

±1100 kV 特高压直流工程主接线 与主回路参数研究

刘泽洪¹, 余军¹, 郭贤珊¹, 乐波², 赵峥²

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Study on Main Connection Line and Main Circuit Parameters of ±1100kV UHVDC

LIU Zehong¹, YU Jun¹, GUO Xianshan¹, YUE Bo², ZHAO Zheng²

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

ABSTRACT: Construction of ±1100kV UHVDC transmission channels from West to East in China is conducive to promote large scale optimal allocation of energy sources. In UHVDC transmission systems, main DC equipment development, project implementation, reliability level and power loss caused by converter outage are deeply impacted by main connection line of converter and main circuit parameters. This is also the most important step of project system research. Firstly, evaluation method of converter connection line of UHVDC projects are proposed in this paper. Secondly, according to previous project construction, equipment design and manufacturing experiences, three converter connection schemes are proposed and main circuit parameters are analyzed respectively based on each connection scheme. Finally, a proposed assessment method of converter main connection line is used to determine a reasonable and effective main connection topology for Changji-Guquan ±1100kV UHVDC project.

KEY WORDS: ±1100kV UHVDC; main connection line; main circuit parameters; series type converter; insulation coordination; reliability

摘要: 构建西电东送±1100 kV 特高压直流输电大通道, 有利于推进我国能源的大范围优化配置。在特高压直流输电系统中, 换流器主接线方案对于整个直流主设备研制和工程实施的难度、可靠性水平、换流器故障所造成的交流系统功率损失等都具有重大影响, 是工程系统研究的最核心问题。首先分析了特高压直流工程可采取的换流器接线型式; 其次, 根据以往工程建设经验和设备设计与制造经验, 提出了3种换流器接线型式, 并对其主回路技术参数进行了详细的计算分析; 最后, 根据所提的换流器接线型式评价方法, 确定了合理有效的主接线型式, 并在昌吉—古泉±1100kV 工程中进行应用。

关键词: ±1100kV 直流输电; 电气主接线; 主回路参数; 串

联型换流器; 绝缘配合; 可靠性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1790

0 引言

我国正在加快建设西南大型水电基地、西北大型煤电基地和新能源基地, 这些大型能源基地与东、中部负荷中心的距离达到或超过3000 km, 因此需加快远距离、大容量输电技术革新, 推进能源资源更大范围优化配置^[1]。±1100 kV 特高压直流输电技术具有经济输电距离更长、输送能力更强、输电损耗更低等优势。

在大容量高压直流输电系统中, 换流站主接线方案对于整个直流主设备研制、工程实施难度、可靠性水平、交流功率损失等都具有重要影响, 也是工程成套设计的基础和前提条件^[2]。换流站主接线方案的核心问题是确定换流站的接线技术方案和基于该结构的交直流设备的具体配置, 需要从技术方案可行性、工程可靠性及经济性等方面进行研究论证后确定^[2-4]。主回路接线确定后, 才能根据设备配置和接线形式开展详细的主回路参数计算, 然后根据主回路参数计算结构反过来优化主接线型式。

本文针对±1100 kV 特高压直流工程电气主接线方案及由此确定的主回路参数开展相关研究。首先, 提出了用于评价特高压直流输电主接线方案的方法; 根据直流电压等级及直流主回路特点, 提出了潜在的3种直流主接线技术方案形式; 然后, 从直流主接线技术方案不同所造成的多方面影响, 对3种方案的主回路参数、换流变参数、绝缘水平、建设成本、大件运输等因素进行了定性和定量分析; 最后, 利用分层加权得分法确定了换流器主接

线技术方案，据此确定了工程的主回路参数。

1 直流输电主接线技术方案的评价方法

1.1 评价方法

评价直流主接线技术方案的方法有若干种，如何建立一个科学的直流输电主接线拓扑的评价方法，全面分析相关因素的影响、综合评价各项指标关系、合理确定主接线优选方案尤为重要。常见的评价方法有定性评价法和定量评价法，定性方法主要有头脑风暴法、经验投票法、德尔菲法等，定量法有决策树法、分层加权得分法、线性规划法、人工智能法和模糊评价法等。由于主接线没有绝对的优和劣、好和坏的区别，任何一种主接线都要考虑工程的实际情况，因此其评价属于一种“模糊主观”的概念，采用非常精准的定量方法反而不能得到最优甚至错误的结论。

分层加权得分法是将评价目标分为若干层次和若干指标，依照不同层次不同权重进行综合评价的方法。根据分析系统中各因素之间的关系，开展评价工作：确定层次结构→建立目标树图→确定相对权重→计算子目标权重→计算各层指标得分→计算所有指标的总得分→排序选优。该方法自然满足一致性要求，不需要进行一致性检验，与其他方法相比具有良好的判断传递性和标度值合理性；其所需判断信息简单、直观，作出的判断精确，有利于决策者综合考虑各方案的优缺点，权衡利弊做出最合适的选择。

