

500 kV 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析

尹元明¹, 谢天喜², 周志成²

(1.江苏省电力公司,江苏南京 210024;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

摘要:500 kV 输电线路安装串联电抗器后,断路器开断短路电流时产生的暂态恢复电压(TRV)较高,可能会导致断路器重燃而无法正常开断。文中以江苏 500 kV 电网为对象,建立了断路器 TRV 仿真计算模型,研究石牌—常熟南线安装串抗后,出现单相接地故障时断路器的 TRV,分析断路器断口两端的 TRV 是否满足超出了其绝缘水平,提出了相应的抑制措施,并通过仿真计算验证了措施的有效性。计算结果表明,石牌侧安装串抗后,其断路器 TRV 不符合标准要求,可在串抗两端并联 35 nF 以上的电容器有效抑制 TRV 的上升率。文中成果可为串抗及 TRV 防护措施在工程中的实际应用提供理论参考。

关键词:串联电抗器;并联电容器;TRV;断路器

中图分类号:TM741.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)06-0045-03

随着电力系统规模的不断扩大,电网的短路电流水平日益提高,已经成为制约电网发展的重要因素之一^[1]。根据“2015~2020年江苏 500 kV 电网发展规划研究报告”的规划网架和短路电流计算,“十二五”末至“十三五”期间,江苏电网在采取目前已有的控制方式后,500 kV 石牌—常熟南线路的短路电流将超过断路器的额定短路电流开断水平,需要采取适当的措施限制短路电流。限制电网短路电流主要是优化网络结构和提高电网设备容量两个方面,包括提高电网电压等级、优化电网接线方式、采用串联电抗器、高阻抗变压器等。上述方法各有特点,其中采用串联电抗器是一种技术较为成熟、工程实施可行性高且经济成本相对较低的措施^[2]。目前国外已有巴西、美国、加拿大等多国应用了这项技术。在国内,华东电网也于 2008 年在 500 kV 泗泾—黄渡线上安装了串联电抗器,限制了电网短路电流水平,是 500 kV 串联电抗器在国内的首次应用^[3]。

为抑制石牌变电站的短路电流,江苏电网拟在线路的石牌变电站侧安装串联电抗器。然而,由于串联电抗器的存在,断路器开断线路短路电流时,电抗器和设备杂散电容、线路分布电容间将出现振荡,从而在断路器断口产生高频、高幅的暂态恢复电压(TRV),导致断路器重燃而无法正常开断,危及线路和设备的安全运行^[4,5]。为防止该线路加入串抗后断路器 TRV 超过其绝缘水平,需要对不同故障下的 TRV 进行研究,以便采取相应的措施抑制 TRV。

1 网架结构及模型

江苏电网 500 kV 石牌—常熟南线路为双回线,总长约 30 km,导线采用四分裂 LGJ-400/35 型钢芯铝绞

线,分裂间距为 45 cm,地线采用 LLBJ-95/55 型,该线路相关网架结构如图 1 所示。串联电抗器采用干式空心结构,阻抗为 28 Ω,安装于石牌变出线端。以实际网架结构、电站及线路参数为基础,将与石牌站、常熟南站相连的变电站均等值为电源,石牌—常熟南双回线路采用分布阻抗模型,其他站与站之间的线路等值为集中参数阻抗,运用电力系统电磁暂态仿真计算软件 ATP/EMTP 建立模型对断路器 TRV 进行仿真计算。

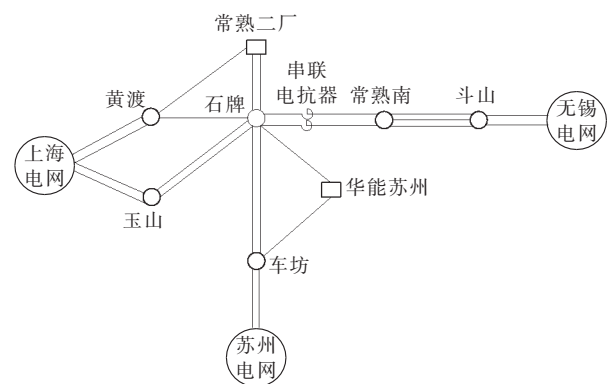


图 1 江苏电网 500 kV 网架结构示意图

2 断路器 TRV 分析

断路器 TRV 是指断路器电弧熄灭后,在断路器触头上出现的具有显著瞬变特性的恢复电压。该电压取决于回路和断路器的特性,由工频分量和暂态分量叠加而成。TRV 的波形随着实际回路的布置变化而不同。在某些情况下,特别是在电压 110 kV 及以上的系统,且短路电流相对于所考虑地点的最大短路电流而言是比较大的,TRV 包括一个高上升率的起始阶段,随之而来的较低上升率的阶段。这种波形一般可以用四参数法确定的 3 条线段组成的包络线充分地表示,如图 2 所示^[6]。图中曲线拐点处参数如表 1 所示。

