

500 kV 交流送电网络短路电流研究

吴晓蓉, 高强, 郭明阳, 刘强国

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要: 随着电力系统规模的不断扩大,以及交直流系统混联的加强,部分母线单相短路电流大于三相短路电流的现象时有发生,给设备选择带来困难。金沙江一期工程的溪洛渡左、向家坝电站电力通过两个 ± 800 kV 直流通道送往华东地区。由于电站汇集区域大机组多、换流变电容量大,并且换流站与周边 500 kV 电网电气联系紧密,造成换流站 500 kV 侧单相短路电流大于三相短路电流,且已接近或超过现有设备所能承受的最大遮断容量,需采取措施进行限制,以保证电网的安全运行。变压器中性点小电抗接地和调整系统运行方式是限制单相短路电流的有效措施。以金沙江一期工程为背景,经过详细的模拟计算,对比了两种方式限制短路电流的效果,并提出本工程可行的降低换流站 500 kV 侧单相短路电流的措施。

关键词: 单相短路电流; 三相短路电流; 中性点小电抗接地; 系统运行方式

Abstract: With the extension of power system and the enhancement of AC - DC system, the phenomena that the single - phase short - circuit current at some buses is larger than the three - phase short - circuit current will often occur, which makes the troubles in the device selection. The power from Xiluodu and Xiangjiaba hydroelectric power stations (the first - stage project of Jinsha River) is transported to eastern region of China by two ± 800 kV direct current channels. As the great number of large generating units in the hydropower collecting region, the high - capacity of convertor stations, and the close link of convertor stations with 500 kV grid around, the single - phase short - circuit current may be larger than the three - phase short - circuit current at 500 kV buses of convertor stations, even approaching or exceeding the maximum breaking capacity of the devices, which must be restricted by taking some measures to ensure the safe operation of power grid. The neutral point earthed via small reactance of transformer and adjusting the operation mode of power system are the effective measures to reduce the single - phase short - circuit current. According to the first - stage project of Jinsha River, a feasible measure of reducing the single - phase short - circuit current at 500 kV buses in convertor stations is presented through the detailed simulation calculation and the comparison between two different measures of restricting the short - circuit current.

Key words: single - phase short - circuit current; three - phase short - circuit current; neutral point earthed via small reactance; operation mode of power system

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013)03 - 0068 - 04

1 金沙江一期工程概况

金沙江是长江上游青海玉树巴塘河口至四川宜宾河段的通称,跨青、藏、滇、川、黔五省区,干流全长 2 290 km,落差 3 280 m,多年平均径流量 $1 550 \times 10^8$ m³,总装机容量可达 750 GW,约占全国可开发水能资源的五分之一。通过规划论证和方案比选,国家已经作出决策,以溪洛渡、向家坝梯级作为开发金沙江的第一期工程,继三峡工程之后开工建设。

溪洛渡、向家坝是金沙江干流最下游的两个梯级,开发任务以发电为主。溪洛渡、向家坝分别于

2005 年、2006 年开工建设,其中溪洛渡电站左右两岸同时施工,2015 年前全部投产。调整后的溪洛渡装机 18×770 MW(13 860 MW,左、右岸各 9 台),向家坝装机 8×800 MW(6 400 MW,左、右岸各 4 台),合计容量达到 20 260 MW。根据目前最新的可研工作研究成果,溪洛渡、向家坝水电站通过 3 个直流通道送出,其中:向家坝—上海方向的 ± 800 kV 直流输电容量为 6 400 MW,溪洛渡左—浙西方向的 ± 800 kV 直流输电容量为 8 000 MW,溪洛渡右—广东方向的 ± 800 kV 直流输电容量为 6 400 MW。

