

水电送端特高压直流换流站无功配置优化研究

丁 剑,王海林,胡 浩,李文帆,李 彬

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要: 中国地域广阔且一次能源分布不均衡,水电通过特高压直流远距离送电至负荷中心是解决西南地区水电富余和减少弃水的重要途径。所述工程为建设在水电富集地区的 ± 800 kV特高压直流换流站,额定送电容量高达10 GW,初期换流站短路容量和短路比较小,随着配套大型水电投产,远期又存在短路电流超标等问题。换流站的无功配置需保证在初期和远期均满足相关规程和安全运行需要,同时要考虑站址场地限制问题。针对上述问题,采用远近结合、统筹考虑的方法,对换流站无功配置优化等方面进行了深入研究,总结出了具有一定参考价值的成果。

关键词: 高压直流输电;无功补偿;短路电流;电压波动;同步调相机

Abstract: China is vast in areas and has unbalanced distribution of primary energy. The hydroelectric power should be sent to load center through long - distance UHVDC transmission, and it is the important way to solve the rich hydroelectric power and reduce water discharge. The described project is a ± 800 kV UHVDC converter station at hydropower sending - end in South-west China. The rated transmission capacity is up to 10 GW. In the initial stage the short - circuit capacity at AC side is inadequate and after the large - scale hydropower station being put into operation, the short - circuit current will exceed the standard. It must be ensured that the relevant procedures and safe operation in the short term and long term are both fulfilled. The site restriction should also be considered. Aiming at the above issues, intensive studies are carried out in areas of reactive power compensation and optimal configuration by using the method of combination of far and near, overall considerations. The results of a certain reference value are summarized.

Key words: HVDC transmission; reactive power compensation; short - circuit current; voltage fluctuation; synchronous compensator

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)03 - 0039 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.009

0 引言

中国西南地区由于资源禀赋特点,电源装机中水电装机比重大。由于近年来四川水电开发力度加大,而电网外送通道建设相对滞后,窝电及弃水问题日益严重,矛盾突出。“十三五”期随着水电进一步的开发建设,特别是2020年左右雅砻江中游等大型水电逐步建成投产,预计四川丰期新增的富余水电规模超过12 GW,迫切需要新建大规模外送通道。高压直流输电系统通常应用于远距离跨区域送电和区域间联网^[1-4], ± 800 kV雅中特高压直流输变电工程额定送电容量为10 GW,主要依托雅砻江中游梯级水电及甘南和凉山中小水电送电。为尽早满足四川富余水电送出,直流工程计划于2018年左右投产。相关配套电源建设进度见表1。

为便于汇集相关水电,雅中送端换流站选址在盐源县。目前,川西南区域已形成乡城—水洛—木里—月城2回500 kV水电送出通道,构成一种链式电网结构。根据四川电网规划,2018年前建成盐源输电变电工程,2020年前建设布拖输电变电工程。直流投产前,送端近区电网情况见图1。

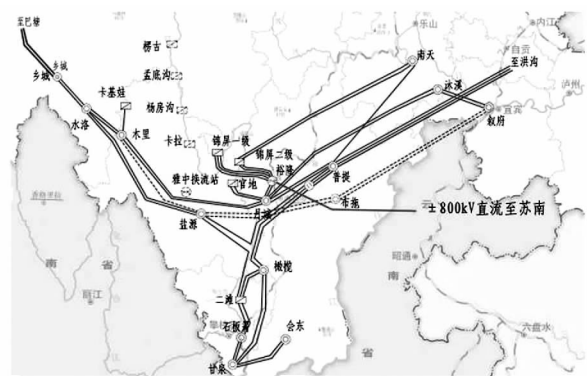


图1 直流送端近区电网情况

表1 雅中直流送端相关水电投产进度

项目及时序	电站(汇集站)名称	额定容量/MW	2018年	2020年	2025年
直流工程送端相关水电	(合计)	15 051	4 091	7 288	12 883
	楞古	2 575			2 575
	孟底沟	2 400			2 400
其中:1. 雅砻江中游水电	杨房沟	1 500		1 500	1 500
	卡拉	1 020		1 020	1 020
	(小计)	7 495	0	2 520	7 495
2. 甘南和凉山中小水电	乡城 500 kV 变电站	2 274	902	1 004	1 260
	水洛 500 kV 变电站	2 505	984	1 408	1 659
	木里 500 kV 变电站	1 770	1 199	1 350	1 462
	盐源 500 kV 变电站	314	314	314	314
	上通坝和卡基娃电站	692	692	692	692
	(小计)	7556	4 091	4 768	5 388

