

# 嵌入式换流站设计优化研究

陈斌 陈晋 周亚龙 胡曦文  
(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司)

**摘要:** 为了充分发挥嵌入式直流技术的特点和优势,助力新型电力系统的建设。本文对嵌入式换流站的直流拓扑接线、换流变选型、平面布置等开展了优化研究。提出采用对称单极接线,优化直流功率运行范围、采用 SVG 代替常规交流滤波器、采用单相三绕组换流变压器,换流变与阀厅解耦布置等优化方案,降低了嵌入式换流站的工程造价及难度,有助于嵌入式直流的推广与应用。

**关键词:** 嵌入式直流技术; 功率运行范围; 拓扑接线优化; 解耦布置

2024.07.DQGY  
50

## 0 引言

随着社会经济的高速发展,电网的负荷持续增长对电能质量的要求也不断提高。以交流输电为主的传统电网面临越来越大的困难和挑战,例如电网输送通道资源越来越紧张,用电负荷和供电容量增加带来的短路电流超标问题,土地资源有限站址的选择也越来越难,大规模新能源的接入带来安全稳定运行压力不断增大等,面对上述挑战,传统电网需从源网荷储等各方面进行转型升级,满足新型电力系统的建设要求。“嵌入式”直流可以充分利用现有变电站场地、输电走廊,借助直流输电灵活调节功率、线路走廊宽度小等特点,通过“交流改直流”,充分利用现有的路径通道和大跨越资源,提升关键输电断面的输电能力,提高输电走廊利用率,解决局部电网供电能力不足的问题,提高供电可靠性<sup>[1-5]</sup>。

## 1 嵌入式直流技术特点

与传统的互联方式建设的远距离、大容量直流输电系统不同,“嵌入式”直流的送、受两端换流站建设于同一个交流电网内部。相比常规大直流具有以下特点。

### (1) 功能定位简单

高压大直流将能源基地的电能远距离输送至负荷中心,主要目的是实现能源的大范围转移与优化配置,需保证能源输送的可靠性、持续性、经济性。而“嵌入式”直流主要用于区域局部交流系统的优化,通过直流改变若干通道、区域的潮流分布,使交流系统运行得更为舒适、经济,是对区域交流系统的重要补充。

### (2) 送受端电流存在交流系统的紧密连接

高压大直流送受端电网仅通过直流点对点连接,

不存在交流联系。而“嵌入式”直流送受两端在同一个交流系统内，存在密切连接，直流的运行控制策略与两端交流系统的运行控制也密切相关。

(3) 电压等级低、容量小、距离短

高压大直流系统直流电压在 ±800kV 及以上，输送容量 8000MW 及以上，输送距离一般超过 1000km。“嵌入式”直流作为交流电网的补充，直流电压 ±400kV 及以下，输送容量 2000MW 及以下，输送距离一般在 500km 以内。

相对于传统高压大直流，嵌入式直流具有功能定位简单、电压等级低、容量小、距离短特点，其设计、建设不能完全照搬大直流。如直接将传统大直流进行微缩，可能会带来技术上不合理、造价上不经济等一系列问题，难以发挥“嵌入式”的优点。因此在满足功能需要的前提下，应尽可能采用简单的技术方案，探索更为简化的直流拓扑，尽可能优化平面布置、选用紧凑型设备、节省面积，降低工程造价。

2 拓扑接线优化

2.1 直流接线优化

大直流输送容量较大，如突然发生中断对两端交流系统的冲击较大，为保证功率输送的持续性和可靠性，一般采用带接地极的对称双极系统，当换流站 1 极或直流线路发生故障时，可通过调整运行方式保证直流输送功率不中断<sup>[6]</sup>。该接线型式换流站内部增加了较多的开关设备，布置复杂，占地面积及造价大幅度增加。而“嵌入式”直流作为交流系统的补充，功率中断对系统的影响相对较小，相比可靠性更应注重经济性，尽量简化接线拓扑。“嵌入式”直流一般应用于区域或城市电网，地下金属管道、金属构件较多，接地极选择困难。综合考虑，推荐“嵌入式”直流采用对称单极接线，不设接地极。当该接线仅可以对称双极运行，一极线路发生故障需要退出工作

