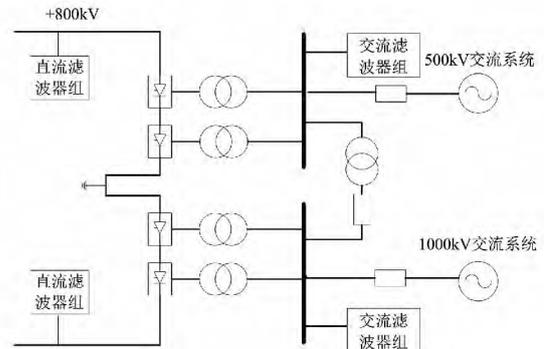


图3 特高压直流分极分层接入方式(1)

逆变侧同一极的高、低压阀组接入同一换流母线。图 3 中正极高、低压阀组接入 500 kV 交流母线,负极高、低压阀组接入 1 000 kV 交流母线(两电压等级可互换)。分极分层接入方式可以有效地避免单一电压等级故障时所引起的同时换相失败问

题;同时非故障电压等级交流系统对故障交流系统的恢复会有一定的支撑作用,但当双极功率不平衡时,会使得接地极电流偏大。

由于分极分层结构正负极相对独立,结合中国大规模新能源基地需外送的实际情况,可在其整流侧分极接入不同的能源基地,其结构如图4。

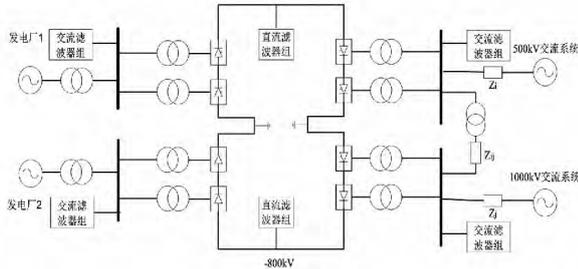


图4 特高压直流分级分层接入方式(2)

图4也可以视作特殊的4端口直流系统,其充分发挥了可通过整流器和逆变器隔离交流系统、可实现非同步行特点,充分利用直流线路走廊,其运行方式也更加灵活。这里只对图3所示的方式(1)进行研究。

2 控制系统结构

3种不同的特高压直流接入方式都是采用双阀组串联结构,但分层接入方式和分极分层接入方式在受端相比于单层接入方式仍有很大的不同^[12]。由于受端接入方式的不同导致其相应的直流控制系统结构也不同。下面讨论对于特高压直流分层接入端,同一极的两个阀组分别接入不同的两个交流系统,直流控制系统怎样响应来自不同的交流系统的控制信号;对于特高压直流分极分层接入方式,同一极的高低电压阀组接入的是同一换流母线,直流系统又是怎样实现两层电压等级的协调配合。

2.1 特高压单层接入方式控制系统结构

特高压单层接入方式下(普通UHVDC)的直流控制系统总体可分为双极控制、极控制和阀组控制三层^[13]。其控制系统整体结构示意图如图5所示。

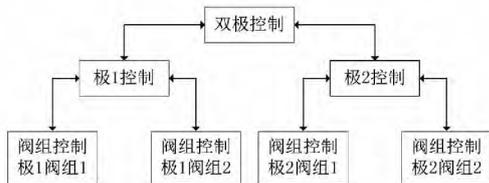


图5 特高压单层接入控制系统整体结构示意图

3种结构方式下整流侧高、低压阀组在一个换流站内并且接入同一个交流系统中,其控制结构可以采用与普通UHVDC相同的结构及配置。

2.2 特高压分层接入方式控制系统结构

特高压直流的分层接入端,属于同一极的2个阀组分别接入2个交流系统中,分层接入端的双阀组对应的交流系统运行工况不一致,其控制结构与一次主回路结构和控制要求相适应。总体上受端换流站控制系统仍采用双极层、极层和阀组层分层结构,但还增加了与2个交流电网相关的1000kV侧双极控制和500kV侧双极控制功能^[7],其结构示意图如图6所示。

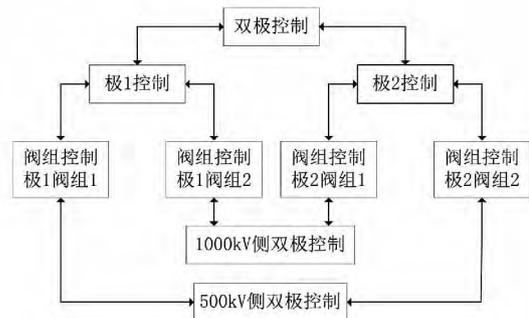


图6 特高压分层接入控制系统整体结构示意图

单层接入方式下直流电流、电压和熄弧角3个控制器布置在极控制层,极层控制器产生的触发指令同时发往2个串联的阀组。特高压直流分层接入方式其逆变器与两交流系统联系并且同一极的两阀组分别接入不同的交流系统中,故直流电流、电压及熄弧角控制器应该配置在阀组层。