由于本工程 2018 年投产初期,雅砻江中游梯级大型水电均未投产,只能通过该地区中小水电满足初期直流运行和送电要求;加之此时网架较薄弱,换流站交流侧初期短路容量较小,对直流换流站的支撑较弱,电压波动较大,接入系统方案及无功配置均需统筹考虑直流送端支撑的需要。2020 年及以后随着雅砻江中游梯级大型水电的投产和电网的发展完善,远期换流站交流侧短路电流超标,需远近结合对接入系统方案局部进行必要的改接。针对雅中换流站投产初期和远期方案接线,对换流站的无功配置进行了详细研究。为尽量减少换流站占地,考虑按大小两种无功小组来进行容性无功配置。考虑到直流送端交流系统较弱,结合提高稳定水平和限制过电压的需要,在换流站加装同步调相机,从而对无功配置进行了进一步优化。感性无功配置方面,考虑了直流最小功率运行和初期调试等各种运行方式,并结合调相机进行了优化。通过详细研究及优化,提高了特高压直流工程的适应性和运行可靠性。

型电站则以 6 回 500 kV 线路连接。换流站在投产初期适当与川西电网保持多回连接,一方面可满足直流投产初期的送电要求;另一方面在直流投产初期可为换流站提供较为坚强的电网支撑,提高换流站的短路比。远期可通过采取恢复木里一月城 2 回 500 kV 线路等措施,有效避免换流站短路电流超过 63 kA 问题。经研究,该方案电网结构较合理,运行灵活性较好,稳定水平较高。

雅中换流站接入系统推荐方案见图 2 所示。

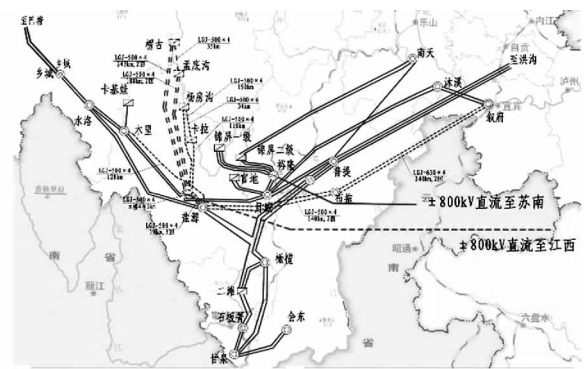


图2 雅中换流站接入系统方案

1 换流站接入系统方案

根据近区电网情况和直流汇集电源需要,结合四川西部水电输电走廊规划^[5],雅中换流站推荐接入系统方案初期以 3 回 500 kV 线路与盐源 500 kV 变电站相连,并将木里一月城 2 回 500 kV 线路就近双 π 接入雅中换流站;换流站与雅砻江中游 4 个大

2 雅中换流站无功配置研究

2.1 无功配置的原则和要求

HVDC 换流站的换流变压器和可控硅元件一方面需要消耗大量的无功,另一方面产生对电网有害的谐波,因此需要配置容性无功和滤波器。为满足

小运行方式下的无功平衡和电压控制需要,也需要配置感性无功。按相关规程要求,换流站近区无功应分层分区就地平衡,不考虑远距离输送。为确定容性无功补偿容量,应对直流系统正向全压额定运行方式下的换流站无功消耗进行计算;为确定感性无功补偿容量,对直流系统最小功率运行方式下的换流站无功消耗进行计算。直流过负荷所需额外增加的无功补偿容量由换流站备用补偿分组容量来平衡。

根据国内外直流工程经验,为了节省投资、提高运行可靠性,换流站容性无功补偿一般首选交流并联滤波器及电容器以满足技术要求。对于雅中换流站,容性无功补偿装置主要采用500 kV交流并联滤波器及电容器组,并考虑在站用变压器低压侧加装并联电容器;对于感性无功,根据500 kV线路长度加装线路高压电抗器,并在站用变压器低压侧装设并联电抗器以满足基本补偿要求。