时，必须停运整个双极系统。经分析计算，该接线方式下能量可用率达到 98.25%，直流强迫停运率 5.34 次/年，可靠性满足“嵌入式”直流工程要求。通过直流接线优化，精简了设备配置，降低了工程建设难度。双极大地中性线方式接线如图 1 所示，对称单极方式接线如图 2 所示。



图 1 双极大地中性线方式接线示意图



图 2 对称单极方式接线示意图

“嵌入式”直流嵌入交流系统内部，与送受端系统密切联系，利用这个特点可以进一步探索相关应用场景。对称单极接线中每极由两个 6 脉动阀串联组成一个 12 脉动阀，正常情况下接入同一个交流电网，也可以考虑将两个 6 脉动阀接入两个交流电网分区实现向不同分区供电。此时交流侧  $6k \pm 1$  谐波电流无法相互抵消，采用 SVG 来代替常规交流滤波器。SVG 提供换流器消耗无功的同时，滤除换流器产生的谐波<sup>[7]</sup>。进一步可以考虑增加一个旁路开关 QF，当直流线路故障或者另外一端换流站故障时，闭锁对侧换流站，合上 QF，两个交流分区之间通过直流背靠背实现异步互联，改进型对称单极方式接线如图 3 所示。

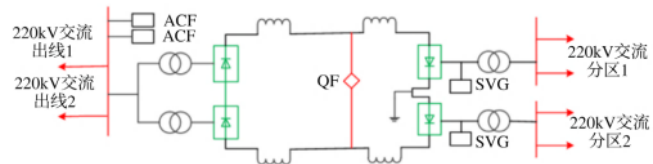


图 3 改进型对称单极方式接线示意图

### 2.2 直流运行功率优化

高压大直流运行功率一般为 0.1~1.0pu，最小运行方式下考虑最小滤波器的投运要求，容性无功存在较大盈余，为保证无功平衡站内需配置低压并联电抗器。“嵌入式”直流功率较小，且送受端交流系统联系紧密，存在大量交流功率交换。直流功率范围可以优化调整为 0.3~1.0pu，避免换流站内部配置低压并联电抗器，节省投资。江苏扬州—镇江 ±200kV，1200MW 换流站调整直流功率运行范围后，每个换流节省费用约 1500 万元。

## 3 主要设备选型及平面布置优化

### 3.1 换流变与换流阀选型优化

高压大直流换流站工程受制于换流变制造工艺、运输尺寸的限制，一般采用单相双绕组换流变压器 + 二重阀结构，每极配置 6 台单相双绕组变压器。“嵌入式”直流换流变容量小，采用单相三绕组换流变在制造工艺及运输上没有难度。采用单相三绕组变压器 + 四重阀可以显著减小阀厅尺寸，降低工程造价。以江苏扬州—镇江 ±200kV，1200MW 换流站为例，三绕组换流变和双绕组换流变的平面布置方案如图 4、图 5 所示，采用单相三绕组换流变压器之后阀厅建筑面积减小了 19.3%，阀厅及换流变区域占地面积减小 17.1%。