直流主接线技术方案的影响因素多，而备选主拓扑方案数量不是很多，将诸多影响因素综合考虑显得尤为重要。因此分层加权得分法非常适合主接线拓扑的优选，将每项的得分按照不同权重计算主接线技术方案的综合得分即可。综合得分计算公式如下：

$$F(k) = \sum_{i=1}^N w_i(k) f_i(k) \quad (1)$$

式中： $F(k)$ 表示第 k 种主接线技术方案的综合得分； i 表示第 i 个影响因素； w 表示每个因素的权重系数； f 表示每个因素下的得分情况。

开展直流主接线技术方案的评价，首先，需确定主接线技术方案的主要影响因素；其次，对各影响因素间的相互关系进行分析，确定其各自的权重关系及层级关系；然后，计算各影响因素的得分情况；最后，通过加权求和得到各主接线拓扑方案的综合得分。整体评估流程如图 1 所示。

1.2 影响直流主接线技术方案的主要因素

直流主接线技术方案受诸多因素限制，某些因素具有正相关性，某些因素具有负相关性，因此评

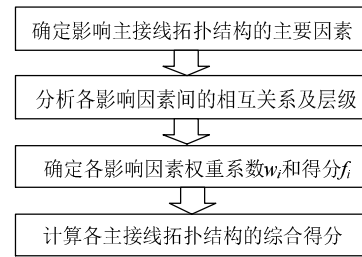


图 1 直流主接线技术方案的评价方案

Fig. 1 DC main topology and structure assessment scheme

价一种换流器主接线型式需要综合考虑多方面限制因素，大体可分为以下几类。

1) 对系统可靠性的影响。特高压直流输电系统主回路中影响系统运行可靠性的主要设备包括：一次设备如换流变压器、换流阀、平波电抗器、直流开关和二次设备控制保护系统等。可利用设备、系统故障率和损失电量等可靠性指标衡量各种换流器接线型式对系统可靠性的影响^[5-6]。

2) 对直流控制保护系统复杂程度的影响。换流器的串并联方式和级数严重影响控制保护的复杂程度。串并联级数越多，运行方式越多，控制系统就越为复杂，一定程度上影响二次系统的可靠性。

3) 对交流系统功率损失的影响。直流系统换流器级联数与各换流器间的电压分配方案直接影响着换流器故障后直流系统的输送功率，直流系统的功率波动进而造成交流系统频率的变化。

4) 对设备制造成本的影响。不同换流器接线型式影响换流变等设备的通流、容量及绝缘参数设计等，直接影响换流阀和换流变等设备的制造难度和成本。换流变压器需从国外或国内经过公路、铁路、水路多方式联合运输到达现场，某些换流站地处内陆山区，大件运输极其困难。换流变绝缘水平和容量决定了其尺寸大小，换流器的接线型式影响换流变绝缘水平和容量，进而对换流变大件运输成本影响巨大。不同的接线型式，所需要的备品备件也不相同，越多的设备型式对于换流站建设越不利。

5) 对换流站建设成本的影响。不同的接线型式对阀厅个数、换流变广场大小、直流场接线复杂程度以及交流侧分层接入的复杂程度都有影响，这些影响都将反映到换流站土建工程的建设成本上。

6) 对直流系统运行的影响。不同的换流器主接线型式可以组成不同的运行方式，换流器越多电压等级越多，形成的运行方式也越多，直流系统运行的方式就越灵活。我国已建成多条特高压直流输电工程，都采用双 12 脉动主接线型式，已具备广泛的运行经验，相对于新的主接线型式，能够更加

有效的保证系统安全稳定运行，减少人员培训费用与时间。

1.3 直流主接线技术方案的评价方法

根据以上对主接线拓扑的影响因素分析，可设计出由 3 个层次组成的综合评价递阶层次指标模型：第 1 层为总目标层(一级指标)；第 2 层为准则层(二级指标)；第 3 层为子准则层(三级指标)。