结合送端网架较弱、最小短路比低的特点,为提供动态无功支撑,本工程雅中换流站交流侧推荐加装2×300 Mvar同步调相机。研究表明加装同步调相机后,一方面可有效提升换流站交流系统短路容量和短路比,改善直流运行条件;另一方面可抑制电压波动,减少容性无功小组数,节约占地和投资;此外,在直流故障条件下,可有效避免送端交流系统过电压超过相关标准。

2.2 换流站无功消耗计算

换流站的无功消耗容量与直流的输送功率、直流电压、直流电流、换相角以及换相电抗等因素有关。换流站无功消耗计算一般应计及多种不同的运行方式^[6]。根据相关公式,换流站额定运行方式、小功率运行方式下的无功消耗计算结果如表2、表3所示。

表2 换流站额定运行方式无功消耗

运行方式	直流功率 /MW	换流站无功消耗/Mvar	
		不考虑量测误差	考虑量测误差
双极额定运行方式	10 000	5 804	6 300

2.3 换流站容性无功补偿配置常规方式存在的问题

根据额定运行方式无功消耗结果并考虑备用后,换流站容性无功配置应达到6 500~6 700 Mvar。关于分组容量,按照电力系统设计规程的规定以及直流系统设计经验,要求当滤波器或并联电容器分

组投切时,送端换流站交流母线电压的工频分量的暂态变化最大值应不超过2%;稳态电压变化最大值不超过1.0%。切除整个无功大组,系统允许的交流母线暂态电压的波动一般不大于5%~6%,必要时可适当放宽。

表3 换流站小功率运行方式最小无功消耗
(考虑量测误差)

运行方式	直流功率 /MW	电压抽头	对应触发角 /($^{\circ}$)	无功消耗 /Mvar
双极 10%功率	1 000	+8	15.77	326
		0	28.97	584

根据换流站投切无功分组容量与换流站交流母线的暂态电压变化率之间存在的经验公式,可初步估算无功大、小组容量。经计算,最严重N-1方式下换流站交流侧短路容量约18 300 MVA,按照稳态电压波动为1.0%限值估算,对应的最小无功分组容量约为183 Mvar。但该估算结果仅作为参考,仍需以电压波动计算为准。经过对初期和远期换流站正常和各种N-1方式下的电压波动计算,考虑投切无功小组时稳态电压波动不超过标准限值。如果按常规算法,仅以短路容量最低的枯期最小运行方式计算^[7],不加装调相机时500 kV无功小组容量约200 Mvar,小组数量高达约33组,大组容量高达6组,无功占地面积较大。

2.4 容性无功补偿配置优化方法及仿真结果

本次换流站在常规无功配置的基础上,一方面采用较先进方法以小功率、中功率两种方式来确定不同的运行条件,考虑按大小两种无功小组进行无功配置;另一方面加装调相机并充分发挥其动态无功调节和抑制电压波动的作用,对无功规模进行进一步优化。

因枯小方式运行时间十分有限,且此时需投入运行的无功容量和组数相应也较少,而随着电源出力和直流输送功率的增加,电源对换流站支撑有所增强,短路容量提高,满足投切无功小组时稳态电压波动不超过标准限值的无功小组容量也将相应提高。结合配套电源特性进一步研究,可对部分无功小组容量按直流中功率(约50%额定功率)进行电压波动计算及配置^[8]。经计算,此时由于交流系统对换流站支撑有所增强,满足稳态电压波动不超标的500 kV无功小组容量约可提高至250 Mvar。因此,可按大小两种无功小组容量,不加装调相机时无

表4 换流站容性无功配置优化计算

项目	500 kV 无功 小组容量 /Mvar	500 kV 无功 小组数量	备注
1. 按经验公式估算的无功	183	—	该结果仅作为参考
2. 按枯小方式电压波动计算	200	33	34 × 200 Mvar
3. 按枯期小、中功率电压波动计算	200 ~ 250	28	16 × 200 Mvar + 12 × 250 Mvar 站用变压器低压侧加装电容 8 × 60 Mvar
4. 按枯期小、中功率电压波动计算 (加装 2 × 300 Mvar 调相机后)	300 ~ 350	20	12 × 300 Mvar + 8 × 350 Mvar 站用变压器低压侧加装电容 4 × 60 Mvar , 并预留 2 组电容位置

