

提升金沙江二期特高压直流外输电举措

陈汉雄, 李晓明

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要: 为实现金沙江下游白鹤滩水电站电能东送区外电网负荷中心, 国网“十四五”期规划建设金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电工程。根据白鹤滩水电站水电出力特性、“十四五”期四川电网大量富余清洁能源可供外送的电力发展状况, 结合金沙江二期2回特高压直流输电工程本身的特点与优势等, 提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的电力举措: 丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行, 金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(丰水期季节性水电与平枯期新能源电量)。研究表明: 所提电力举措, 2025年丰水期可实现减少四川电网弃水约5000 GW·h, 同时亦可增加金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电线路年利用小时数约470 h。

关键词: 电力系统; 金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流; 白鹤滩水电站; 弃水电量; 新能源

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0056-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.011

Measures for Improving UHVDC Delivery Output in Second Phase of Jinsha River Project

Chen Hanxiong, Li Xiaoming

(Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, Sichuan, China)

Abstract: Double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission project in the second phase of Jinsha River project of State Grid are planned and constructed in the year of 2021~2025. According to the hydrologic output characteristics of Baihetan hydropower station and the substantial surplus of Sichuan green clear energy in the year of 2021~2025, and combined with the characteristics and advantages of double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission project in the second phase of Jinsha River project, the measures for improving UHVDC delivery output in the second phase of Jinsha River project are proposed. The research results show that: by taking the measures, the quantity of abandoning energy in high flow period of Sichuan power grid can be decreased about 5000 GW·h and the annual utilization hours of double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission lines in the second phase of Jinsha River project can be increased about 470 hours.

Key words: power system; double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission lines in the second phase of Jinsha River project; Baihetan hydropower station; abandoning energy; renewable energy

0 引言

2021—2023年地处金沙江下游白鹤滩水电站(装机总容量为16 GW)将规划建设投运,为实现白鹤滩水电站电能更大范围内实现资源优化配置,将同步配套规划建设金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电工程^[1](即金沙江二期特高压直流,直流额定容量均为8 GW)。

根据金沙江二期2回特高压直流输电工程本身的特点与优势、白鹤滩水电站出力特性、四川电网

“十四五”期大量富余清洁能源的电力发展状况以及丰水期调峰弃水问题等,借助金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电通道的送电能力并发挥白鹤滩水电站良好的调节性能,提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的电力举措:丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(丰水期季节性水电与平枯期新能源电量)。通过该优化电力举措,既实现减少四川电网丰期大量弃水电量;同时借助金沙江二期2回特高压直流输电平台,四川电网亦实现全年更多富余清洁能源

外送。从而提高金沙江二期2回±800 kV特高压直流输电线路利用小时数(提高其建设运行经济性)。

1 四川清洁能源(水电/新能源)规划及川电东输外送交直流电网

1.1 四川清洁能源(水电/新能源)规划

1.1.1 水电

四川作为全国重要清洁能源基地,“十三”期及以后,每年均规划建设有大量清洁能源(水电、风电、光伏电站)。根据四川电网全口径电源规划,到2025年四川全省水电装机总容量达到约为128.9 GW(其中包括金沙江二期白鹤滩水电站16 GW)。四川水电及水能资源主要集中在四川西部的甘孜、阿坝、凉山州境内的金沙江、雅砻江、大渡河等三大江流域。

四川现有及规划新建的各大中小型水电站所发电能,主要为兼顾满足四川省内与区外电网两个电力负荷需求市场,其中区外电网为重庆、华东、华中以及西北电网。

1.1.2 新能源

2025年四川全省初步规划风电总装机容量约11 GW(其中约85%风电集中在四川凉山州境内);太阳能光伏电站规模达到约为5 GW。

另截至2025年四川火电装机总容量达到16.6 GW。

1.2 川电外送交直流电网通道建设及规划

截止2018年,四川电网通过“4直+6交”的多回交直流输电线路与区外电网(重庆、华东、华中、华中、西北)实现电力交换,其中4回直流为3回±800 kV特高压直流工程(向家坝—上海、锦屏—苏南、溪洛渡左—浙西,丰水期外送电力总输电规模为21.6 GW)、1回德阳—宝鸡±500 kV直流工程(丰水期可实现最大送电规模为3GW);6回500 kV交流线路为2回黄岩—万县、2回资阳—思源、2回洪沟—板桥。“十三五”期该6回交流线路丰水期大方式下可实现最大外送电力为6 GW。