2.3 特高压分极分层接入方式控制系统结构

与特高压直流分层接入方式其同一极的两阀组分别接入不同的交流系统不同,特高压直流分极分层同一极的两阀组接入相同的交流系统,直流电流、电压和熄弧角控制器也布置在极控制层。为实现1000kV和500kV两层的协调控制,有必要增加双极协调控制,其结构示意图如图7所示。

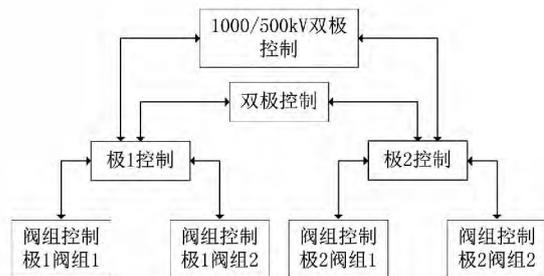


图7 特高压分极分层接入控制系统整体结构示意图

特高压分极分层可以近似地看做是2个单极运行的直流系统,其不仅可以通过改变电压来实现流入两交流系统的功率,还可以通过改变电流的方式来实现。而特高压直流分层接入,其直流电流共用,故只能通过改变电压的方式来改变功率在2个交流系统间的分配。

为方便两电压等级下的功率分配,在其整流侧也配一个1000/500 kV 双极控制,并在系统层增加一个功率协调控制器,如图8所示。

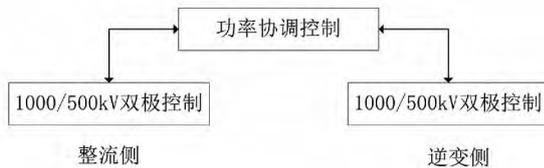


图8 特高压分极分层接入功率协调控制

3 多馈入短路比

CIGRE 定义了单条直流短路比(short circuit ratio SCR)的概念用于评估直流系统与交流系统的相互作用强度。它是指交流系统的短路容量与直流系统额定输电功率之比,即

$$K_{SCR} = \frac{S_{sc}}{P_{dN}} \quad (1)$$

式中: S_{sc} 为交流系统的短路容量, MVA; P_{dN} 为直流换流器的额定功率, MW。

对于多直流馈入系统来说,由于直流落点密集,各直流系统之间的相互影响和作用明显。在 SCR 指标的基础上,CIGRE 多馈入直流工作组于 2007 年给出了多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio MISCR)的定义^[14-15],其计算公式为

$$K_{MISCR_i} = \frac{S_{aci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} P_{dj}} = \frac{U_{iN}^2 / Z_{eqii}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \quad (2)$$

$$= \frac{U_{iN}^2}{|Z_{eqii}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}}$$

若 $U_{iN}^2 = 1$, 则有

$$K_{MISCR_i} = \frac{1}{|Z_{eqii}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}} \quad (3)$$

式中:各物理量均为标么值; K_{MISCR_i} 为第 i 回直流对应的多馈入短路比; S_{aci} 为第 i 回换流母线交流侧系统短路容量; U_{iN} 为第 i 回换流母线的额定电压; Z_{eqii}

为换流母线 i 的等效自阻抗; Z_{eqij} 为换流母线 i, j 之间的等效互阻抗; P_{di}, P_{dj} 分别为第 i, j 回直流的额定功率。

由式(3)可知在直流输送功率一定的情况下,影响多馈入短路比的主要是受端交流系统的结构和参数,从图3、图4可以看出特高压分层接入方式和特高压分极分层接入方式下换流母线及其外部系统相同,其可化简等效为图9所示的等值系统。