表5 换流站投切无功小组电压波动仿真结果

运行 方式	直流 功率 /MW	小组 容量 /Mvar	接线方式	电压 初值 U0 -	投一组				切一组			
					暂态电压波动		稳态电压波动		暂态电压波动		稳态电压波动	
					U0 +	ΔU	U	ΔU	U0 +	ΔU	U	ΔU
2018 枯小	1 000	300	电网全接线,调相机 N-1	1.007	1.023	1.56%	1.016	0.92%	0.992	-1.53%	1.001	-0.67%
2018 枯小	1000	300	雅中至月城 N-1,调相机 N-1	1.009	1.027	1.84%	1.019	0.99%	0.991	-1.79%	1.001	-0.75%
2025 枯小	1 000	300	电网全接线,调相机 N-1	1.014	1.029	1.50%	1.023	0.93%	0.999	-1.47%	1.008	-0.56%
2025 枯小	1 000	300	盐源至二滩 N-1,调相机 N-1	1.009	1.026	1.68%	1.019	0.99%	0.993	-1.62%	1.003	-0.58%
2025 枯小	3 700	300	电网全接线,调相机 N-1	1.007	1.022	1.57%	1.016	0.92%	0.991	-1.51%	1.001	-0.52%
2025 枯小	3700	350	盐源至二滩 N-1,调相机 N-1	1.004	1.021	1.75%	1.014	0.98%	0.987	-1.69%	0.998	-0.55%

功小组容量为 200 Mvar(直流小功率)和 250 Mvar(直流中功率);考虑站用变压器低压侧加装电容后,500 kV 容性无功小组数量降低至 28 组。

考虑换流站加装 2 × 300 Mvar 同步调相机,充分发挥调相机的动态无功调节作用之后,仍按稳态电压波动不大于 1.0%、无功按大小两种容量配置,则计算表明无功小组容量可以提高 300 Mvar(直流小功率)和 350 Mvar(直流中功率),同时考虑站用变压器低压侧加装电容后,500 kV 滤波器和电容的小组数减少到 20 组。从而进一步大幅度节约了占地和投资。容性无功优化计算的情况见表 4。

从减少换流站无功大组和小组的分组数、尽可能均衡各无功大组容量、有利于优化换流站布局等角度出发,推荐 500 kV 滤波器和容性无功共分 4 大组、20 小组,即 12 小组 300 Mvar 容性无功和 8 小组 350 Mvar 容性无功,每大组 5 小组,无功大组容量为 1 600 Mvar(经计算切除无功大组交流母线暂态电压的波动小于 6%)。此外,本期在换流站 2 台站用变压器低压侧共装设 4 × 60 Mvar 低压电容器(另为

为了提高适应性,规划再预留 2 组低压电容位置),本期容性无功总容量为 6 640 Mvar。

按推荐容性无功配置,进行了详细的仿真计算验证,结果表明无功配置满足规程要求。列举了几种严重方式下换流站投切无功小组电压波动仿真结果,见表 5。

2.5 感性无功补偿配置

雅中换流站与雅砻江中游电站相连的 500 kV 长线路均按要求装设高压电抗器,换流站感性无功平衡主要在此基础上对低压电抗进行配置。根据交流侧无功平衡及潮流计算结果,2025 年枯小全接线方式按雅中梯级电站均不进相运行控制,此时交流系统还有约 190 Mvar 容性无功流向换流站。在此基础上,直流双极输送最小功率时换流站自身的无功平衡结果见表 6 所示。计算中考虑设备制造公差及系统测量误差等因素,换流站无功小组(滤波器)单组容量按 300 Mvar 考虑,直流小方式时投入 2 组滤波器。此时如控制触发角在额定值 15°附近,结合交流侧无功平衡及潮流计算结果,共剩余容性无

