

# 向家坝±800 kV 特高压换流站容性无功配置研究

王海林, 黎 岚, 吴安平

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

**摘 要:**通过向家坝±800 kV 特高压直流换流站额定功率运行方式下最大容性无功消耗的计算, 换流站附近交流系统提供容性无功能力的分析, 换流站容性无功大组和小组分组容量的选择, 确定了向家坝特高压换流站容性无功配置方案。

**关键词:**特高压直流; 换流站; 无功消耗

**Abstract:** After calculating the maximum capacitive reactive power consumption of ±800 kV Xiangjiaba UHVDC Converter Station during the steady state condition, analyzing the capability of the AC system supplying the capacitive reactive power and proposing the banks and sub-banks of the converter station, the capacitive reactive power division scheme of Xiangjiaba UHVDC Converter Station is designed.

**Key words:** UHVDC; converter station; reactive power consumption

**中图分类号:** TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0009-03

直流换流站的换流阀组在换相过程中会消耗大量的容性无功, 其消耗容性无功大小与直流系统的输送容量、触发角等因素有关。一般情况下, 应在换流站安装容性无功补偿装置来补偿换流站运行时消耗的容性无功。

通过对向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程送端向家坝换流站额定功率方式下最大容性无功消耗的计算, 向家坝换流站附近 500 kV 交流系统提供容性无功能力的分析, 以及向家坝换流站容性无功大组和小组分组容量的选择, 最后确定了向家坝换流站共需配置的容性无功总规模及容性无功大组和小组的分组容量。

## 1 金沙江一期工程送端接入方案简介

金沙江一期工程向家坝、溪洛渡水电站装机容量分别为 6000(8×750)MW 和 12 600(18×700)MW, 考虑通过 3 回±800 kV 特高压直流工程送电华东电网和华中东部四省电网, 其中送华东电网 2 回, 送华中东部四省电网 1 回, 每回特高压直流送电规模均为 6 400 MW。

## 2 向家坝换流站无功消耗计算

直流换流站在换相过程会消耗大量的容性无功功率。换流站容性无功功率消耗的大小与直流送电

功率、直流电压、直流电流及换相角等设备额定值、运行参数等因素有关。对于一个 6 脉动整流侧换流器所消耗的容性无功功率可根据下面的公式计算(对于逆变器侧换流器, 应把  $\alpha$  换为  $\gamma$ ):

$$Q_{dc} = I_d \cdot U_{dio} \cdot \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{4(\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu))}$$

$$U_{dio} = \sqrt{2} \frac{3}{\pi} U_{vo}$$

$$\mu = \arccos(\cos \alpha - 2d_x \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{dio}}) - \alpha$$

式中:  $Q_{dc}$ ——换流器消耗的无功功率;

$I_d$ ——额定直流电流;

$U_{dio}$ ——每个 6 脉动阀组理想空载直流电压;

$d_x$ ——相对电感压降;

$\mu$ ——换相角;

$\alpha$ ——触发角;

$\gamma$ ——熄弧角。

为了给实际运行留有一定裕度, 换流站容性无功配置须按直流工程额定功率运行, 同时考虑各种设备公差和测量误差等因素后的最大容性无功消耗进行计算。

由于向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程每极采用两个 12 脉动阀组串联, 上下 12 脉动阀组电压均为±400 kV, 考虑各种设备公差和测量误差后(对应各参数的取值分别为:  $U_{dio} = 232.6$  kV,  $I_d = 4 046$  A,  $d_x = 0.096 6$ ,  $\mu = 22.7^\circ$ ,  $\alpha = 18^\circ$ ), 在额定功率运行时, 向家坝换流站最大容性无功消耗约 3 820 Mvar。