影响主接线技术方案影响因素的层次指标结构如图 2 所示。

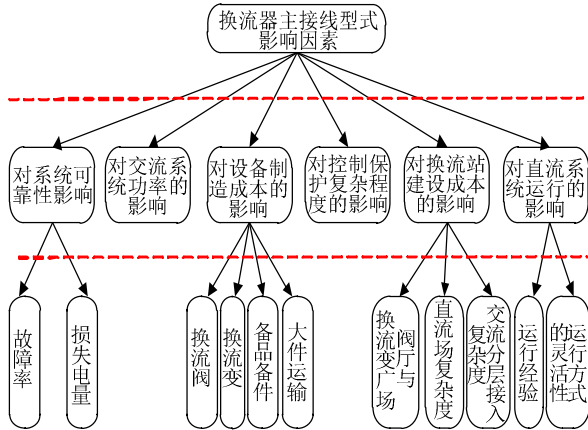


图 2 主接线技术方案影响因素

Fig. 2 Influence factors of main connection topology

2 ±1100 kV 特高压直流输电主接线技术方案备选方案及关键技术参数

2.1 主接线技术方案推选方案

我国常规 500 kV 高压直流输电工程中，大多采用直径 5 英寸/3000 A 的电触发晶闸管(electrolytically triggered thyristor, ETT)或光触发(light triggered thyristor, LTT)晶闸管。6 英寸/5000 A 换流阀已在多个±800 kV 特高压直流工程中应用。目前，经过技术升级的 6 英寸晶闸管电流高达 6250 A，可满足更大输送功率需求。同时直流系统的过载能力和安全裕度有了大幅度的改进。单位功率造价相对于 5 英寸晶闸管换流阀有所下降^[7-9]。

±1100 kV 换流器的直流输电电压相对±800 kV 提高 37.5%，且电流在 6 英寸晶闸管的容许范围内，因此不需要通过并联方案，采用多 12 脉动换流器串联即可。在±800 kV 特高压直流输电研究成果和工程实践经验的基础上^[3]，±1100 kV 工程每极 2 个或 3 个 12 脉动换流器串联接线方案在技术上均可行。3 种不同主接线型式的拓扑如图 3 所示。

由于±1100 kV 工程功率巨大，全部接入 500 kV 交流电网难以消纳，通常受端需要分层接入 500 kV/1000 kV 交流电网。为降低设备的制造难度，提高技术经济性，通常低端换流器直流电压低，交

流侧可接入更高的 1000 kV 交流电网，高端换流器由于直流电压高，交流侧应接入较低电压的 500 kV 电网。以昌吉—古泉±1100 kV 工程为例，接入方案如表 1 所示。送端通常只有 750 kV 电网，则全部接入 750 kV 交流电网。

其中方案 1 是典型的双 12 脉动串联方案，在中国的特高压直流工程中全部采用此方案，除每个单 12 脉动电压不同以外，运行方式、换流站布置等与传统±800 kV 完全相同；方案 2 是 3 个 12 脉动均分方案，与传统±800 kV 直流工程相比，每个 12 脉动的电压略低于 400 kV，但 3 个 12 脉动电压完全相同(对地电压不同)，运行方式更加灵活，任意 1 个和 2 个 12 脉动可组合运行，但换流变压器数量多 1/2，布置和占地与常规±800 kV 差别较大；方案 3 也是采用 3 个 12 脉动方案，但下面 2 个 12 脉动方案完全与常规±800 kV 一致，最高电压 12 脉动方案电压仅为 300 kV，此方案优点是下面 2 个 12 脉动可以完全借鉴常规±800 kV 的设备和运行经验，且最上 12 脉动电压低于±400 kV，设备容量和端子间绝缘水平相对降低，这样制造难度大为降低，但