功 464 Mvar 需要补偿。

因此,考虑在2台站用变压器低压侧共加装 $2 \times (4 \times 60)$ Mvar 可投切电抗器,从而对剩余容性无功完全补偿,并留有少量裕度。

表6 换流站感性无功平衡结果(直流小方式)

项目	无功 /Mvar	备注
1. 换流站无功消耗	326	触发角在 15°附近
2. 滤波器发出无功	600	投 2 组滤波器
3. 换流站剩余容性无功	274	滤波器发出无功减去换流站无功消耗
4. 交流侧剩余容性无功	190	根据枯小方式潮流计算结果
5. 总剩余容性无功(需换流站配置感性无功)	464	换流站剩余 + 交流侧剩余
6. 换流站感性无功补偿配置	8×60	站用变压器低压侧加装 $2 \times (4 \times 60)$ Mvar 电抗器, 满足无功平衡

为了进一步全面校验感性无功,考虑直流初期最为严重的单阀调试运行方式,即 1/2 单极大地回路或金属回路最小运行方式,此时换流站消耗无功功率为双极小功率的 1/4,所需感性无功较大。根据枯小方式无功平衡 2018 年换流站近区交流系统不能提供感性无功,且在枯小方式下仍有约 74 Mvar 容性无功需要平衡。在上述基础上,直流双极输送最小功率时换流站自身的无功平衡结果见表 7 所示。计算表明,如控制触发角在额定值 15°附近,在调试方式下仅消耗 81 Mvar 无功,考虑交流侧无功富余后,共剩余容性无功 593 Mvar 需要补偿。考虑到单阀调试运行方式是一种临时的特殊工作方式,为节省投资,减少不必要的浪费,建议本直流工程投产初期调试运行方式下的感性无功缺额通过调相机进相运行予以短时间的补充。因此建议换流站低压电抗器 8×60 Mvar 在本期一次建成,并考虑调相机进相约 113 Mvar,则基本能够满足调试方式下的感性无功平衡。

综上所述,结合近远期感性无功平衡结果,建议本期站用变压器低压侧共装设 $2 \times (4 \times 60)$ Mvar 电抗器。

2.6 换流站无功配置结果

根据系统研究结果,送端换流站本期无功配置方案见表 8。

表7 换流站感性无功平衡结果
(初期直流调试运行方式)

项目	无功 /Mvar	备注
1. 换流站无功消耗	81	触发角在 15°附近
2. 滤波器发出无功	600	投 2 组滤波器
3. 换流站剩余容性无功	519	滤波器发出无功减去换流站无功消耗
4. 交流侧剩余容性无功	74	根据枯小方式无功平衡结果
5. 总剩余容性无功(需换流站配置感性无功装置)	593	换流站剩余 + 交流侧剩余
6. 换流站感性无功补偿配置	8×60	站用变压器低压侧加装 $2 \times (4 \times 60)$ Mvar 电抗器
7. 调相机进相运行	113	调相机适当进相运行,感性无功出力 120 Mvar 左右,加上低抗后满足无功平衡

注: 1/2 单极大地回路或金属回路最小运行方式,送电 250 MW

表8 换流站无功配置小结

项目	参数
换流变压器短路阻抗	21%
直流最大无功消耗/Mvar	6 300
交流系统容性无功提供能力/Mvar	0
无功小组容量/Mvar	300、350
500 kV 无功小组数	20 组
站用变压器低压侧加装容性无功	本期 $2 \times (2 \times 60)$, 预留 2 组位置
无功总规模/Mvar	6 640
大组数	4 大组
大组 分组情况	3×300 Mvar + 2×350 Mvar
最大组容量/Mvar	1 600 Mvar
低压电抗器组/Mvar	$2 \times (4 \times 60)$
高压电抗器组/Mvar	换流站至卡拉 1 回、杨房沟 1 回、楞古 2 回、孟底沟 2 回出线均需预留装设线路高抗和中性点小电抗条件
调相机配置/Mvar	2×300

3 主要结论及建议

中国西南地区水电资源丰富但本地消纳能力有限,建设高压直流输电工程势在必行。由于直流送 (下转第 81 页)

式下保护安装处三序电流的幅值特性,并赋予了不同的权重系数:负序系统大于正序系数,零序系统最小。新的开放逻辑能使用各种不对称故障,具有较好的工程应用价值。

参考文献

[1] 张保会,张毅刚,刘海涛.基于本地量的振荡解列装置原理研究[J].中国电机工程学报,2001,21(12):67-72.