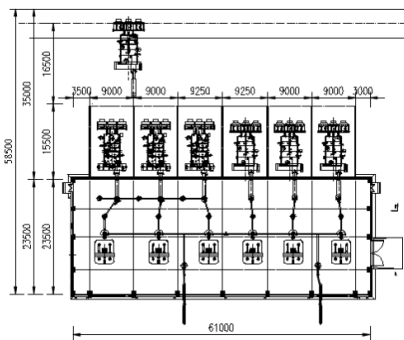


图 4 单相双绕组换流变 + 二重阀布置图

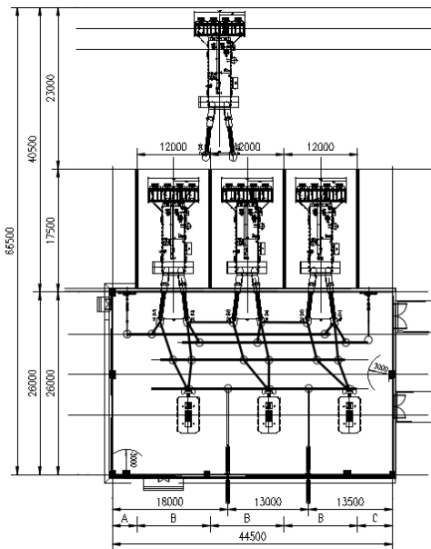


图 5 单相三绕组换流变 + 四重阀布置图

### 3.2 平面布置优化

常规高压大直流换流站中换流变与阀厅紧密连接，阀侧套管直接插入阀厅内部，在阀厅内部完成星形或角形接线。一旦换流变发生火灾事故，火灾就可能蔓延至阀厅内部造成事故范围扩大，国内曾发生过类似事故。为了减小换流变火灾对阀厅可能造成的恶劣影响，换流站建设过程中不断加强换流变阀侧套管处的孔洞封堵。封堵抗爆门由早期的双层板结构演变为现在的七层、八层结构，安装工艺也越来越复杂。即便如此，仍然不能完全杜绝火灾蔓延至阀厅的风险<sup>[8-10]</sup>。

±200kV 及以下穿墙套管造价低、长度短，可以考虑将换流变与阀厅解耦布置。换流变阀侧在阀厅外部完成星形或角形接线后，再通过穿墙套管与换流阀连接。该布置方案中，阀厅内仅安装换流阀并通过穿墙套管和外部换流变连接，与阀厅外设备形成物理隔离，改善阀厅阀组运行环境，减小了阀厅建筑面积。换流变与阀厅隔离布置避免了换流变发生火灾后对阀厅内阀组设备的影响，降低了火灾风险。由于换流变阀侧套管无需插入阀厅内部，套管可以

由倾斜布置调整为竖向布置，减小了换流变的转运空间，便于换流变的运输安装。同时由于换流变套管不伸入阀厅内部，无须设置结构复杂的抗爆门，阀厅靠近换流变侧的墙体也可由钢筋混凝土防火墙简化为砌体填充墙，节省了施工周期，降低了施工难度。以±200kV 1200MW 换流站为例，解耦布置方案相较常规方案阀厅建筑面积减小了52.4%，阀厅及换流变区域占地面积减小约10.7%。换流变与阀厅解耦布置平面图如图6所示，断面图如图7所示。

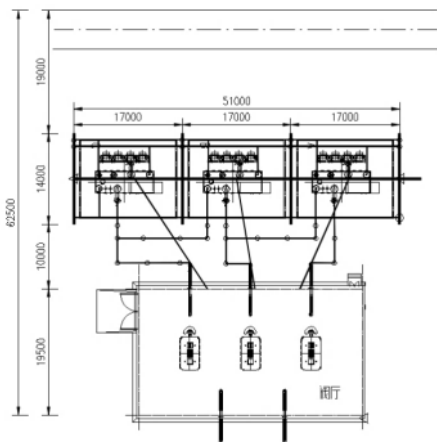


图6 换流变与阀厅解耦布置平面图

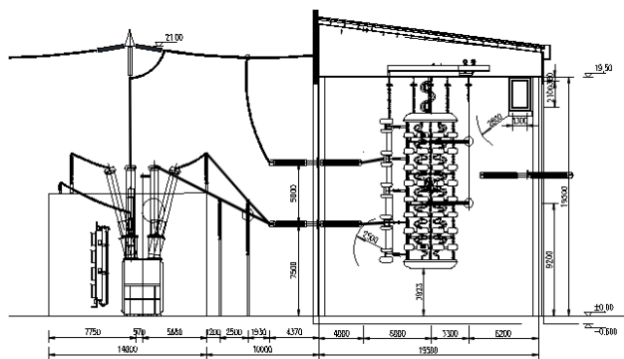


图7 换流变与阀厅解耦布置断面图

### 3.3 小结

以扬州—镇江±200kV 1200MW 换流站为例，常规单相双绕组布置（方案一）、单相三绕组布置（方案二）、单相三绕组+解耦布置（方案三）的详细技

术对比详见表1。经优化后采用单相三绕组换流变压器，且将换流变与阀厅解耦布置，可有效降低阀厅火灾风险，改善阀组运行环境；节省占地面积381m<sup>2</sup>，节省工程造价约4873万元；技术经济效益明显。