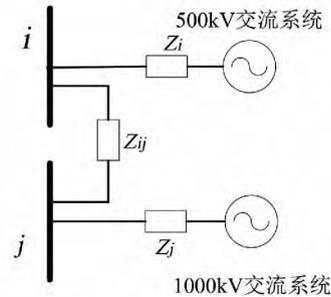


图9 换流母线及其外部等值系统示意图

由图9等值系统可得其节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_i} + \frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} \\ -\frac{1}{z_{ij}} & \frac{1}{z_j} + \frac{1}{z_{ij}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对其求逆,可得其节点阻抗矩阵为

$$Z = \frac{1}{z_i + z_j + z_{ij}} \begin{bmatrix} z_i z_{ij} + z_i z_j & z_i z_j \\ z_i z_j & z_j z_{ij} + z_i z_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$\begin{cases} Z_{eqii} = \frac{z_i z_{ij} + z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \\ Z_{eqij} = \frac{z_j z_{ij} + z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \\ Z_{eqij} = Z_{eqji} = \frac{z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: z_i 和 z_j 分别为 500 kV 和 1000 kV 层面的等值阻抗; Z_{ij} 为层间等值阻抗; Z_{eqii} 和 Z_{eqij} 分别为 500 kV 和 1000 kV 系统的自阻抗; Z_{eqij} 为层间互阻抗。

在双极双十二脉动的直流输电模型的基础上分别搭建了3种不同接入方式的模型。其输送容量为8000 MW,电压等级为 ± 800 kV。单层接入方式受端接入500/1000 kV 交流系统,其等值阻抗分别为 $Z = 1/2, Z = 1/3$ 。分层接入和分级分层接入方式下,500 kV 受端系统的等值阻抗 $Z_i = 1/2$, 1000 kV 受端系统的等值阻抗 $Z_j = 1/3$, 联系阻抗取为 $Z_{ij} = 1$ 。结合式(3)和式(6)可以得出3种方式的多馈入

短路比。

表1 不同接入方式下多馈入短路比

接入方式	单层接入		分层接入		分极分层接入	
	500 kV	1 000 kV	500 kV	1 000 kV	500 kV	1 000 kV
MISCR	2.00	3.00	3.67	4.40	3.67	4.40

表1的计算结果表明,分极分层接入与典型分层接入方式的 MISCR 相同,均大于单层接入方式的 MISCR,由此可见,两种不同的分层接入方式均具有良好的提高受端电网电压支撑能力的优势。

4 故障特性对比

为对比分析故障动态特性的区别,在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立单层接入、分层接入和分极分层接入方式下的仿真系统,其中分极分层中,500 kV 母线与直流系统正极相连,1 000 kV 母线与直流系统负极相连。分层接入方式和分极分层接入方式都在 500 kV 母线处设置持续时间 0.05 s 的三相短路故障,对比其逆变侧电压电流的动态特性。

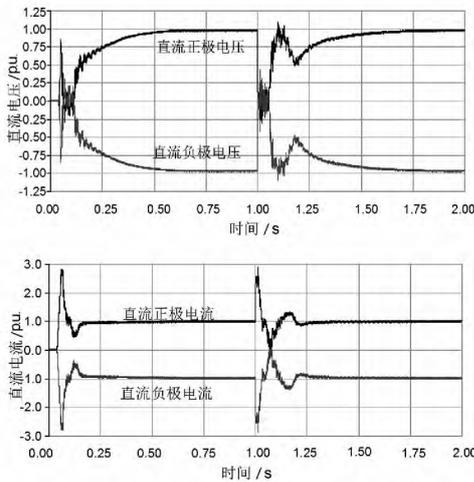


图10 特高压单层接入直流电压电流曲线

单层接入方式下,由于其直流电流共用且正负两极具有相同的换流电压,所以其电压电流的故障特性一致,故障发生时直流电压的下降,导致了直流电流在故障发生后约半个周波时增大到 2.9 p.u.。故障切除后约 0.7 s 直流电压恢复正常。

分层接入方式虽然有 2 个不同的换流电压,但是由于其结构的对称性使得正负极直流电压同样具有相同的故障特性,其电流共用,所以电流特性也相同。故障发生后,其正负极电流最大约为 2.9 p.u.。故障切除后约 0.6 s 后直流电压恢复到正常状态。这是由于分层接入方式的 MISCR 较单层接入大,具