到2020年四川电网与区外电网交换的川电出口交直流输电线路在现有电网基础上发展为“5直”(增加1回雅中—江西±800 kV特高压直流,额定送电容量8 GW^[2]);到2025年,四川与区外电网实现电力交换的川电出口交直流输电线路增加至“7直+6交”(增加2回白鹤滩—区外电网2回±800 kV特高压直流,额定送电容量均为8 GW)。

2 白鹤滩水电站及金沙江二期特高压直流工程

2.1 白鹤滩水电站

白鹤滩水电站为金沙江下游四个水梯级——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝中的第二个梯级(其中乌东德、白鹤滩为金沙江二期水电站);白鹤滩水电站总装机容量为16 GW,电站具有年调节能力;电站左、右岸各8台单机容量1 GW机组,机组计划投产时间为2021年至2023年。白鹤滩水电站16 GW投产后按单独运行的情景考虑,水电出力特性如表1所示。

根据白鹤滩水电站出力特性:1)具有年调节性能的白鹤滩水电站调节性能优良;2)白鹤滩水电站平水年总发电量约61.11 TW·h,电站年利用小时数3818 h;枯水年总发电量约47.8 TW·h,电站年利用小时数2986 h。白鹤滩水电站年利用小时数相较于四川全口径水电机组近2年来的平均水平(约4240 h)还略低^[3-4]约400 h。

表1 白鹤滩水电站出力特性

月份	平水年出力/10 ⁴ kW			枯水年出力/10 ⁴ kW		
	预想	平均	强迫	预想	平均	强迫
1	1600	508	0	1592	465	0
2	1600	508	0	1600	423	0
3	1600	508	74	1494	465	69
4	1489	552	213	1326	465	202
5	1261	549	197	1220	423	191
6	1203	485	189	1240	508	191
7	1300	1123	198	1359	695	201
8	1438	1154	200	1535	601	205
9	1600	908	75	1600	807	75
10	1600	932	0	1600	672	0
11	1600	610	0	1600	508	0
12	1600	508	0	1600	508	0

2.2 金沙江二期特高压直流输电工程

作为金沙江二期水电站之一的白鹤滩水电站总装机容量巨大,为实现白鹤滩水电站电能在更大范围内实现资源优化配置,2021年左右川西南将同步配套规划建设金沙江二期2回(白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江)±800 kV特高压直流输电工程(即金沙

江二期特高压直流,直流额定容量均为8 GW)^[1]。该直流工程送端侧地处川西,受端均暂考虑为华东电网。

金沙江二期2回特高压直流工程目前功能定位为:全年输送电能,主要为对应金沙江二期白鹤滩水电站本身所发电量,其工程设计年(平水年)利用小时数约为3900 h,若枯水年工程利用小时数则更低约3000 h。

金沙江二期2回特高压直流(白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江)送端白鹤滩换流站侧接入四川电网的推荐方案为:两回直流送端换流站推荐采用布置在布拖县先锋站址的“一站”方案,布拖换流站分一、二期两步实施,其中一期为白鹤滩—江苏送端换流站(与500 kV布拖变电站合建),二期为白鹤滩—浙江送端换流站。金沙江二期2回特高压直流送端换流站侧接入四川电网的方案如图1所示。金沙江二期2回特高压直流送端侧换流站地处川西清洁能源富集汇集送地。



