

特高压换流站单相短路电流抑制措施 及对电网可靠性的影响分析

徐杰¹ 李燕²

(1. 国网四川综合能源服务有限公司, 四川 成都 610061;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 针对宜宾、复龙换流站单相短路电流超过开关遮断水平的问题, 分析其产生的原因, 根据近区电网布局 and 规划, 提出了限制近区火电开机、主变压器中性点经小电抗接地、线路加装串联电抗器等抑制单相短路电流的措施。通过分析比较不同措施对换流站单相短路电流的限制效果, 以及对电网设备运行和供电可靠性的影响, 给出可行的降低换流站 500 kV 侧单相短路电流的措施建议。

关键词: 换流站; 单相短路电流; 中性点小电抗; 串联电抗器

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)04-0069-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.015

Analysis of Suppression Measures on Single-phase Short-circuit Current in UHVDC Converter Station and Its Impacts on Power Grid Reliability

Xu Jie¹, Li Yan²

(1. State Grid Sichuan Integrated Energy Service Co., Ltd, Chengdu 610061, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the issues that single-phase short-circuit current at the 500 kV side of Yibin and Fulong converter stations exceeds the breaking capacity of breaker, the reasons are analyzed and the measures are put forward to reduce the single-phase short-circuit current, including limiting the output of thermal power near field, main transformer neutral grounding by small reactance and adding series reactors in 500 kV lines. The limiting effects on single-phase short-circuit current and the impacts on power grid equipment operation and power supply reliability are compared by different measures. The suggestions for reducing single-phase short-circuit current at 500 kV bus of UHVDC converter station are given.

Key words: converter station; single-phase short-circuit current; neutral grounding by small reactance; series reactor

0 引言

随着电网建设规模的不断扩大和交直流混联系统的加强, 电网的短路电流水平逐年攀升, 且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。短路电流过大会给设备选择带来困难, 危害人身和设备安全, 已成为电力系统规划、设计和运行面临的重大问题^[1]。

在目前国内外通用的 PSASP 计算程序中, 换流变压器模型集成在直流系统模型中, 使用该模型进行三相、单相短路计算时, 直流被直接作为负荷处

理, 不提供短路电流。但在实际单相短路计算中, 换流变压器对单相短路电流有显著的影响。

宜宾、复龙换流站换流变压器容量分别为 9696 MVA、7706 MVA, 换流变压器容量大且换流站与周边 500 kV 电网的联系较为紧密^[2], 考虑换流变压器对零序阻抗的影响, 加上向家坝、溪洛渡等水电站的大功率直流配套电源的集中接入, 导致 2 个换流站 500 kV 侧单相短路电流超过三相短路电流, 且已接近或超过断路器的最大遮断容量^[3], 需采取措施限制短路电流, 以保证电网的安全运行。

电网短路电流的限制可从电网结构和变电站两个层面采取措施^[4]。需要根据电网实际情况, 在保证

供电可靠性的基础上采取合理的措施限制短路电流。

1 宜宾、复龙换流站短路电流分析

1.1 短路电流计算

宾金、复奉直流近区 500 kV 网架结构如图 1 所示。

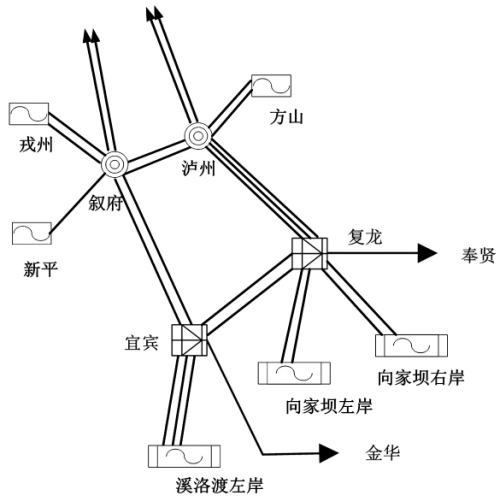


图 1 宾金、复奉直流近区 500 kV 系统接线

基于 2018 年四川电网网架结构, 在全网全开机方式下, 退出 500 kV 站和 220 kV 站的低容低抗, 不退出特高压直流换流站滤波器, 保留线路高压电抗器, 利用 PSASP 7.30 基于方案计算短路电流。