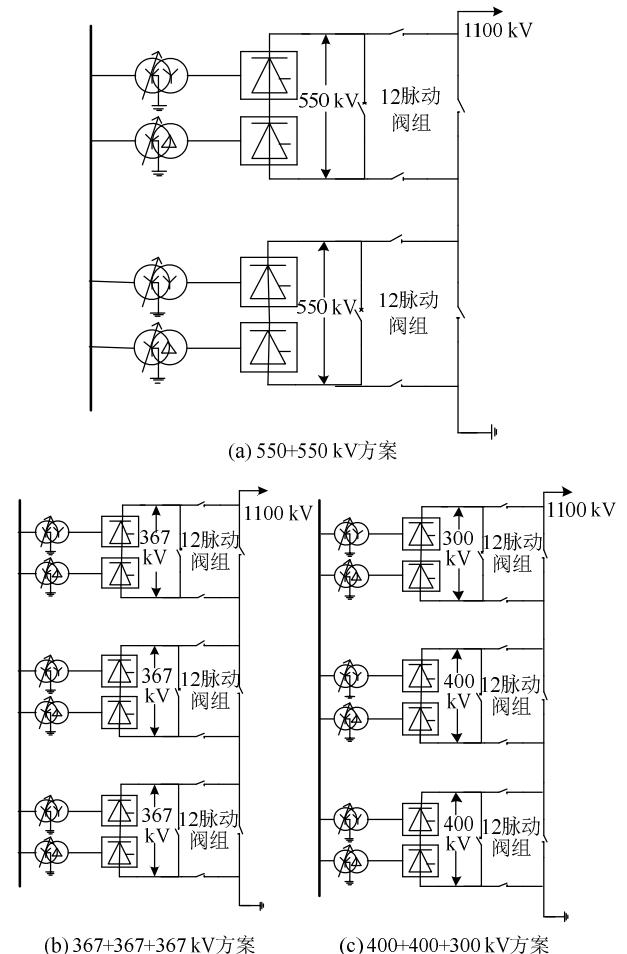


图 3 12 脉动换流器串联方案

Fig. 3 12-pulse converters series mode

由于 3 个 12 脉动换流器电压不等，备品备件不通用，设备端子间参数也不同，相比方案 2，其设备制造和运行方式更加复杂。

2.2 各主接线方案技术参数比较

交流系统主要技术参数如表 2 所示。

方案	12脉动组合	换流器	受端交流 电网电压/kV
方案1	2×550 kV	高端12脉动换流器 低端12脉动换流器	500 1000
方案2	3×367 kV	高端12脉动换流器 中端12脉动换流器 低端12脉动换流器	500 500 1000
方案3	2×400+300 kV	高端12脉动换流器 中端12脉动换流器 低端12脉动换流器	500 500 1000

交流系统	极端最	最低	正常	最高	最高	标称	
	低稳态	稳态	稳态	稳态	极端	稳态	
	电压/ kV	电压/ kV	电压/ kV	电压/ kV	电压/ kV	频率/ Hz	
昌吉站	750 kV	713	750	775	800	800	50±0.2
古泉站	500 kV	475	490	510	525	550	50±0.1
	1000 kV	950	1000	1050	1070	1100	50±0.1

根据主回路计算结果，直流系统分别接入 500、750 和 1000 kV 交流电网时，换流变压器的制造能力、运输限制、分接开关步长和阻抗初步确定如表 3 所示。

换流变 性能	分接头 调节步 长/%	额定分接 头时的阻 抗/%	相对感性 压降最大 误差/%	运输 方式	分接开关 总档位
接入 750 kV	0.86	20	±1.0	铁路或现场 组装	30
接入 500 kV	1.25	22	±1.1	公路+水路	30
接入 1000 kV	0.65	22	±1.1	公路+水路	30

2.2.1 各方案主回路参数

2.2.1.1 方案 1(双 12 脉动(2×550 kV)串联)

双 12 脉动换流器串联方式下主回路参数如表 4 所示。根据主回路计算结果，可以得到送受端换流变压器技术参数如表 8 所示。

2.2.1.2 方案 2(三 12 脉动(3×367 kV)串联)

三 12 脉动换流器串联方式下主回路参数如表 5 所示。

根据主回路计算结果，可以得到送受端换流变

理想空载 直流电压	昌吉站 接入 750 kV	古泉站高端 接入 500 kV	古泉站低端 接入 1000 kV
U_{di0N}	319.04	308.33	308.33
U_{di0min}	287.97	288.53	288.53
U_{di0max}	321.13	318.89	318.89
$U_{di0maxOLTC}$	321.13	312.45	312.45
U_{di0G}	321.13	313.11	315.89
U_{di0L}	325.25	318.89	318.89
$U_{di0absmax}$	328.50	322.08	322.08

注： U_{di0N} 为额定空载直流电压； U_{di0min} 为最小空载直流电压； U_{di0max} 为最大空载直流电压； $U_{di0maxOLTC}$ 为用于分接头计算的最大空载直流电压； U_{di0G} 为分接头正常调节以增大 U_{di0} 的下限电压； U_{di0L} 为分接头正常调节以增大 U_{di0} 的上限电压； $U_{di0absmax}$ 为绝对最大空载直流电压。

理想空载 直流电压	昌吉站 接入 750 kV	古泉站高端和中端 接入 500 kV	古泉站低端 接入 1000 kV
U_{di0N}	213.0	201.1	201.1
U_{di0min}	192.8	183.3	183.3
U_{di0max}	213.9	204.7	204.7
$U_{di0maxOLTC}$	213.9	204.7	204.7
U_{di0G}	213.9	200.9	202.7
U_{di0L}	216.6	204.7	204.7
$U_{di0absmax}$	219.0	207.0	207.0

器技术参数如表 9 所示。

2.2.1.3 方案 3(三 12 脉动(2×400+300 kV)串联)

三 12 脉动换流器串联方式下主回路参数如表 6 和表 7 所示。

理想空载 直流电压	昌吉站高端 接入 750 kV	昌吉站中端 接入 750 kV	昌吉站低端 接入 750 kV
U_{di0N}	174.1	231.9	231.9
U_{di0min}	157.6	210.0	210.0
U_{di0max}	174.8	232.9	232.9
$U_{di0maxOLTC}$	174.8	232.9	232.9
U_{di0G}	174.8	232.9	232.9
U_{di0L}	177.0	235.9	235.9
$U_{di0absmax}$	179.0	239.0	239.0

理想空载 直流电压	古泉站低端 接入 1000 kV	古泉站中端 接入 500 kV	古泉站高端 接入 500 kV
U_{di0N}	218.3	218.3	163.8
U_{di0min}	198.1	198.1	148.5
U_{di0max}	222.4	222.4	166.8
$U_{di0maxOLTC}$	222.4	222.4	166.8
U_{di0G}	220.3	220.3	163.7
U_{di0L}	222.4	222.4	166.8
$U_{di0absmax}$	225.0	225.0	169.0