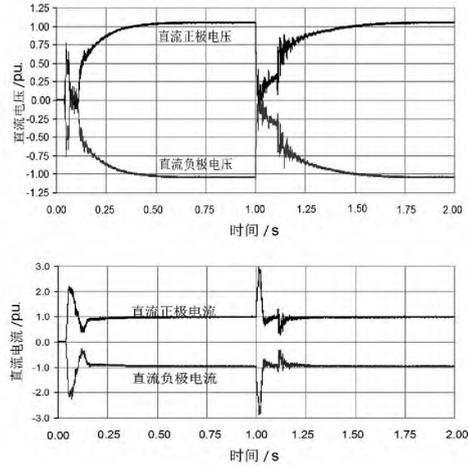


图11 特高压分层接入直流电压电流曲线

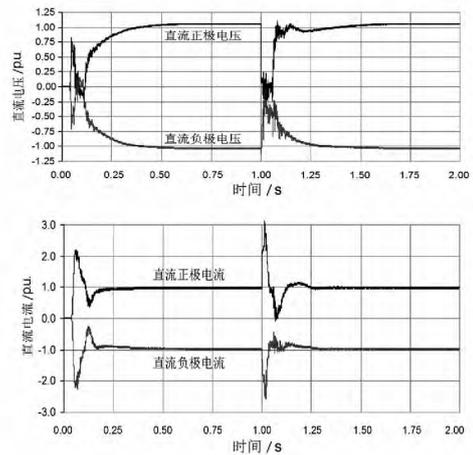


图12 特高压分极分层接入直流电压电流曲线

有更好的电压支撑能力。

与上述两种结构不同,特高压直流分极分层由于其正极和负极分别与 500 kV 换流母线和 1 000 kV 换流母线相接,正负极不平衡电流可以通过接地极流通。故障发生后,其电压电流的特性不一致。当故障切除后,与未发生故障的 1 000 kV 交流电压相联的直流负极电压约 0.2 s 后恢复正常,从而加速了与发生故障的 500 kV 交流母线相接的直流正极电压的恢复,其约在故障切除后 0.2 s 恢复到额定值。

为更加方便对比其故障特性,现列表对比,如表 2 所示。

表2 不同接入方式下故障特性

接入方式	单层	分层	分极分层
受端结构	对称	对称	不对称
正负极故障特性	相同	相同	不相同
MISCR(500/1 000)	2/3	3.67/4.4	3.67/4.4
故障恢复时间/s	0.7	0.6	0.2

综上所述,可知:1) 单层接入方式和分层接入

方式逆变侧具有对称性,其正负极的故障特性相同,而与分极分层正负极故障特性不同。2) 分层接入方式和分极分层接入方式的故障恢复时间较单层接入方式短,分极分层接入方式非故障交流系统加快了故障交流系统的恢复,其故障恢复时间最短。

5 受端交流系统接纳能力

与传统交流输电系统相比,直流输电系统两端的交流系统通过整流器和逆变器隔离,可实现非同步运行,不存在功角稳定问题,其输送容量和距离将不受同步运行稳定性的限制,受端交流系统能够接纳直流功率的大小主要取决于交流系统的相对强度。

就单个换流器来说,直流电流 I_d 增加时,其对应的输送功率 P_d 存在最大值。3种特高压直流系统结构在正常运行时其4个换流阀组的直流电流相同。受端系统能够接纳的最大直流功率 P 应该满足^[3,9]

$$dP/dI_d = 0 \quad (7)$$

图13给出了3种不同接入方式下的受端系统接纳直流功率曲线。换流阀组熄弧角均为 18° 。3种接入方式换流母线上的滤波器和无功补偿装置具有相同的参数。这里主要研究受端交流系统接纳功率,不对直流输送功率做相应的限制。

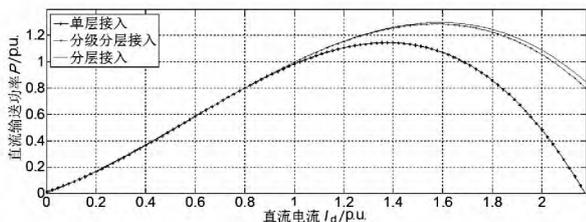


图13 3种接入方式受端交流系统接纳功率曲线

最大功率曲线法同样适用于受端最大接纳能力的分析。当受端系统运行于最大接纳功率曲线的左侧即 $dP/dI_d > 0$ 时,则功率稳定;当受端系统运行于最大接纳功率曲线的右侧即 $dP/dI_d < 0$ 时,已超过最大接纳功率极限,功率不稳定。由图13可知,分层接入方式和分极分层接入方式受端最大接纳功率基本相同,可以达到约1.30 p.u.,单层接入方式下的最大接纳功率约为1.16 p.u.。分层和分极分层接入方式在直流电流 I_d 约为1.6 p.u.时达到最大输送功率,单层接入方式在直流电流 I_d 约为1.4 p.u.时达到最大输送功率。故采用分层或分极分层的结构较单层接入方式可以在一定程度上提高受端系统直流功率的接纳能力和直流电流稳定运行区间。

6 结 论

着重讨论了特高压直流的3种接入方式的基本结构,并在此基础上对其控制系统结构、故障特性以及受端交流系统的接纳能力做了研究、对比,得出以下结论:

1) 从系统结构上分析,单层接入方式是一种单馈入的结构;分层接入方式可以看做是特殊的两馈入系统,而分极分层接入方式可以等效为2个极性相反的单极运行的直流系统。

2) 在分析了单层接入和分层接入方式的控制系统结构的基础上,设计了分极分层接入方式的控制结构。并分析得出,分层接入只能通过改变电压来调节直流功率在2个交流系统间的功率分配,而分极分层不仅可以通过改变电压,还可以通过整流侧的定电流控制来调整两交流系统接纳的直流功率。

3) 在PSCAD/EMTDC中搭建3种不同的接入形式的仿真模型,并对其故障特性进行了仿真,得出单层接入方式和分层接入方式其正负极的故障特性相同,而与分极分层正负极故障特性不同。分极分层方式较单层接入和分层接入具有更好的故障恢复特性。

4) 通过3种接入方式受端交流系统的接纳功率曲线分析得出:采用分层或分极分层的结构较单层接入方式可以在一定程度上提高受端系统直流功率的接纳能力和直流电流稳定运行区间。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科技出版社, 2010.
- [2] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] 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.
- [4] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
- [5] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
- [6] 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.

(下转第62页)

程度的不同有针对性地制定防护措施。对受影响严重的变压器,应制定治理方案,并加强常规检测和其他试验检测,避免慢性损伤的累计效应导致变压器事故。

6 结 论

针对幸福站主变压器噪声增大的情况,进行了红外测温、噪声振动和中性点直流量测试及分析,并对比了主变压器噪声异常时间与某换流站切换单极大地回路运行时间。发现了幸福站主变压器噪声异常的原因是德阳换流站单极大地回路运行时导致该变压器产生直流偏磁现象引起的。目前,四川电网已投运4座超/特高压换流站,直流接地极电流已导致多台变压器发生直流偏磁现象,直流接地极电流导致单相三柱式变压器噪声异常的距离达到300 km,应加强对区内变压器直流偏磁电流的监测和防护。

参 考 文 献

[1] Heywood R J, Emsley A M, Ali M. Degradation of Cellulosic Insulation in Power Transformers. Part 1: Factors

(上接第28页)

[7] 李少华,王秀丽,张望,等.特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2409-2416.

[8] 吴彦维,李晔,陈大鹏,等.10 000 MW特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(18):108-113.

[9] 郭龙,刘崇茹,袁飞龙,等. ± 1100 kV直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J].电力系统自动化,2015,39(11):24-30.

[10] 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.

[11] 刘心暘,李亚男,邹欣,等.换流母线分段运行对 ± 1100 kV特高压直流输电工程的影响[J].高电压技术,2016,42(3):942-948.

[12] 孙昕,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV特高压直流工程创新实践[J].中国电机工程学报,2009,29(22):35-

Affecting the Measurement of the Average Viscometric Degree of Polymerisation of New and Aged Electrical Papers [J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 2000, 147(2): 86-90.

[2] 广东省电力试验研究所.贵广直流单极大地方式对变压器的影响测试简报[M].广州:广东省电力试验研究所,2004.

[3] 蒯狄正,万达,邹云.直流输电地中电流对江苏电网设备影响的分析与处理[J].电力系统自动化,2005,29(2):81-82.

[4] 曾连生.直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J].高电压技术,2005,31(4):57-58.

[5] 王明新,张强.直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J].电网技术,2005,29(3):9-15.

[6] Wei Jiang, Guangning Wu, Hongliang Wang. Calculation of DC Ground Current Distribution by UHVDC Monopolar Operation with Ground Return [C]. 2008 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Chicago, USA, 2008: 1-5.

作者简介:

蒋伟(1979),博士,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

(收稿日期:2016-10-03)

45.

[13] 胡铭,田杰,曹冬明,等.特高压直流输电控制系统结构配置分析[J].电力系统自动化,2008,32(24):88-92.

[14] CIGRE Working Group B4.41. Systems with Multiple DC Infeed [R]. CIGRE, 2008.

[15] Paulo Fischer de Toledo, Bernt Bergdahl, Gunnar Asplund. Multiple Infeed Short Circuit Ratio - aspects Related to Multiple HVDC into One ac Network [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China, 2005.

作者简介:

刘天宇(1992),硕士研究生,研究方向为高压直流输电技术、电力系统稳定及其控制;

王渝红(1971),教授、硕士生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源并网方式;

李瑾(1991),硕士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定及其控制。

(收稿日期:2016-10-27)