溪洛渡左和向家坝电站接入系统方案见图 1。

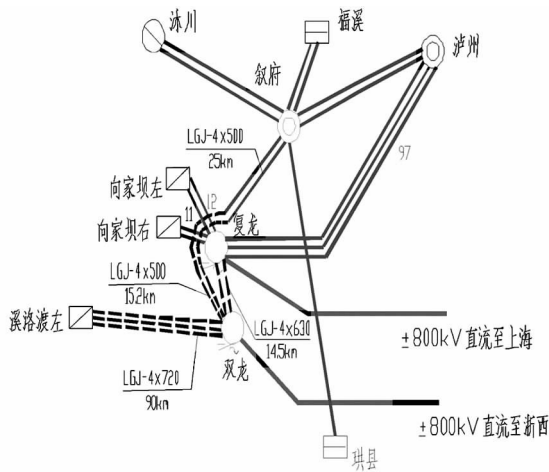


图1 溪洛渡左和向家坝电站接入系统方案示意图

2 初始短路电流校核

2.1 计算条件

1) 计算水平年: 2020年。

2) 开机方式: 所有电站全开机。

3) 接地方式: 500 kV 并网电源以及 500 kV 变电站全接地; 换流站内换流变压器一半接地, 站用变压器全接地; 向家坝左、向家坝右升压变中性点已加装 $1/3U_k\%$ 小电抗。

4) 解环方式: 四川各地市电网之间 500/220 kV 高低压电磁环网原则上解开, 即断开地市电网之间的 220 kV 联络线路。地市电网中, 除成都、眉山地区外, 其他地区维持内部 500/220 kV 高低压电磁环网运行。

5) 故障类型: 三相短路、单相接地短路。

6) 主要元件阻抗参数: 金沙江一期工程主要发电机、升压变压器及换流站内相关设备阻抗参数如表 1、表 2 所示。

表 1 主要电站发电机和升压变阻抗参数

	发电机 X_d''	升压变 压器 X_t ($U_k\%$)	机组 有功 /MW	功率 因数	容量 /MVA	机组 台数
向家坝左	0.23	0.17	800	0.9	889	4
向家坝右	0.23	0.17	800	0.9	889	4
溪洛渡左	0.21	0.16	770	0.9	856	9
向家坝左	升压变压器中性点小电抗		$1/3(U_k\%)$			
向家坝右	升压变压器中性点小电抗		$1/3(U_k\%)$			

2.2 计算结果分析

2020 年金沙江一期工程相关 500 kV 母线短路电流计算结果见表 3。计算结果表明, 泸州、叙府以及向家坝、溪洛渡左岸电站 500 kV 侧短路电流均小于 60 kA; 复龙和双龙换流站 500 kV 侧的三相短路

电流分别为 57.94 kA 和 58.43 kA, 单相接地短路电流分别为 62.01 kA 和 63.06 kA, 单相接地短路电流已接近或超过现有设备所能承受的最大遮断容量 63 kA, 需要采取措施进行限制。

表 2 换流站内相关变压器阻抗参数

	$X_t(U_k\%)$	容量 /MVA	台数	接线形式
复龙	0.18	963	8	4 台 YNy0,
				4 台 YNd11
双龙	0.12	40	2	YnY0 + d11
				换流变
复龙	0.19	406	24	12 台 YNy0,
				12 台 YNd11
双龙	0.12	240	2	YnY0 + d11
				站用变
				压器

表 3 2020 年短路电流计算结果(kA)

500 kV		
故障型式	三相	单相
泸州	48.71	39.91
叙府	57.33	52.89
向家坝左	47.76	45.08
向家坝右	48.49	46.10
溪洛渡左	40.82	43.97
复龙	57.94	62.01
双龙	58.43	63.06

3 变压器中性点加装小电抗限制短路电流

3.1 基本原理

(1) 普通变压器中性点经小电抗接地的原理

对于中性点经小电抗接地的普通变压器, 当 Y_0 接法的绕组中通过零序电流时, 中性点接地阻抗上将流过三倍零序电流, 并产生相应的电压降, 使中性点产生与大地不同的电位, 从而限制不对称故障短路电流。因此, 其零序等值阻抗应为该绕组的漏抗与 3 倍中性点小电抗之和。

(2) 自耦变压器中性点经小电抗接地的原理

对中性点经小电抗接地的 YNynd 自耦变压器, 其电气接线图如图 2 所示。

设一次、二次侧端点与中性点之间的电位差的有名值为 U_{I_n} 、 U_{II_n} , 中性点电位为 U_n , 则折算到一次侧的一次和二次绕组端点间的电位差为

$$\Delta U = (U_{I_n} + U_n) - (U_{II_n} + U_n) \frac{U_{IN}}{U_{IIN}} \quad (1)$$

其中 U_{IN} 、 U_{IIN} 分别为一次、二次侧额定电压。

表4 变压器中性点小电抗对短路电流的影响
(双龙换流站7回全接线、向家坝电站升压变压器加装1/3(U_k%)中性点小电抗)