图1 金沙江二期特高压直流送端换流站接入系统方案

3 提升金沙江二期特高压直流外送电举措

3.1 四川电网丰水期弃水问题

3.1.1 现四川电网调峰弃水问题

根据电力规划,到2020/2025年底四川电网水电总装机将分别达到约80.46 GW/128.9 GW,整个“十三五”期间四川水电装机总量约占全省总装机的80%。一方面水电占四川电网比重大,但大部分水电站调节性能不理想;另一方面,四川电网日负荷峰谷差较大,日最小负荷率仅约为0.55。这种水电出力特性和四川电网负荷特性的较大不匹配,决定了整个丰水季节(主要是6—10月)四川电网始终存在较大的水电调峰弃水及四川电网运行经济性不

理想。此外,根据计算,未来随着四川电网“十三五”中后期一大批具有相当容量规模的新能源(太阳能与风电)上网,若四川调度仍维持现在优先消纳本省上网新能源,则丰水期四川全省的大量弃水电量问题将会进一步增加。

近几年四川调度通过一系列优化整个四川电网运行方式的举措,减少了部分四川电网丰期弃水问题,但丰期四川电网调峰弃水问题依然存在,且弃水电量的数值仍相当可观。2016、2017年四川电网实际全年弃水电量均高达约14.0 TW·h^[3];2018年四川电网全年弃水电量有所降低,但仍达到约12.2 TW·h。

3.1.2 2025年四川电网弃水电量

根据四川电网规划,2025年四川电网全口径的需电量和最高负荷需求预测分别达到350.0 TW·h和59 GW;2025年四川电网总电源规模(现有与规划水电、火电、新能源)达到约163.5 GW(其中包括金沙江二期白鹤滩水电站16 GW);2025年川电通过“7直+6交”的交直流外输通道总外送电规模达到54.6 GW。

四川电网是以水电为主、火电为辅、新能源为补充的混合电源结构系统。“十三五”期及以后,四川全网电源开机已充分兼顾考虑了多方面因素:1)合理与优先消纳四川的清洁能源(水电/风电/太阳能光伏)且同时避免丰水期较多的弃水弃能问题;2)满足四川省保安电源开机、电网运行安全的最小火电开机。

若金沙江二期2回特高压直流输送电量仅为对应送端侧白鹤滩水电站本身所发电量,不考虑白鹤滩水电站参与四川全网丰水期调峰运行(即无优化电力举措)此条件下2025年四川电网电量平衡计算结果如表2所示(其中包括金沙江二期2回特高压直流经济性的年利用小时数)。

2025年四川全网电力电量平衡计算结果表明:

1)四川全网2025年全网调峰弃水电量高达约41.0 TW·h;2)金沙江二期2回特高压直流的年利用小时数约为3900 h(平水年)。

3.1.3 金沙江二期2回特高压直流工程及相关电网条件特点分析

针对四川电网近年来一直存在的丰水期较大弃水电量问题,相关文献提出了降低四川电网丰水期弃水电量与提高川电外送电的优化电网运行措施方案^[5-7]。相较于文献[5-6]中所研究项目内容与

电网研究背景条件,作为金沙江二期2回特高压直流送端侧白鹤滩水电站,其“十四五”期规划建设更具自身特点,主要有:1)白鹤滩水电站总装机容量更大(总装机容量16GW)且全年水电站调节性能相对更优(年调节),但水电站本身年利用小时数相对不高(平水年3818h);2)金沙江二期2回特高压直流总输电容量大(16GW)且送端侧两换流站电气距离相对较近,作为白鹤滩水电站电力外送的配套电网工程年利用小时数(平水年约3900h)存在可提升空间;3)“十四五”期四川全网丰期弃水电