根据主回路计算结果,可以得到送受端换流变压器技术参数如表10和表11所示。

2.2.2 换流变压器技术参数

换流变是直流输电工程中最重要的主设备之一,其成本占整个工程的1/5多,其技术参数、设计制造运输、绝缘水平是影响直流工程建设的最重要的因素。因此分析每种主接线对应的换流变的技术参数、绝缘水平,以及由此导致的设计制造成本、运输成本、备品备件、安全可靠性等对主接线的选

择具有重要作用。表9—11是3种备选主接线方案对应的换流变压器主要技术参数。对于送端换流变,交流侧都接入750 kV电网;对受端换流变,为减小制造难度,高端和中端换流变都接入500 kV电网,低端换流变接入1000 kV交流电网。因此,比较重点是阀侧参数和容量。

从表8—11可以看出,对于双12脉动串联接线方案来说,由于只有2个12脉动换流器,每个换流变的阀侧电压和容量都明显高于3个12脉动

表8 双12脉动串联主接线模式下换流变压器参数(2×550 kV)
Tab. 8 Transformer parameters of double 12-pulse converters series mode (2×550 kV)

项目	单位	送端接入750 kV高低端换流变			受端接入500 kV 高端换流变			受端接入1000 kV 低端换流变		
		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组	
换流变压器绕组型式		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
额定相电压(分接头为0)	kVrms	447.5	136.4	236.2	294.4	131.8	228.3	606.2	131.8	228.3
最大稳态相电压	kVrms	461.9	140.6	243.6	303.1	138.1	239.2	617.8	138.1	239.2
额定容量	MVA	607.5	607.5	607.5	587.1	587.1	587.1	587.1	587.1	587.1
无冷却设备投入,分接头在0时的电流	Arms	1 357.6	4 453.6	2 571.3	1 993.8	4 453.6	2 571.3	968.4	4 453.6	2 571.3
分接头档位数		+25/-5			+25/-5			+20/-10		

表9 三12脉动串联主接线模式下换流变压器参数(3×367 kV)
Tab. 9 Transformer parameters of triple 12-pulse converters series mode (3×367 kV)

项目	单位	送端接入750 kV高中低端换流变			受端接入500 kV 高中端换流变			受端接入1000 kV 低端换流变		
		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组	
换流变压器绕组型式		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
额定相电压(分接头为0)	kVrms	447.5	91.06	157.72	294.4	85.97	148.91	606.2	85.97	148.91
最大稳态相电压	kVrms	461.9	93.57	162.17	303.1	88.47	153.28	617.8	88.47	153.28
额定容量	MVA	405.55	405.55	405.55	382.89	382.89	382.89	382.89	382.89	382.89
无冷却设备投入,分接头在0时的电流	Arms	910	4 453.6	2 571.3	1300	4 453.6	2 571.3	630	4 453.6	2 571.3
分接头档位数		+25/-5			+25/-5			+20/-10		

表10 三12脉动串联主接线模式下送端换流变压器参数(400+400+300 kV)
Tab. 10 Sending side transformer parameters of triple 12-pulse converters series mode (400+400+300 kV)

项目	单位	送端接入750 kV 高端换流变			送端接入750 kV 中端换流变			送端接入750 kV 低端换流变		
		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组	
换流变压器绕组型式		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
额定相电压(分接头为0)	kVrms	447.5	74.43	128.92	447.5	99.14	171.72	447.5	99.14	171.72
最大稳态相电压	kVrms	461.9	76.53	132.55	461.9	102.17	176.97	461.9	102.17	176.97
额定容量	MVA	331.48	331.48	331.48	441.53	441.53	441.53	441.53	441.53	441.53
无冷却设备投入,分接头在0时的电流	Arms	740	4 453.6	2 571.3	990	4 453.6	2 571.3	990	4 453.6	2 571.3
分接头档位数		+25/-5			+25/-5			+25/-5		

表11 三12脉动串联主接线模式下受端换流变压器参数(400+400+300 kV)
Tab. 11 Receiving side transformer parameters of triple 12-pulse converters series mode (400+400+300 kV)

项目	单位	受端接入500 kV 高端换流变			受端接入500 kV 中端换流变			受端接入1000 kV 低端换流变		
		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组		网侧绕组	阀侧绕组	
换流变压器绕组型式		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
额定相电压(分接头为0)	kVrms	294.4	70	121.29	294.4	93.33	161.65	606.2	93.33	161.65
最大稳态相电压	kVrms	303.1	72.25	125.14	303.1	96.2	166.61	617.8	96.2	166.61
额定容量	MVA	311.87	311.87	311.87	415.64	415.64	415.64	415.64	415.64	415.64
无冷却设备投入,分接头在0时的电流	Arms	1060	4 453.6	2 571.3	1412	4 453.6	2 571.3	690	4 453.6	2 571.3
分接头档位数		+25/-5			+25/-5			+19/-11		