[2] 刘颖.一种适用于同杆四回线单相接地距离保护的新算法[J].水电能源科学,2014,32(9):195-198.

[3] 闫晓卿.特高压同步电网继电保护关键问题研究[D].北京:华北电力大学,2013.

[4] 张冬,王涛.基于RBF神经网络的超高压继电保护算法研究[J].现代电子技术,2011,34(20):196-199.

[5] 柳焕章,周泽昕,周春霞,等.继电保护振荡闭锁的改进措施[J].中国电机工程学报,2012,32(19):125-133.

(上接第43页)

端换流站距主网电气距离较远、短路比较低,为满足投切无功时的电压波动要求,导致单组容性无功容量限值较低,无功组数较多,增大了换流站场地占用和布置难度。经研究,一方面按枯期小功率、中功率两种运行方式进行电压波动计算,从而以两种不同的单组容量进行容性无功配置;另一方面通过加装同步调相机来提供动态无功支撑、抑制电压波动,进一步增大单组无功规模,从而有效减少了500 kV容性无功和滤波器的组数,大幅节约了换流站占地和投资。在感性无功配置研究方面,不但考虑了正常小方式下系统注入无功以及为了满足直流运行而投入滤波器的剩余容性无功,为增强适应性还进一步校核了直流在较严重的单阀调试运行情况下的感性无功平衡,调相机的进相运行在其中也起到了必要的作用,从而避免了感性无功规模的进一步扩大。通过上述相关系统研究,进一步优化了雅中特高压直流换流站无功配置,增强了工程的适应性和运行可靠性,对于四川、云南、西藏等地区后期新增的水电送端直流换流站,也具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 赵峻君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力

[6] 刘凯,索南加乐.一种新的高压线路保护振荡闭锁实现方法[J].电力自动化设备,2011,31(4):7-12.

[7] 袁兆强,吴强,易传炳.振荡闭锁期间不对称故障的快速识别方法[J].继电器,2007,35(8):6-11.

[8] 张艳霞,刘天绪,王荣琴.基于希尔伯特变换的电力系统振荡中再故障的识别方法[J].中国电机工程学报,2005,25(6):36-41.

[9] 刘志雄,张艳霞,冯康恒,等.基于广域信息跟踪电力系统振荡中心的方法及应用[J].电网技术,2014,38(6):1694-1699.

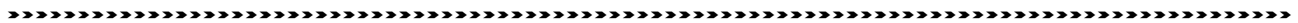
[10] 林湘宁,吴科成,翁汉珩,等.在功率变化交叉闭锁振荡中对称故障的快速识别方法[J].中国电机工程学报,2006,26(16):21-26.

[11] 黄少锋.电力系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,2014:98-102.

作者简介:

李鹏程(1988),工程师,主要从事配电维修工作。

(收稿日期:2017-01-08)



出版社,2004.

[2] 曾南超.高压直流输电在我国电网发展中的作用[J].高电压技术,2004,30(11):11-12.

[3] 刘振亚.特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年)[M].北京:中国电力出版社,2006.

[4] 伍文城,李新,丁君,等.云广±800 kV直流输电工程输电容量探讨[J].电力设备,2006,7(5):27-30.

[5] 胡浩,王海林,丁婧.四川省阿坝、甘孜两州新增水电送出规划研究[J].四川水力发电,2015,34(1):71-73.

[6] 罗敬华,汪娟娟,梁泽勇,等.溪洛渡同塔双回直流输电工程无功平衡与补偿方案[J].广东电力,2014,27(2):93-98.

[7] 王海林,黎岚,吴安平.向家坝±800 kV特高压换流站容性无功配置研究[J].四川电力技术,2008,31(3):9-11.

[8] 邹欣,蒋维勇,李亚男.±800 kV酒泉—湖南特高压直流工程无功补偿优化配置方案[J].电力设备,2015,36(9):43-49.

作者简介:

丁剑(1974),硕士、高级工程师,从事电力系统规划设计和研究工作。

(收稿日期:2017-01-07)