表2 2025年四川电网电量平衡计算

项目	无优化 电力举措 (6—10月)	电力举措	
		电力举措1 (6—10月) + 电力举措2 (11—5月)	电力举措1 (6—10月)
1. 系统需要电量 (本省负荷+外送) /(10 ⁸ kW·h)			
①负荷电量	3050	3050	3050
②外送电量	2563	2613	2638
2. 水电可发电量 (水电装机总量 128.9 GW) / (10 ⁸ kW·h)			
①水电发电量	5 061.4	5 111.4	5 111.4
②弃水电量	411.2	361.2	361.2
3. 风电发电量 (风电装机总量 11 GW) / (10 ⁸ kW·h)			
①风电发电量	200.5	200.5	222.6
4. 光伏发电量 (光电装机5 GW) /(10 ⁸ kW·h)			
①光伏发电量	60	60.0	63.0
5. 火电发电量 (火电装机 总量16.6 GW) /(10 ⁸ kW·h)			
①火电发电量	291.3	291.2	291.0
6. 电源全年利用 小时/h			
①水电	3927	3966	3966
②风电	1823	1823	2023
③光伏	1200	1200	1260
④火电	1755	1754	1753
7. 特高压直流工程 年利用小时/h			
①白鹤滩—江苏	3900	4212	4370
②白鹤滩—浙江	3900	4212	4370

量更为突出,经计算弃水电量更高达约41.12 TW·h(详见表2);4)“十四五”期四川全网规划新能源总量亦达到约16GW,新能源的电能消纳在省内市场趋于饱和。

3.2 增加金沙江二期特高压直流外送电的技术理论分析

1)一方面,从满足四川富余清洁能源外输角度分析考察。如前所述,若金沙江二期2回±800kV特高压直流输电工程功能定位仅为全年输送金沙江二期白鹤滩水电站本身所发电力电量,其全年直流工程年利用小时并不高(平水年利用小时约为3900h,枯水年工程利用小时则更低约3000h);但金沙江2回特高压直流输电工程送端侧换流站均处于整个川西南清洁能源(水电、风电、太阳能)富余送出通道电网节点上,而四川电网本身全年均有较多富余清洁能源没有被充分利用,四川全网2025年全年清洁能源(水电与新能源)均有不同程度的弃能(弃水、弃风、弃光)问题,具体为:2025年四川电网丰水期(6—10月)弃水电量高达约41 TW·h(如表2所示);2025年四川电网平枯水期(11月至次年5月)新能源电力所发电力电量不能充分消纳。

因此,在不增加川西南500kV主干电网通道建设投资条件下,可考虑把四川电网全年富余清洁能源就近经金沙江二期2回特高压直流输电平台实现外送,有效补充该2回特高压直流工程的全年外送清洁能源电量。显然,部分四川电网全年富余清洁能源借助金沙江二期2回特高压直流输电平台实现外送后,既减少四川电网丰期水电弃水并增加新能源平枯期电能消纳,同时亦对应增加金沙江二期2回特高压直流输电工程年利用小时数。

2)另一方面,从水电站水电调节性能与丰小调峰电网运行角度考察。如前所述,金沙江二期白鹤滩水电站具有年调节的优良水电调节性能(如表1所示),全年无论是丰水期(6—10月)还是平枯期(11月至次年2月)电站预想出力数值较大而电站平均出力数值不高,且预想出力与平均出力差值相对较大,均说明水电站在本身所发电力电量确定条件下有较好水电调节性能。

因此在丰水期为减少四川全网丰腰及丰小方式下较大调峰弃水电力电量,此时可考虑适当安排白鹤滩水电站部分水电机组(2~6台)参与全网丰腰、丰小调峰运行方式进行配合(具体为丰腰、丰小方

式部分水机组压出力或停机,但因电站本身理想水库调节性能,全天电站本身并不损失所发电量)。此时,送端换流站近区500 kV电网接纳川西南富余清洁电能再经金沙江二期直流输电平台实现外送。在平枯期,水电站本身所发电量相对更有限且川西南电网输送潮流较丰期明显降低,此时再接纳附近电网转送的富余新能源实现外输没有问题。

3.3 提升金沙江二期特高压直流外送电举措

充分利用四川电网规划建设金沙江二期2回特高压直流输电平台的强大送电能力以及白鹤滩电站良好的年调节性能,在保证电网安全稳定运行条件下,合理与适当补充接收四川电网富余清洁能源(包括丰水期季节性水电与平枯期新能源所发电量),具体电网运行的电力举措如下:

1) 电力举措1:丰水期(6—10月),白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台接收四川电网部分富余季节性水电(弃水电量),金沙江二期2回特高压直流均按照全天24h近直线满负荷送电。通过调整增加金沙江二期2回特高压直流在丰期外送电量,以部分减少“十四五”期及以后四川电网存在的季节性水电电能(弃水电量),从而亦增加了金沙江二期2回特高压直流工程的年利用小时数。

从表2可见,通过电力举措1,2025年四川电网丰水期弃水电量可减少约5000 GW·h,对应可增加金沙江二期2回特高压直流工程的年利用小时数约312 h。

2) 电力举措2:平枯水期(11月至次年5月),金沙江二期特高压直流输电平台接收四川电网部分富余新能源(风电场与太阳能光伏)所发电量,从而增加金沙江二期2回特高压直流在平枯期外送电量。

从表2可见,通过电力举措2,2025年四川电网平枯期可再增加新能源(风电场与太阳能光伏电站)外送电共约2500 GW·h,对应可再增加金沙江二期2回特高压直流工程的年利用小时数约158 h。

综上所述,若2025年四川电网全年电网运行方式下丰水期(6—10月)采取电力举措1,平枯水期(11月至次年5月)采取电力举措2,则全年可增加金沙江二期2回特高压直流工程的年利用小时数共约470 h,发挥工程的经济效益相当可观;同时亦有利于进一步减少四川弃水电量,在更大范围内实现资源优化配置。

4 川西南电网运行适应性分析

金沙江二期2回特高压直流送端侧两换流站地处四川西南的凉山州布拖县境内,两换流站与布拖站合建。送端侧两换流站接入四川交流系统方案为就近接入川西南500 kV电网,且均为整个川西南(凉山州、攀枝花、甘南)富余清洁能源外送四川500 kV主干电网的送电通道上(详见图1)。

鉴于整个川西南境内(包括凉山州、攀枝花、甘孜南部)本就为四川最主要清洁能源(大中型水电站、风电以及太阳能光伏)资源的富集地,为满足该地区电力送出的配套500 kV及以上交直流输电线路现已投运及规划建设项目较多。“十四五”期间川西南共有4回特高压直流项目(1回锦屏—苏南、1回雅中直流、2回金沙江二期直流)相继建成投运,川西南更多富余清洁能源大部分将直接通过该4回特高压直流项目外送华东电网,仅剩余部分富余电能通过川西南500 kV交流线路外送四川主干电网。

经电网潮流稳定计算校核,整个“十四五”期丰水季期间,川西南外送四川主干电网的丰大方式下的最大送电能力为电网安全稳定运行的控制方式。

1) 在满足电网安全稳定(热稳及暂稳)运行条件下,“十四五”期规划的川西南电网网架能够适应与满足丰水期白鹤滩电站调峰运行方式下的电网安全稳定运行条件。

2025年电网丰小调峰运行方式下,若考虑白鹤滩水电站安排6台机组停机以配合金沙江二期平台接纳更多富余季节性电能外输,即金沙江二期两特高压直流送端侧换流站需接纳川西南及近期电网富余清洁能源6 GW,此时,与白鹤滩左岸、右岸换流站一级、二级相连500 kV电网(近区电网接线方案示意图如图1所示)相关线路输送潮流分别约为:

①橄榄—布拖(白鹤滩左岸换流站)1回500 kV输送潮流约为690 MW;

②橄榄—普提1回500 kV输送潮流约为1130 MW;

③盐源—普提1回500 kV输送潮流约为1236 MW;

④月城—布拖(白鹤滩左岸换流站)2回500 kV输送潮流约为2×900 MW;

⑤普提—白鹤滩右岸换流站3回500 kV输送

(下转第66页)

[4] 皮志勇,李勇,吴继雄,等. 变电站顺序控制的管理及技术研究[J]. 科技创新导报, 2017(19): 13-15.

[5] 陈达文,李佳. 智能变电站顺序控制在站端的应用[J]. 中国新技术新产品, 2016(20): 29-30.