中性点小电抗 加装位置	溪左升压 变压器	双龙换流 变压器	复龙换流 变压器	双龙及复龙 换流变压器	双龙站用 变压器	复龙站用 变压器	叙府 变压器
母线电压 /kV	500	500	500	500	500	500	500
故障型式	单相	单相	单相	单相	单相	单相	单相
泸州(39.91)	39.91	39.83	39.74	39.63	39.90	39.91	39.89
叙府(52.89)	52.86	52.52	52.8	52.39	52.84	52.89	52.69
向家坝左(45.08)	45.05	44.72	44.03	43.56	45.03	45.05	45.08
向家坝右(46.1)	46.06	45.72	44.97	44.47	46.05	46.06	46.10
溪洛渡左(43.97)	37.27	43.91	43.96	43.89	43.96	43.97	43.97
复龙(62.01)	61.92	61.05	59.24	58.04	61.88	61.92	62.00
双龙(63.06)	62.74	59.56	62.33	58.59	62.57	63.04	63.05

注:①第一列括号内数值为未加装中性点小电抗时相关站点的单相短路电流值;②叙府变压器加装的中性点小电抗阻值为1.0(U_k%)其余站点加装的中性点小电抗阻值均为1/3(U_k%) U_k%为所连变压器的短路阻抗百分比。

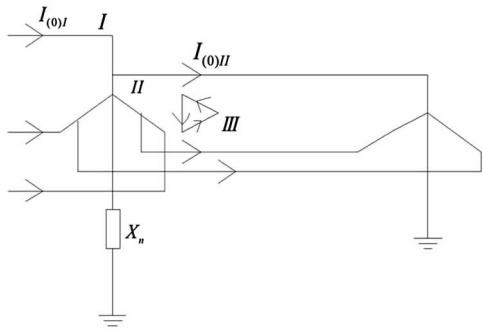


图2 中性点经小电抗接地的自耦变压器接线图

因此将III绕组断开,折算到一次侧的等值零序

电抗 X'_{I-II}

$$X'_{I-II} = \frac{(U_{I_n} + U_n) - (U_{II_n} + U_n) \frac{U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}}}{I_{(0)I}} = X_{I-II} + 3X_n \left(1 - \frac{U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}}\right)^2 \quad (2)$$

将II绕组断开,则自耦变压器相当于一台YNd接法的普通变压器,其折算到一次侧的I、III侧之间的零序电抗为

$$X'_{I-III} = X_{I-III} + 3X_n \quad (3)$$

同样将I绕组断开,也是一台YNd接法的普通变压器,其折算到一次侧的II、III侧之间的零序电抗为

$$X'_{II-III} = X_{II-III} + 3X_n \left(1 - \frac{U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}}\right)^2 \quad (4)$$

按照求三绕组变压器各绕组等值电抗的计算公式,可求得星形零序等值电路如图3所示。折算到一次侧的各电抗为

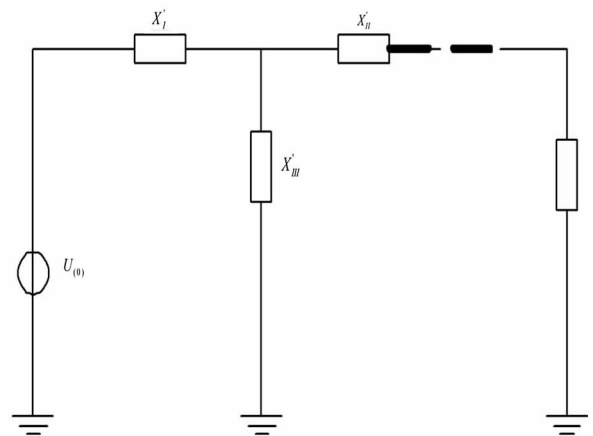


图3 中性点经小电抗接地的自耦变压器

零序等值电路图

$$\begin{cases} X'_I = X_I + 3X_n \left(1 - \frac{U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}}\right) \\ X'_{II} = X_{II} + 3X_n \frac{(U_{I_{1N}} - U_{II_{1N}})U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}^2} \\ X'_{III} = X_{III} + 3X_n \frac{U_{I_{1N}}}{U_{II_{1N}}} \end{cases} \quad (5)$$