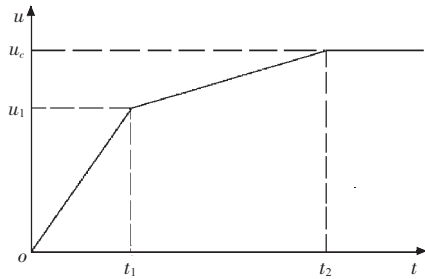


图2 用四参数参考线对规定的 TRV 波形的表示

表1 用四参数法表示的额定电压 550 kV 预期 TRV 的标准值

开断短路电流	第一参考电压 u_1 /kV	$t_1/\mu\text{s}$	TRV u_c /kV	$t_2/\mu\text{s}$	上升率 / $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
T100	438	219	817	876	2.0
T60	438	146	876	878	3.0

在系统电压高于 110 kV 而短路电流相对于最大短路电流较小且经过变压器供电的条件下,TRV 近似于一种阻尼的单频振荡。这种波形一般可以用两参数法确定的 2 条线段组成的包络线充分地表示,如图 3 所示。图中曲线拐点处参数如表 2 所示。

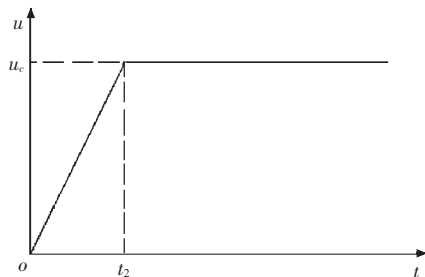


图3 用两参数参考线对规定的 TRV 波形的表示

表2 用两参数法表示的额定电压 550 kV 预期 TRV 的标准值

开断短路电流	TRV 峰值 u_c /kV	时间 $t_2/\mu\text{s}$	上升率 / $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
T30	893	179	5.0
T10	893	128	7.0

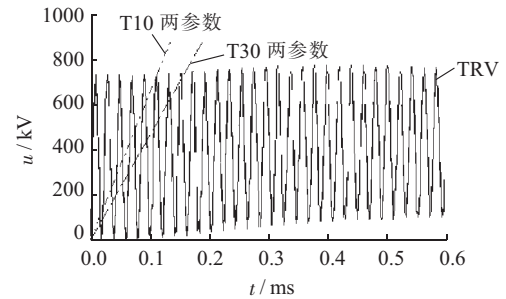
计算结果表明,石碑侧安装串联电抗器后,线路单相接地故障下,石碑侧最大短路电流为 9.26 kA;三相接地故障下,石碑侧最大短路电流为 13.35 kA。可见,石碑—常熟线路接地故障电流约为断路器额定开断短路电流 63 kA 的 21%,相对较小,因而本文计算参照两参数表示法标准,即断路器 TRV 波形在两参数表示法包络线之内时满足要求。

2.1 单相接地故障下 TRV 分析

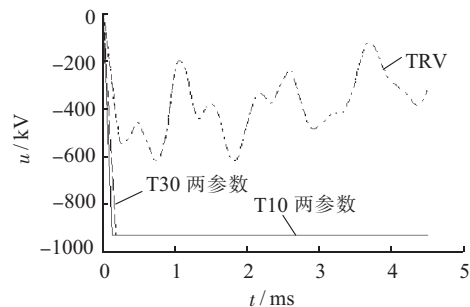
统计数据表明,超高压输电线路发生故障的时候,60%~70%为单相接地故障,因而有必要针对单相接地故障下断路器的 TRV 进行研究。当单相接地故障发生在不同位置时,因线路阻抗变化,会导致 TRV 有所区别。针对石碑侧串抗出线端、石碑侧近区(3 km)、线

路中点和常熟侧出线端 4 个位置发生故障进行计算。

当单相接地故障发生在串抗出线端时,石碑侧断路器 TRV 如图 4(a)所示,此时 TRV 较为严重,幅值达到约为 775 kV,振荡频率约 50 kHz,上升率为 12 kV/ μs ;常熟侧断路器 TRV 如图 4(b)所示,该侧电压幅值约 600 kV,上升率约为 2.5 kV/ μs ,可见常熟侧 TRV 满足两参数标准要求。



(a) 石碑侧断路器 TRV



(b) 常熟侧断路器 TRV

图4 串抗出线端发生单相接地故障时 TRV

单相接地故障发生在不同位置时石碑侧断路器 TRV 情况如表 3 所示。由表 3 可知,当石碑侧串抗出线端发生接地故障时,因没有线路阻抗限制其振荡电压,石碑侧断路器 TRV 最为严重;随着故障位置向常熟侧移动,石碑侧 TRV 幅值逐渐降低,但始终不满足两参数标准要求,在实际运行过程中可导致断路器重燃,无法正常开断,因而需要采取措施对其进行抑制。