短路电流计算结果如表 1 所示。

表 1 500 kV 侧短路电流计算结果

站点	三相/kA	单相/kA
宜宾	55.15	64.03
复龙	54.84	64.05
叙府	55.15	56.65
泸州	52.42	47.41

可以看出, 宜宾、复龙换流站的单相短路电流均大于 63 kA。

1.2 换流变压器对单相短路电流的影响

特高压直流系统换流器普遍采用双 12 脉动结构, 两个 12 脉动换流器串联组成一极, 一极共包含 4 台换流变压器, 其中两台为 $Y_N d$ 接线, 两台为 $Y_{N Y}$ 接线^[5]。

对 $Y_N d$ 接线变压器, 当 Y_N 侧有零序电压时, 由于中性点接地, 每相零序电流可以经过变压器绕组和大地回路。同时三角形接线侧绕组产生零序电动势和零序电流, 零序电流在三相绕组内自成回路, d

侧出线上没有零序电流, 相当于变压器的零序电路与外侧电路之间是断开的, 等值电路如图 2 所示。

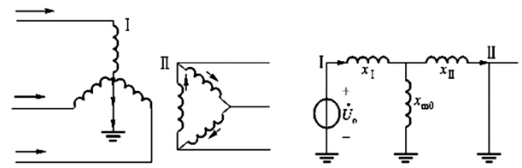


图 2 $Y_N d$ 接线变压器零序回路

换流变压器零序励磁电抗一般较绕组漏抗大很多倍, 且对于负荷中心地区接线方式为 $Y_N d$ 的变压器, 零序阻抗与正序阻抗十分接近^[6], 因此 $Y_N d$ 接线变压器零序阻抗可简化为

$$X_{(0)} = X_1 + X_{II} \quad (1)$$

式中 X_1 、 X_{II} 分别为变压器高压侧和中压侧的正序等值阻抗。

$Y_{N Y}$ 接线变压器的二次侧没有零序电流通路, 所以其零序等值电路在二次侧是断开的, 等值电路如图 3 所示。

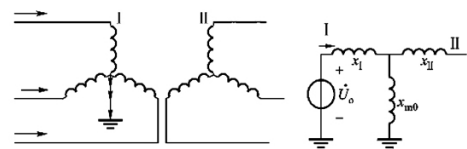


图 3 $Y_{N Y}$ 接线变压器零序回路

$Y_{N Y}$ 接线变压器零序电抗为

$$X_{(0)} = X_1 + X_{m0} \quad (2)$$

换流变压器励磁电抗较大, 因此可以认为 $Y_{N Y}$ 接法变压器零序电抗为无穷大。

由于 $Y_N d$ 换流变压器的影响, 换流站 500 kV 零序等效电路中相当于并联了阻抗很小的零序支路, 对换流站单相短路电流产生显著影响, 导致宜宾、复龙两换流站短路电流相比不考虑换流变压器时增大 12 kA 以上。

1.3 电源侧升压变压器对单相短路电流的影响

宾金直流配套电源溪洛渡左岸电厂装机容量为 9×770 MW, 复奉直流配套电源向家坝左、右岸电厂装机容量为 8×800 MW, 各机组和变压器均采用单元接线方式, 升压变压器采用 $Y_N d$ 接法, 除向家坝 8 台机组升压变压器中性点配有 18Ω 小电抗外, 其余配套机组升压变压器中性点均直接接地。

单元接线方式、升压变压器 $Y_N d$ 接法的机组正序、零序等值回路如图 4 至图 6 所示(不考虑励磁支路)。

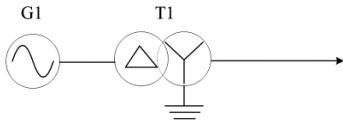


图4 单元接线

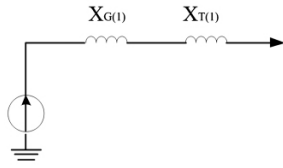


图5 正序网络

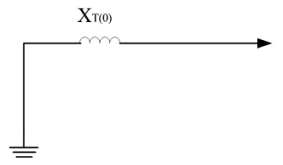


图6 零序网络

与换流变压器类似,机组升压变压器采用 Y_Nd 接法,高压侧发生不对称故障时变压器提供零序通路,其零序支路等值电抗为

$$X_{\Sigma 0} = X_{T0} = X_{T(1)} + 3X_N \quad (3)$$

正序等值电抗为

$$X_{\Sigma 1} = X_{T(1)} + X_{G(1)} \quad (4)$$

式中: $X_{T(1)}$ 为变压器漏抗; X_N 为中性点小电抗值; $X_{G(1)}$ 为发电机正序电抗。从式(3)、式(4)及等值电路图可以看出,升压变压器无小电抗情况下,由于发电机正序电抗 $X_{G(1)}$ 的存在,发电单元总正序电抗大于零序电抗,将导致高压侧单相短路电流大于三相短路电流。