按照上述公式可见,在中性点接入小电抗后,折算到一次侧的I、II侧之间的零序等值电抗值会因接入小电抗阻抗值而改变,小电抗阻抗值越大,其零序等值电抗也越大,这就是中性点装设小电抗能限制不对称故障短路电流的原因。

中性点经小电抗接地后,应重新校核中性点的绝缘水平,以保证系统安全稳定运行。

3.2 中性点小电抗对金沙江一期送出工程短路电流的影响

在双龙换流站7回全接线、向家坝电站升压变

表5 运行方式对短路电流的影响
(向家坝电站升压变已加装 1/3($U_k\%$) 中性点小电抗)

母线电压 /kV	全接线		叙府—双龙断 1 回		复龙—双龙断 1 回		叙府—双龙断 2 回		复龙—双龙断 2 回	
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
故障型式	三相	单相	三相	单相	三相	单相	三相	单相	三相	单相
泸州	48.71	39.91	48.66	39.88	48.34	39.66	48.47	39.79	45.33	38.01
叙府	57.33	52.89	52.14	47.24	56.51	52.26	39.90	36.87	50.16	47.95
向家坝左	47.76	45.08	45.91	43.86	45.51	42.96	40.61	40.25	32.13	32.66
向家坝右	48.49	46.1	46.57	44.81	46.15	43.85	41.09	41.02	32.36	33.08
溪洛渡左	40.82	43.97	39.81	43.11	40.15	43.38	36.75	40.42	35.05	38.85
复龙	57.94	62.01	54.98	59.44	54.33	57.23	46.86	52.33	35.03	38.47
双龙	58.43	63.06	53.55	58.22	55.11	58.66	41.76	47.01	36.67	40.38

压器已加装 1/3($U_k\%$) 中性点小电抗的前提下,分别计算了在溪洛渡左岸电站升压变压器、复龙和双龙换流站的站用变压器及换流变压器加装 1/3($U_k\%$) 中性点小电抗,以及叙府变压器加装 1.0($U_k\%$) 中性点小电抗后,相关 500 kV 母线单相接地短路电流,见表 4。计算结果表明如下。

(1) 在溪洛渡左岸电站升压变压器加装中性点小电抗后,溪洛渡左岸高压侧单相接地短路电流下降明显,但由于溪洛渡左岸电站送出线路长达 97 km,对复龙和双龙换流站影响很小。

(2) 由于站用变压器容量小、阻抗大,在复龙和双龙换流站的站用变压器加装中性点小电抗,对限制单相接地短路电流作用很小。

(3) 在复龙和双龙换流站的换流变压器加装中性点小电抗,对限制单相接地短路电流有一定作用,但由于换流变结构特殊,加装小电抗较困难。

(4) 在叙府变压器加装中性点小电抗,对限制 220 kV 侧单相接地短路电流作用明显,但对限制 500 kV 侧单相接地短路电流作用很小。

4 通过调整运行方式限制短路电流

上一节的计算表明,通过在变压器中性点加装小电抗以限制复龙和双龙换流站 500 kV 侧的单相接地短路电流效果不明显,因此需要在运行时考虑调整电网接线方式。

这里计算了双龙换流站出口 500 kV 线路不同运行方式下的相关 500 kV 母线单相短路电流,见表 5 所示。计算结果表明:在断开叙府—双龙或复

龙—双龙 1 回线路的情况下,复龙和双龙换流站 500 kV 侧的单相接地短路电流均可下降到 60 kA 以下;若断开叙府—双龙 2 回线路,复龙和双龙换流站 500 kV 侧的单相接地短路电流均可下降到 50 kA 左右;若断开复龙—双龙 2 回线路,复龙和双龙换流站 500 kV 侧的单相接地短路电流均可下降到 40 kA 左右。可见,运行时调整电网接线方式对限制本工程短路电流作用明显。

5 结论及建议

以金沙江一期工程为背景,计算分析了变压器中性点加装小电抗和调整系统运行方式两种措施对限制双龙、复龙换流站 500 kV 侧单相短路电流的作用。计算表明,在溪洛渡左岸电站升压变压器、复龙和双龙换流站的站用变压器及换流变压器加装 1/3($U_k\%$) 中性点小电抗,以及叙府变压器加装 1.0($U_k\%$) 中性点小电抗后,均能一定程度上降低双龙、复龙换流站 500 kV 侧母线单相短路电流,但由于线路长度较长以及换流站内部结构的局限性,效果均不明显。通过改变双龙换流站出口 500 kV 线路的运行方式则能较明显地降低双龙、复龙换流站 500 kV 侧母线单相短路电流,并且不增加额外投资,能根据电网实际运行情况灵活调节。因此,为限制复龙和双龙换流站 500 kV 侧的单相接地短路电流,远期可考虑根据电网运行情况调整双龙换流站 500 kV 出线方式,即断开叙府—双龙或复龙—双龙 1 回线路运行。调整电网运行方式会降低运行的可