串联主接线。其中送端阀侧电压最多高 83%，受端接入 500 kV 电网阀侧电压最多高 88%；受端接入 1000 kV 侧阀侧电压最多高 53%。送端换流变容量大 83%；受端换流变容量大 88%。可以看出从制造和运输难度来看，双 12 脉动主接线比三 12 脉动接线要大很多，但运行维护备品备件其他方面和技术经济性都优于三 12 脉动主接线方案。

换流器接线方式及主回路参数的变化，影响着换流变压器交直流侧的绝缘水平，从而影响换流变的尺寸、造价以及运输等一系列问题^[10-11]。3 种方案高端换流变压器网、阀侧绝缘水平如表 12—14

表 12 双 12 脉动串联主接线模式下换流变压器绝缘水平 (2×550 kV)

Tab. 12 Transformer insulation level of double 12-pulse converters series mode (2×550 kV)

冲击类型	端	送端高端换流变			受端高端换流变		
		网侧		阀侧	网侧		阀侧
		750 kV 绕组/kV	Y/Y0	Y D	500 kV 绕组/kV	Y/Y0	Y D
雷电全波 LI	端 1	1950	2300	1980	1550	2300	1930
	端 2	185	—	—	185	—	—
操作波 SI	端 1	1550	—	—	1175	—	—
	端 2	—	—	—	—	—	—
	端 1+端 2	—	2100	1840	—	2100	1785

表 13 三 12 脉动串联主接线模式下换流变压器绝缘水平 (3×367 kV)

Tab. 13 Transformer insulation level of triple 12-pulse converters series mode (3×367 kV)

冲击类型	端	送端高端换流变			受端高端换流变		
		网侧绕组/kV		阀侧绕组/kV	网侧绕组/kV		阀侧绕组/kV
		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
雷电全波 LI	端 1	1950	2450	2300	1550	2450	2300
	端 2	185	—	—	185	—	—
操作波 SI	端 1	1550	—	—	1175	—	—
	端 2	—	—	—	—	—	—
	端 1+端 2	—	2200	2025	—	2200	2025

表 14 三 12 脉动串联主接线模式下换流变压器绝缘水平 (400+400+300 kV)

Tab. 14 Transformer insulation level of triple 12-pulse converters series mode (400+400+300 kV)

冲击类型	端	送端高端换流变			受端高端换流变		
		网侧绕组/kV		阀侧绕组/kV	网侧绕组/kV		阀侧绕组/kV
		Y/Y0	Y	D	Y/Y0	Y	D
雷电全波 LI	端 1	1950	2500	2350	1550	2500	2350
	端 2	185	—	—	185	—	—
操作波 SI	端 1	1550	—	—	1175	—	—
	端 2	—	—	—	—	—	—
	端 1+端 2	—	2250	2050	—	2250	2050

注：端 1 和端 2 分别表示换流变网侧和阀侧 2 个出线端子各自的对地电压；对于网侧，端 1 指高压端子，端 2 指中性点端子；对于阀侧，端 1 和端 2 指阀侧 2 个端子；端 1+端 2 表示将 2 个出线端子连接在一起。

所示。可以看到，双 12 脉动主接线的最高端换流变的阀侧绕组的绝缘水平要明显低于三 12 脉动接线方案，尤其对于操作电压高于 2000 kV 后，很小的电压增加都会导致绝缘设计难度、体积、成本的大幅增加，因此从绝缘水平来看，双 12 脉动串联要明显优于三 12 脉动串联方案。

3 工程实例分析

以我国首条±1100 kV 特高压直流输电示范工程为研究对象，详细分析了第 2 节中所列写的各直流主接线技术方案的优缺点，并利用分层加权得分法进行评估。

3.1 权重系数选取

权重系数按影响大小分为 3 个等级：对新建直流工程来说，换流站的建设成本是影响决策和技术经济性最重要的因素，直接决定了工程的可行性，因此选择其权重系数最高，为 0.3；当工程立项后，设备成本和安全可靠性成为最重要的考虑因素，因此权重系数选择为 0.2；对于其他因素，可以通过采取技术措施加以解决，因此其权重系数设定为 0.1。

1) 对系统可靠性的影响。

3 种方案可靠性计算结果如表 15 所示。从发生故障的概率来看，由于方案 1 中换流变压器数量最少，每极只有 12 台，因此这种方案的故障率较小，可靠性较高，但一旦一台换流变压器故障停运 1 个 12 脉动换流器，损失的功率大，对应的损失电量也大，因此从能量可用率角度来看，此方案不及方案 2 和 3。