### 3 向家坝换流站容性无功分组研究

#### 3.1 交流系统提供容性无功能力分析

由于向家坝水电站距离3个换流站均较近,相对具有更好的容性无功支持能力,因此金沙江一期送端交流系统提供容性无功的能力主要取决于向家坝水电站的开机台数。

同时,由于金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站联合运行时具有季调节能力,在丰水期(6月~10月)可充分利用金沙江一期工程的这一能力参与四川系统调峰,按向家坝换流站~泸州3回联络线N-1的热稳极限控制,四川电网丰期可补充3 000~4 000 MW电力、35~45亿kW·h电量。经计算分析,这种调峰运行方式下金沙江一期3回特高压直流工程的输电利用小时均可增加约180~230h,经济效益相当可观。因此,应以调峰运行方式作为金沙江一期送端交流系统提供容性无功能力的主要控制方式。

基于以上分析,计算出金沙江一期送端交流系统在丰水期不同运行方式下提供容性无功能力约为2 347 Mvar~2 780 Mvar。其中金沙江一期送端交流系统提供容性无功能力为2 300 Mvar对应的运行方式为:溪洛渡左右岸电站和向家坝左右岸电站均停运1台机组,同时四川主网补充3 500 MW电力至金沙江一期送端系统,以保证3回特高压直流按额定功率送电的调峰方式。该运行方式下交流系统提供容性无功能力的详细计算结果如表1所示。

考虑到向家坝特高压换流站距离金沙江一期水电站那相对最近,最有条件接受交流系统提供的容性无功,在不影响溪洛渡左、右岸2个换流站可研阶段确定的总容性无功配置3 200 Mvar的前提下,交流系统提供给溪洛渡左、右岸换流站的容性无功可按650 Mvar考虑,提供给向家坝换流站的最大容性无功可按1 000 Mvar考虑。

#### 3.2 向家坝换流站容性无功分组研究

换流站最大无功分组容量取决于交流系统的强弱,其分组容量大小需满足投切无功分组时系统稳态电压变化和暂态电压变化率的要求。根据以往直流工程设计经验值,投切无功小组引起的换流站交流母线暂态电压变化率 $\leq 1.5\%$ 、稳态电压变化率 $\leq 1.25\%$ ;切无功大组作为一种非正常运行方式,不应作为无功配置的控制方式,只能作为一种保护功能,切

无功大组引起的换流站交流母线暂态电压变化率可适当放宽至 $5\% \sim 6\%$ 。

表1 金沙江一期交流系统提供容性无功能力

序号	项 目	Mvar
1	电网可发无功	7 143
(1)	电站可发无功	6 245
	向家坝电站	2 179
	溪洛渡左岸电站	2 033
	溪洛渡右岸电站	2 033
(2)	线路充电功率	899
	向家坝电站~换流站线路	64
	向家坝换流站~泸州变线路	167
	溪洛渡左~换流站线路	293
	溪洛渡右~换流站线路	375
2	系统损耗无功	4 796
(1)	电站升压变无功损耗	2 556
	向家坝升压变无功损耗	812
	溪洛渡左岸升压变无功损耗	872
	溪洛渡右岸升压变无功损耗	872
(2)	线路无功损耗	2 117
	向家坝电站~换流站线路	67
	向家坝换流站~泸州变线路	231
	溪洛渡左~换流站线路	798
	溪洛渡右~换流站线路	1 021
(3)	向家坝换流站~泸州线路高抗	123
3	系统可提供无功	2 347

(注:向家坝、溪洛渡电站功率因素分别为0.9和0.94,向家坝换流站~泸州线路充电功率和高压并联电抗器(3×90 Mvar)均按一半考虑,4×720 mm<sup>2</sup>和4×400 mm<sup>2</sup>的500 kV线路每100 km充电功率分别按119 Mvar和114 Mvar考虑)

电压波动计算结果表明:

(1)枯水期小方式是决定向家坝换流站最大容性无功分组的控制方式。

(2)投切无功小组:向家坝—上海±800 kV特高压直流工程投产初期(2012年左右)的正常接线方式下,投切向家坝换流站220 Mvar无功小组引起的换流站500 kV交流母线的最大暂态电压和最大稳态电压变化率分别小于1.5%和1.15%;随着溪洛渡左、右岸电站的投运,2015年及以后,无论是正常接线或是N-1接线方式,投切向家坝换流站220 Mvar无功小组引起的换流站500 kV交流母线的最大暂态电压和最大稳态电压变化率均分别小于1.3%和1.0%。