表1 不同方案经济技术对比分析

	方案一 (单相双绕组)	方案二 (单相三绕组)	方案三 (单相三绕组+解耦布置)
换流变	6+2台, 235MVA 22400万元	3+1台, 470MVA 18000万元	3+1台, 470MVA 18000万元
阀厅	23.5×61.0 (m) 换流变侧为钢筋混凝土防火墙, 需设置抗爆门	26×44.5 (m) 换流变侧为钢筋混凝土防火墙, 需设置抗爆门	19.5×35.0 (m) 阀厅墙体均为气体填充墙, 无需抗爆门
抗爆门	288万	240万	0
套管	3只, 360万	3只, 360万	10只, 1200万
换流区域尺寸	61×58.5 (m)	66.5×44.5 (m)	62.5×51 (m)
经济性	基准方案	-4782万	-4874万

### 4 结束语

能源转型和新型电力系统的建设对电网的“灵活性、安全性、可控性”提出了更高要求，嵌入式直流能灵活调节有功无功、优化局部区域/断面的潮流分布，将在高比例新能源直流送出及通道能力提升<sup>[11-12]</sup>、城市电网输电能力提升分区柔性互联、特高压直流工程分散接入等场景得到广泛应用。

本文结合嵌入式直流的特点，提出了嵌入式换流站的设计优化方案。简化优化直流拓扑结构：采用对称单极接线，调整功率运行范围，采用SVG代替常规交流滤波器。采用单相三绕组换流变压器，换流变与阀厅解耦布置。上述优化措施可以降低工程造价和难度，有助于嵌入式直流的推广应用。

### 参考文献

- [1] 王之伟, 黄俊辉, 程亮, 等. “嵌入式”直流技术在省级输电网中的规划及应用[J]. 电力工程技术, 2022, 41(66): 65-74.

(下转第57页)

(上接第53页)

- [2] 蔡晖, 韩杏宁, 许偲轩, 等. 输电线路“交改直”技术在江苏电网的应用研究[J]. 电力建设, 2021, 42(51): 105-110.
- [3] 蔡晖, 彭竹弈, 张文嘉, 等. 柔性直流输电技术在江苏电网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 90-94, 100.
- [4] 肖峻, 伊丽达, 郭伟, 等. 城市电网分区柔性互联的概念与示范工程论证[J]. 供用电, 2016, 33(8): 2-6.
- [5] 汪莹, 葛景, 王蒙, 等. 应用柔性直流输电技术提升大电网弱交流断面输电能力探讨[J]. 电工技术, 2020(7): 63-68.
- [6] 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司. 高压直流输电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [7] 马为民, 王玲, 李明, 等. 新型电力系统中的特高压直流输电 SLCC 换流技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4941-4948.
- [8] 钟波, 蒋亚强, 张佳庆, 等. 特高压换流站阀厅新型防火防爆封堵系统研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 231-234.
- [9] 潘志城, 谢志成, 邓军, 等. 换流变阀侧套管含油升高座穿入阀厅的火灾风险分析及优化措施[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 105-113.
- [10] 刘晓圣, 姬军, 张彩有, 等. 换流变阀侧套管封堵结构耐火极限研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(10): 1415-1417.
- [11] 卢宇, 汪楠楠, 刘鹏, 等. 采用交流耗能的新能源孤岛柔直送出方案及仿真研究[J]. 电气技术, 2022, 23(5): 18-24.
- [12] 孙冠群. 海上风电场全直流汇集经济性研究[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 1-5.

(收稿日期: 2024-03-09)