(下转第 94 页)

器组8只串联。

4.2 电能应用

电能的消耗部分主要由卸载电路、直流负载、交流负载3部分组成。根据用户的用电类型不同,负载分为直流和交流两种。直流负载可由蓄电池直接引入,也可通过一个升压或降压电路(DC/DC)来提供用户需要的直流电压。而交流负载需要设计DC/AC逆变器。卸载电路的主要作用是:当风速很高,但仍未达到过速保护状态时,系统仍需要给负载或蓄电池供电,为了减小大风给开关管及其电路造成的损坏,控制器可以开启卸载电路,使一部分功率在卸载电路消耗掉,从而减少大风对控制器的冲击。

5 LED 路灯

LED灯以发光二极管作为光源,是一种固态冷光源。具有寿命长、响应快、易集成、电流小、电压低、亮度高、节能佳、光分布易于控制、环保无污染等优点。随着技术的发展,LED控制技术有了很大的提高,其价格也随之降低,使LED光源在照明领域的应用将越来越广。LED光源直接由超级电容和蓄电池组成的混合储能装置供电,不需要逆变器,使得风光互补路灯系统的成本进一步降低。

6 结 语

对风力光照互补LED路灯控制系统的研究,解决了单一发电供电不稳定及能量不足的问题,对于

其中采用的LED等进行照明使其性价比大大提高,在电源方面采用了铅酸蓄电池与超级电容混合储能的技术,改善了单一蓄电池储能的循环寿命短、功率密度低、维护量大等一些难以克服及成本昂贵等缺点,在控制策略上采用最大功率点跟踪(MPPT)的控制方法,使其更好地利用资源,让该系统的每一部分都发挥最大的功效。

参考文献

- [1] 朱芳,王培红. 风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化[J]. 上海电力, 2009(1): 23-26.
- [2] 李少林,姚国兴. 风光互补发电蓄电池超级电容器混合储能研究[J]. 电力电子技术, 2010(2): 13-14.
- [3] Gao L, Dougal R A, Liu S. Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultra Capacitor Hybrid [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(1): 236-243.
- [4] 肖贵贤,汪有源. 风光互补发电系统的研究与应用[J]. 中国科技信息, 2009(22): 20-21.
- [5] 陈亚爱,金雍奥. 风光互补发电系统控制技术综述[J]. 电气传动, 2012, 42(1): 3-9.

作者简介:

司志泽(1987),男,硕士研究生,从事自动化装置与智能仪表的研究;

陈志军(1967),男,硕士生导师,副教授;智能信息处理和智能控制与系统开发;

安典强(1986),男,硕士研究生,从事风力发电机组故障诊断的研究。

(收稿日期:2013-02-19)

(上接第71页)

可靠性,为此建议将复龙一双龙双回500kV线路按两个单回建设,并将导线截面适当放大。上述研究成果已得到中国电力顾问集团公司有关专家的认可,推荐在实际工程中进行应用。

参考文献

- [1] 朱天游. 500kV自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18.
- [2] 王磊,徐丙华. 华东电网500kV自耦变压器中性点小电抗接地应用的研究[J]. 变压器, 2010, 47(5): 53-56.

- [3] 朱天游. 三峡电站500kV主变压器中性点接地方式优化选择[J]. 电网技术, 1997, 27(5): 48-51.

- [4] 程云志,叶幼君. 500kV自耦变压器中性点装设小电抗的应用研究[J]. 华东电力, 2006, 34(11): 59-61.

作者简介:

吴晓蓉(1981),女,工程师,从事电力系统一次及电网规划设计工作;

高强(1984),男,助理工程师,从事电力系统一次及电网规划设计工作;

郭明阳(1986),男,助理工程师,从事电力系统一次及电网规划设计工作;

刘强国(1946),男,教授级高级工程师,从事电力系统规划设计工作40余年。

(收稿日期:2013-01-10)