表 15 各方案可靠性比较

Tab. 15 Reliability comparison between different schemes

接线方案	换流变故障率/ (次/a)	控制保护故障率/ (次/a)	损失电量/ (GW·h/a)
方案 1	1.26	0.60	544.4
方案 2	1.50	0.75	463.5
方案 3	1.56	0.75	485.5

从控制保护系统角度来说，由于方案 2 和 3 换流器接线采用 3 个 12 脉动换流器串联，比方案 1 换流器接线的 2 个 12 脉动换流器串联方案多了一个阀控单元，因此故障率较高。

2) 对直流控制保护系统复杂程度的影响。

方案 1 双 12 脉动接线型式控制保护系统较为成熟，运行方式相对较少，因此控制保护系统较为简单，运行方式之间的转化相对简单；方案 2 和 3 采用三 12 脉动串联型式，运行方式成倍增加，直流系统控制保护相对复杂。

3) 对交流系统功率损失的影响。

换流器接线方案 1 中，任一换流器故障，损失的功率为 3000 MW；方案 2 中，任一换流器故障，

损失的最大功率为 2000 MW；方案 3 中，任一换流器故障，损失的最大功率为 2182 MW。与单极闭锁 6000 MW 功率相比，系统可以承受单换流器故障导致的功率缺额，3 种方案均可行。

4) 对设备制造成本的影响。

根据换流变参数及网侧阀侧的绝缘水平，可知方案 1 的换流变压器制造难度相对较大，而方案 2 和 3 相对较小，且方案 3 可以采用已有成熟的 ±400 kV 和 ±800 kV 换流变压器设计和制造方案。从换流阀制造成本讲，方案 1 所需要的阀塔总数小

于方案 2 和 3。随着绝缘水平的提高，换流阀的设计与制造难度提升的较小，利用晶闸管串联较易实现，因此方案 1 相对方案 2 和 3 有较大的优势。由于方案 1 所需要的总体设备数目较方案 2 和 3 少，在备品备件的成本上，方案 1 要优于方案 2 和 3。不同接线型式影响着换流变的尺寸，3 种方案对换流变运输的影响如表 16 所示。对于受端分层接入 1000 kV 和 500 kV 交流系统，方案 2 和 3 都有 3 个独立的 12 脉动滤波器组，滤波器配置总容量稍大于方案 1。

表 16 对设备运输的影响
Tab. 16 Impact on equipment transport

方案	铁路运输送端 换流变造价	铁路运输送端 运输总费用	水路运输送端 换流变造价	水路运输送端 运输总费用	受端换流 变造价	受端运输 总费用	送端铁路运输两端 换流变到场总费用	送端水路运输两端 换流变到场总费用
方案 1	212 499	25 281	206 654	19 491	206 654	7 512	451 946	440 311
方案 2	288 442	34 045	282 051	28 132	282 051	9 757	614 295	601 991
方案 3	303 240	34 079	295 330	27 922	295 330	10 051	642 700	628 633

5) 对换流站建设成本的影响。

方案 1 可采用传统的双极双阀厅建设模式，而方案 2 和 3 则需采用双极三阀厅建设模式，建筑物数量和换流变广场设计尺寸都将大幅增加，方案 2 和 3 的建筑物费用将是方案 1 的 1.3 倍。由于方案 2 和 3 采用三阀厅建设模式，直流场主接线将变得更为复杂。为提升交流系统受入电能的能力，同时降低设备绝缘水平，方案 2 和 3 采用分层接入方案时，需要将低端单独接入 1000 kV 交流电网，高端和中端接入 500 kV 交流电网，造成分层接入的方式也更为复杂。而方案 1 仅需要将低端接入 1000 kV 交流电网，接入方式较方案 2 和 3 简单。

6) 对直流系统运行的影响。

我国目前投运的特高压直流输电工程全部采用方案 1 的双换流器串联接线，已具有成熟运行经

验，运行人员对各种运行方式较为熟悉，人员的培训成本将大幅降低。对于方案 3，采用在传统 ±800 kV 特高压工程的基础上直接加建 ±300 kV 高端阀厅的方式，±800 kV 特高压运行经验将有利于掌握方案 3 的各种运行工况。方案 2 采用全新的电压等级划分方案，没有运行经验。从运行的灵活性考虑，方案 2 和 3 的运行方式较多，可以通过更多的运行方式来适应不同运行工况。

3.2 综合评分

本文采用百分制进行评价，将每项指标划分为 3 个等级(最好 100 分，较好 80 分，一般 60 分)，底层权重系数根据其在直流工程中的重要程度加以区分。各方案的得分如表 17 所示。