[6] 王雷,史金伟. IEC 104 规约中程序化控制的扩展应用[J]. 供用电, 2012, 29(4): 52-53.

[7] 李国杰. IEC104 协议在变电站系统的应用与测试[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32(1): 43-45.

[8] 高雪飞. 基于 104 规约的远动网络通信可靠性原理探讨[J]. 无线互联科技, 2016(19): 9-10.

[9] 郭国林. 基于网络通讯中信息安全的保障研究分析[J]. 中国新通信, 2017(6): 15-16.

作者简介:

邹沛恒(1985), 本科, 从事电力系统继电保护工作;
 代宇涵(1989), 硕士, 从事电力系统调度自动化技术工作。
 (收稿日期: 2019-05-28)

(上接第 60 页)

潮流约为 3×1000 MW;

⑥白鹤滩左岸电站—布拖(左岸换流站) 4 回 500 kV 输送潮流约为 4×1250 MW;

⑦白鹤滩右岸电站—右岸换流站 4 回 500 kV 输送潮流约为 4×1250 MW;

⑧普提—洪沟 3 回 500 kV 输送潮流约为 3×360 MW。

上述 500 kV 输电线路导线截面为 4×400 mm² / 4×500 mm² / 4×720 mm² (分别对应夏季热稳极限分别约为 2 GW/3 GW/3.9 GW)。因此,白鹤滩送端换流站丰小调峰运行方式下,近期西南电网完全可满足电网的热稳安全运行且有相当裕度。

2) 平枯水期随着水电出力的逐渐下降,整个川西南多回交直流外送通道输电容量整体亦随之降低,川西南外送输电能力裕度相对更大,因此平枯期部分增加新能源(风电与太阳能)所发电量不会增加送电通道的输电压力,其所发电能完全可就近接入川西南 220 kV 及以上主干电网逐级汇集升压后,再经金沙江二期的 2 回特高压直流输电平台外输区外电网。

总之,现有及规划川西南 500 kV 及以上交直流电网能适应丰期调峰运行及平枯期川西南更多富余清洁能源经 2 回金沙江二期直流输电平台外输区外电网。

5 结 语

上面根据金沙江二期 2 回特高压直流输电工程本身的特点与优势,结合白鹤滩水电站水电出力特性、“十四五”期新能源及四川电网电力规划发展状况等,提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的

电力举措:丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(季节性水电与新能源电量)。所提举措在既实现减少四川电网丰期大量弃水电量的同时,亦实现四川电网全年更多富余清洁能源外送,提高了金沙江二期 2 回 ± 800 kV 特高压直流输电线路利用小时数。通过计算表明 2025 年丰水期可实现减少四川电网弃水约 5000 GW·h,可增加金沙江二期 2 回 ± 800 kV 特高压直流输电线路年利用小时数约 470 h。

参考文献

[1] 国网经济技术研究院有限公司. 白鹤滩—江苏特高压直流输电工程预可行性研究[R]. 北京: 国网经济技术研究院有限公司, 2018.

[2] 国网四川省电力公司. 四川“十三五”电网发展规划总报告[R]. 成都: 国网四川省电力公司, 2015.

[3] 国网四川省电力公司. 2018 年四川电网运行方式[R]. 成都: 四川省电力公司, 2018.

[4] 国网四川省电力公司. 2019 年四川电网运行方式[R]. 成都: 四川省电力公司, 2019.

[5] 陈汉雄. 四川电网季节性电能外送曲线优化[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 144-150.

[6] 陈汉雄. 水风互补四川清洁能源外送优化[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 37-43.

[7] 陈汉雄. 四川电力发展对新能源建设规模影响分析[J]. 四川电力技术, 2018, 41(2): 46-50.

作者简介:

陈汉雄(1971), 硕士, 教授级高级工程师, 从事电力系统规划设计及直流输电系统控制研究工作;
 李晓明(1972), 高级工程师, 从事电网勘测设计。
 (收稿日期: 2019-05-24)