宾金、复龙换流站直流配套机组除向家坝机组考虑小电抗外,其余均采用直接接地,配套电源等值零序电抗小于正序电抗,是换流站 500 kV 单相短路电流大于三相短路电流的另一原因。若溪洛渡、向家坝水电站所有配套机组均不接地,则宾金、复龙换流站 500 kV 单相短路电流可降低 5 kA 左右。

2 宜宾、复龙换流站短路电流限制措施

限制单相短路电流,可以从增大系统正序阻抗和零序阻抗方面采取措施。

2.1 限制近区开机

限制开机是降低系统短路电流最直接的手段,其也可以认为是一种增大系统正序阻抗的方式。为保证夏季特高压直流满送,暂不考虑限制溪洛渡、向

家坝水电站配套电源开机,可通过关停近区火电机组限制换流站单相短路电流。以 2018 年夏季方式为例,换流站近区有戎州、方山、新平等火电机组,关停戎州 1 台机组、新平 500 kV 接入机组及方山 1 台机组后(升压变压器同时退出),复龙、宜宾换流站单相短路电流可分别限制到 62.7 kA 和 62.3 kA。

在夏季高峰负荷情况下,限制开机可能导致近区电压支撑能力不足,特别是洪板线潮流较重,洪沟变电站近区本身电压支撑能力较弱。此外,随着近区宜宾和泸州地区的负荷增长,限制火电出力后可能导致叙府和泸州变电站主变压器不满足 $N-1$ 校核,削弱了电网的供电能力。因此,限制开机仅可作为限制短路电流的临时性方案。

2.2 换流变压器中性点加装小电抗

大容量换流变压器采用 Y_Nd 接线方式是换流站 500 kV 单相短路电流超标最重要的因素,因此可考虑在 Y_Nd 接线换流变压器中性点加装小电抗以增大零序电抗来限制单相短路电流。随着中性点小电抗阻值的增加,其对 220 kV 侧母线单相短路电流的限制效果逐渐趋于饱和^[7]。通常小电抗值按常规 500 kV 两绕组升压变压器阻值选择方法,取不大于 $1/3$ 漏抗的小电抗值。考虑在宜宾、复龙换流站 Y_Nd 接线换流变压器加装 14 Ω 小电抗。加装小电抗后,2018 年复龙、宜宾换流站单相短路电流可分别降低至 60.5 kA 和 60.3 kA,低于开关遮断能力。

加装小电抗最主要的风险来自于中性点绝缘,雷电及操作过电压可通过加装避雷器进行限制,而加装小电抗后中性点最大工频过电压必须在换流变压器中性点工频耐压范围内^[8]。

宜宾、复龙换流站换流变压器中性点可耐受工频电压均为 95 kV,对换流变压器中性点小电抗在不同方式下单相短路时承受的工频电压进行简要分析,加入小电抗 X_N 后,换流变压器支路零序阻抗变为

$$X_{T0} = X_{T(1)} + 3X_N \quad (5)$$

换流站 500 kV 母线发生单相短路时短路电流为

$$I_c = \frac{3U_k}{X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0} // X_{T0}} \quad (6)$$

式中: U_k 为短路点故障前的初始电压; $X_{\Sigma 1}$ 、 $X_{\Sigma 2}$ 、 $X_{\Sigma 0}$ 分别为换流站外部正、负、零序等值阻抗。

单相短路时短路相正、负、零序电流相等,可得流经换流变压器中性点的电流为

$$I_N = \frac{3I_c X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 0} + X_{T0}} = \frac{I_c X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 0} + X_{T0}} \quad (7)$$

电力系统中一般认为系统正序阻抗等于负序阻

抗,中性点电压可表示为

$$U_N = I_N X_N = \frac{3U_k X_N}{2X_{\Sigma 1} + X_{T0} + \frac{2X_{T0} X_{\Sigma 1}}{X_{\Sigma 0}}} \quad (8)$$