从表 17 可以看出，方案 1 的主接线技术方案综合评分最高，评估结果为“较好”；方案 2、3 的

表 17 各影响因素综合评价
Tab. 17 Comprehensive score of influencing factors

上层影响因素	上层权重系数	底层影响因素	底层权重系数	方案 1	方案 2	方案 3
对系统可靠性的影响	0.2	故障概率	0.5	100	60	60
		故障电量损失	0.5	60	80	80
控制保护系统复杂程度	0.1	控制保护系统复杂程度	1	100	60	60
对交流系统的影响	0.1	对交流系统的影响	1	60	100	80
对设备制造成本的影响	0.2	换流阀制造成本	0.3	100	60	80
		换流变制造成本	0.3	60	80	100
		备用备件成本	0.2	100	60	60
		大件运输成本	0.2	80	60	60
对换流站建设成本的影响	0.3	阀厅/换流变广场建设成本	0.4	100	60	60
		直流场接线的复杂程度	0.2	100	60	60
		交流侧分层接入复杂度	0.4	100	80	80
对直流系统运行的影响	0.1	运行方式的灵活性	0.6	80	100	60
		运行经验	0.4	60	60	100
总分值				86	72	71.6

评估结果低于 80 分, 评估结果为“一般”。由此可见, 方案 1 明显优于其他方案, 可推荐为±1100 kV 特高压直流工程主接线, 最终确定的主接线简图如图 4 所示。

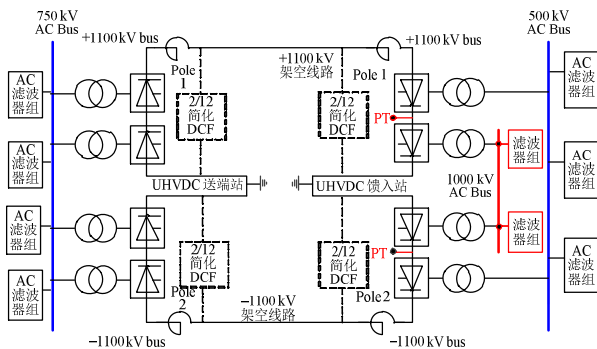


图 4 昌吉—古泉±1100 kV 直流主接线技术方案
Fig. 4 DC main topology of Changji-Guquan ±1100 kV project

4 结论

换流器主接线技术方案作为直流系统研究的基础, 直接影响工程可靠性、设备造价、工程实施难度等诸多方面。本文基于±800 kV 工程的设计运行经验, 提出了 1 种双 12 脉动串联和 2 种三 12 脉动串联的换流器主接线方案, 详细分析了 3 种主接线方式对主回路参数、绝缘水平、换流变压器等主设备技术参数、大件运输难度、建设成本、运行维护复杂性等因素的影响。建立了换流器主接线型式影响因素表, 并确定了各因素的权重因子。利用分层加权得分法, 获得了不同主接线的综合评分。根据评价结果, 推荐±1100 kV 特高压直流工程采用双 12 脉动等压串联的主接线方式, 并在昌吉—古泉 1100 kV 特高压直流示范工程中应用。

参考文献

- [1] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实践[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
Shu Yinbiao. Development and practice of China UHV Transmission [J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8(in Chinese).
- [2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [4] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力系统自

动化, 2005, 29(24): 5-6.

- Li Licheng. The technology and engineering application of ultra HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 5-6(in Chinese).
- [5] 任震, 武娟. 高压直流输电可靠性评估的等效模型[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 38-41.
Ren Zhen, Wu Juan. Equivalent model for HVDC reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 38-41(in Chinese).
 - [6] 刘哲, 贾宏杰, 徐弢, 等. 基于 N-k 风险的风储系统接入及容量配置研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 888-894.
Liu Zhe, Jia Hongjie, Xu Tao, et al. Study on N-k risk based grid-connection and capacity allocation of wind farm and energy storage system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 888-894(in Chinese).
 - [7] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6(in Chinese).
 - [8] 丁荣军, 刘国友. ±1100 kV 特高压直流输电用 6 英寸晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5180-5187.
Ding Rongjun, Liu Guoyou. Optimization design of 6-inch thyristor for ±1100 kV UHVDC transmission application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5180-5187(in Chinese).
 - [9] 刘国友, 黄建伟, 舒丽辉, 等. 6 英寸高压晶闸管的研制[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 90-92.
Liu Guoyou, Huang Jiawei, Shu Lihui, et al. Development of 6-inch power voltage thyristor[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 90-92(in Chinese).
 - [10] 常浩, 樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及国产化[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 5-9.
Chang Hao, Fan Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 5-9(in Chinese).
 - [11] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
Wang Feng, Xu Zheng, Huang Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140(in Chinese).



刘泽洪

收稿日期: 2017-07-21。

作者简介:

刘泽洪(1961), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作, E-mail: zehong-liu@sgcc.com.cn;

乐波(1976), 男, 博士, 通信作者, 教授级高级工程师, 从事直流输电工程研究工作, E-mail: yuebo@chinasperi.sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)