(3)切无功大组:向家坝—上海±800 kV特高压直流工程投产初期的正常接线方式下,切向家坝换流

站 880 Mvar 无功大组引起的换流站 500 kV 交流母线的最大暂态电压变化率均小于 5.8%;随着溪洛渡左、右岸电站的投运,2015 年及以后,无论是正常接线或是 N-1 接线方式,切向家坝换流站 880 Mvar 无功大组引起的换流站 500 kV 交流母线的最大暂态电压变化率均小于 4.8%。

因此,向家坝换流站容性无功小组最大容量可按 220 Mvar 考虑,容性无功大组容量可按 880 Mvar 考虑。

#### 4 向家坝换流站容性无功配置方案

根据直流工程容性无功补偿总容量配置原则,换流站站内容性无功补偿总容量应满足如下要求:

$$Q_{total} \geq (Q_{dc} - Q_{ac}) / (U_{ac}^2) + Q_{sb}$$

式中:  $Q_{total}$  —— 换流站需要的无功补偿容量;

$Q_{dc}$  —— 换流站无功消耗容量;

$Q_{ac}$  —— 交流系统提供的容性无功容量;

$Q_{sb}$  —— 换流站备用容性无功容量(按 1~2 小组无功考虑);

$U_{ac}$  —— 换流站交流母线电压标么值(按 1.0 p.u. 考虑)。

对于向家坝±800 kV 换流站:

$$Q_{total} \geq (Q_{dc} - Q_{ac}) / 1.0^2 + Q_{sb}$$

$$= (3\ 820 - 1\ 000) / 1.0^2 + 220$$

$$= 3\ 040\ \text{MVar}$$

(说明:由于金沙江一期送端 3 个换流站之间电气距离近(各换流站之间仅相距约 20 km),从节约投资和占地角度出发,送端 3 个换流站可看作一个大换流站来考虑无功备用,因此向家坝换流站仅需考虑 1 小组容性无功备用即可满足工程要求。)

根据向家坝换流站站内容性无功配置总规模的分析,为了保证向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程运行的灵活性和可靠性,同时尽可能减小换流站无功分组规模,建议向家坝换流站的容性无功总规模按 3 080 Mvar 考虑,分 4 大组,14 小组,每组容量不超过 880 Mvar,每小组容量为 220 Mvar。

#### 5 结束语

通过对向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程送端换流站额定功率运行方式下最大容性无功消耗的计算,金沙江一期送端 500 kV 交流系统提供容性无功能力的分析,以及向家坝换流站容性无功大组和小组分组容量的选择,最后确定了向家坝特高压直流换流站共需配置 3 080 Mvar 容性无功,分 4 大组,14 小组,每组容量不超过 880 Mvar,每小组容量为 220 Mvar。

(收稿日期:2008-03-20)

### 简 讯

## 四川省电机工程学会第六届七次常务理事会的召开

四川省电机工程学会第六届七次常务理事会于 2008 年 4 月 25 日在成都市名雅山庄召开。常务理事均参加了会议。

会议总结了 2007 年学会工作以及对 2008 年学会工作重点进行了安排;会议向各位常务理事传达了四川省科协第七次代表大会的精神以及 2008 年中国电机工程学会秘书长工作会议精神;对学会评选先进集体和先进个人的情况以及学会 2007 年相关工作情况进行了说明。与会代表充分肯定了电机工程学会 2007 年以来在电力工业生产中所发挥的作用。会议还对有关建议进行了审议,对学会 2007 年的工作总结和 2008 年的工作安排发表了建设性的意见。

新增补的副理事长兼秘书长张晓明在会上作了发言,希望新的一年中学会工作能增大影响,积极开展学术活动。

王平理事长作了会议总结,他希望大家的支持下,共同把四川省电机工程学会的工作做好,加强学会的学术活动,科技兴川,为推动国民经济的发展,为建设西部经济,做出贡献。

会议经过讨论通过了秘书处起草的 2007 年工作总结和 2008 年的工作计划。通过了关于调整学会理事长、秘书长和增选部分常务理事、副秘书长的建议名单。