表3 单相接地故障发生在不同位置时石碑侧断路器 TRV

单相接地故障	石碑侧 TRV 峰值/kV	上升率 / $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	是否满足两参数
石碑侧出线端	775	12	否
石碑侧近区	737	11.5	否
线路中点	654	11	否
常熟侧	592	10	否

2.2 TRV 抑制措施分析

由于 TRV 是由串抗与线路电容互相充放电产生振荡,根据 LC 振荡回路基本原理可知,增大电容可以降低振荡频率,因而可以在串抗上并联电容器以降低恢复电压上升率,抑制断路器 TRV,安装方式如图 5 所示。

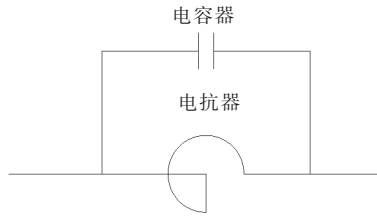


图5 串抗两端并联电容器接线示意图

当电容值为 $10\sim 50\text{ nF}$ 时,断路器 TRV 如表 4 所示,串抗上并联电容后,由于电容器的储能作用,振荡回路内能量增加,使断路器 TRV 幅值略有增大。当电容值大于或等于 35 nF 时,断路器 TRV 可满足两参数标准要求,如图 6 所示。

表 4 单相接地故障下串抗并联不同电容时石牌侧断路器 TRV

电容值 /nF	石牌侧 TRV 峰值 /kV	上升率 / $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	是否满足两参数
10	813	7.2	否
30	814	5.1	否
35	814	4.9	是
40	814	4.6	是
50	816	4.2	是

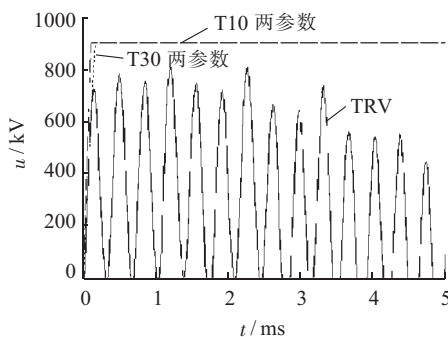


图6 串抗两端并联 35 nF 电容器时石牌侧断路器 TRV

3 结束语

基于江苏 500 kV 网架实际参数建立仿真模型,计算线路安装串联电抗器后断路器的 TRV,提出相应的抑制措施并进行了计算验证,得出以下结论:

(1) 石牌侧安装串联电抗器后,该侧断路器 TRV 幅值和上升率较高,且随故障位置不同有所差异,串抗出线端故障时最为严重,此时 TRV 恢复电压幅值为 775 kV ,上升率为 $12\text{ kV}/\mu\text{s}$,不满足标准要求,需要采取措施加以抑制。

(2) 在串联电抗器上并联 35 nF 以上的电容器可有效抑制石牌侧 TRV,使恢复电压上升率降低至 $5\text{ kV}/\mu\text{s}$,满足标准要求。

参考文献:

- [1] 齐晓曼,宋平.日本短路电流限制技术的研究和应用对华东电网的借鉴[J].华东电力,2010(10):1640-1644.
- [2] 叶琳,戴彦.短路电流限制技术在浙江电网的应用[J].华东电力,2005(5):23-26.
- [3] 赫涛,周敏,周圣.多断口断路器在我国及越南长距离输电线路的适用性[J].科技信息,2010(23):1022-1900.
- [4] 刘伟,孟庆刚,商姣,等.一种新型级联多电平动态电压恢复器的研究[J].江苏电机工程,2012,31(5):27-31.
- [5] 吉亚民,周志成,马勇,等.真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析[J].江苏电机工程,2014,33(2):12-14.
- [6] GB 1984—2003,高压交流断路器[S].

作者简介:

- 尹元明(1964),男,上海人,高级工程师,从事电力系统过电压方面的研究工作;
- 谢天喜(1983),男,湖北天门人,博士,从事电力设备结构优化及电力系统过电压方面的研究工作;
- 周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行及维护等方面的研究工作。

Analysis on Breaker TRV for 500 kV Lines with Series Reactors

YIN Yuanming¹, XIE Tianxi², ZHOU Zhicheng²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: For the 500 kV transmission lines with series reactors, high transient recovery voltages (TRVs) may be caused between the contacts of the breakers when they are dropping out short circuit currents. A serious TRV may result in a restrike, which makes cutting short circuit current off different. In his paper, a TRV simulation model for the 500 kV grid in Jiangsu province is constructed. There are two series reactors installed on the line between Shipai substation and Changshu South substation in the model. The TRVs are calculated when a single-phase earth fault occurred at different positions in the line. A protection scheme is proposed and verified by calculations. The results show that the TRVs are too high to meet the requirements in the standard when there are series reactors on the line without protections. The TRVs can be suppressed effectively by installing a parallel capacitor with reactor. The capacitance should be greater than 35 nF . This work provides a reference for the practical application of series reactor and protections against TRV in projects.

Key words: series reactor; shunt capacitor; TRV; breaker