由式(8)可看出, X_N 越大,中性点电压越高。

考虑对中性点过电压最严重的方式(换流站外部正序阻抗 $X_{\Sigma 1}$ 最小),取换流站 500 kV 三相短路电流为 63 kA,换流站外部零序阻抗 $X_{\Sigma 0}$ 为正序阻抗 $X_{\Sigma 1}$ 的 3 倍。以宜宾换流站为例进行计算得到该方式下 500 kV 单相短路时中性点工频电压达到 69.7 kV,绝缘裕度较大。即使考虑 3 台 $Y_N d$ 接法换流变压器检修,剩余 1 台 $Y_N d$ 接法换流变压器中性点工频电压也仅达到 82.7 kV,仍有一定裕度。

根据上述计算,在换流变压器中性点加装小电抗是限制单相短路的一种可行方案,不过由于换流变压器设备较为特殊,加装小电抗仍需谨慎。此外受电网结构等因素的影响,小电抗限制单相短路电流的作用是有限的,并且主要限制本站的单相短路电流。

2.3 线路增设串联电抗器限制短路电流

采用串联电抗器可以增加线路阻抗,达到限制短路电流的目的。这是一种传统的限流措施。串联电抗器的运行方式简单、安全可靠、维护简单,技术较为成熟,工程实施可行性高^[9]。2008 年 500 kV 泗泾—黄渡线在泗泾侧安装了 14 Ω 串联电抗器,是 500 kV 串联电抗器在国内的首次应用。

由于宜宾、复龙换流站仅通过 14 km 的 500 kV 线路联接,电气距离近, $Y_N d$ 接法换流变压器引起的总零序电抗减小效果更加明显,导致单相短路电流超标。可考虑通过在宜宾—复龙双回线路增设 14 Ω 串联电抗器削弱两换流站联系,增大系统等值阻抗来限制短路电流。采用上述方案后,宜宾、复龙两换流站单相短路电流降低至 56.9 kA 和 56.1 kA。

串联电抗器可有效限制单相及三相短路电流,但其一次性投入成本较大,而且串入系统后会增加系统的无功损耗及有功损耗。此外串联电抗器投入后会改变近区线路的潮流分布,系统稳定情况和近区断面输送限额需重新校核。此方案可作为远期限制短路电流备选方案。

3 结 语

考虑换流变压器对单相短路电流的影响,宜宾、复龙换流站母线 500 kV 单相短路电流已超过断路

器的遮断容量。为限制单相短路电流,可考虑以下 3 个方面措施:

1) 临时限流方案:限制近区火电机组开机。通过关停戎州、方山各 1 台机组以及新平 500 kV 接入机组,可以将复龙、宜宾换流站短路电流限制到低于开关遮断能力。

2) 改造方案 1:换流变压器中性点加装小电抗。通过在宜宾、复龙换流站 $Y_N d$ 接法换流变压器加装 14 Ω 小电抗,可将复龙、宜宾换流站短路电流限制在断路器遮断容量以下,同时单相短路时换流变压器中性点工频过电压低于其工频耐压水平。此方案成本较小,实施相对简单,在场地条件和中性点绝缘水平满足要求的条件下,建议优先考虑。

3) 改造方案 2:宜宾—复龙双回 500 kV 线路增设串联电抗器。通过在宜宾—复龙双回线路增设 14 Ω 串联电抗器,可显著降低复龙、宜宾换流站的单相短路电流。此方案一次投入成本大,且停电时间较长,近区断面输送限额也需重新校核,可作为远期备选方案。

参考文献

- [1] 韩戈,韩柳,吴琳.各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):141-144.
- [2] 陈汉雄,胡劲松.金沙江一期送端特高压直流输电系统的协调控制[J].电网技术,2008,32(8):10-14.
- [3] 马为民,聂定珍,曹燕明.向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流工程中的关键技术[J].电网技术,2007,31(11):1-5.
- [4] 韩柳,仇卫东,肖智宏.电网短路电流的限制措施[J].能源技术经济,2009,21(3):33-37.
- [5] 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].电网技术,2006,30(1):1-8.
- [6] 袁凌.变压器零序阻抗的实测及计算[J].河北电力技术,2002,21(3):17-21.
- [7] 梁纪峰,刘文颖,梁才,等.500 kV 自耦变中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(13):96-99.
- [8] 高峰.银川东换流站主变压器中性点电抗器配置方案[J].宁夏电力,2014(6):13-17.
- [9] 陈水明,许伟,王振兴.500 kV 限流电抗器对瞬态电压的影响及限制措施[J].华北电力技术,2008(1):11-15.

作者简介:

徐杰(1986) 工程师 从事电力系统运行管理相关工作;
李燕(1986) 高级工程师 从事电力系统分析相关工作。

(收稿日期:2018-04-03)