

特高压输电线路继电保护特殊问题的研究

董新洲¹, 苏 斌¹, 薄志谦², 贺家李³

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. AREVA 输配电电能自动化与信息公司, 斯塔福特, 英国)

(3. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 300072)

摘要: 探讨了有关特高压线路保护的 2 个特殊问题: 一是保护动作顺序对限制线路过电压的必要性和效果; 二是特高压长线分布电容引起的电容充电电流对差动保护的影响。理论分析和仿真结果表明: 合理设置保护动作顺序可以有效限制故障开断过程中产生的过电压; 未采取补偿措施的分相电流差动保护不适合于特高压长距离输电线路。

关键词: 特高压输电线; 继电保护; 分布电容; 过电压

中图分类号: TM773; TM723

0 引言

由于特高压线路拥有明显的经济和技术优势, 因此在国外电力系统中得到广泛应用和发展。为了满足我国西北电网内部发展、大电源送出、区外西电东送等需要, 经过 20 多年的技术论证, 决定在西北地区建设 750 kV 系统。其中, 公伯峡水电站送出工程及 750 kV 示范工程是最关键的第 1 步^[1]。官厅—兰州东 1 回 146 km 的 750 kV 输电线路是我国第 1 条特高压线路, 标志着我国输变电技术发展到了一个新的高度, 对我国电力系统的发展具有非常重大的意义。750 kV 是我国新的电压等级, 加之我国西北地区特有的高海拔、恶劣气候等问题, 工程的各个环节都有许多新的问题需要研究, 因此需要针对新的电压等级带来的各种问题进行全面分析和研究。例如与 330 kV, 500 kV 等超高压线路相比, 750 kV 特高压线路输电容量更大, 线路距离更长, 所连接的系统短路容量大, 对系统的稳定影响亦大, 这些问题给特高压线路继电保护的设计和制造都提出了很高的要求。由于缺乏特高压线路继电保护的设计、制造和运行经验, 为了保证保护的可靠性和系统的安全稳定运行, 一方面, 应该积极借鉴国外特高压线路继电保护的设计经验, 少走弯路, 加快设计速度; 另一方面必须对有关超高压线路保护的基础理论问题、特别是一些特殊问题进行研究, 从而为设计和制造部门提供必要的理论依据。

1 两个特殊问题

特高压输电线路保护面临 2 个特殊问题: 一是由于线路电压等级高, 绝缘费用在整个输电线路建设和运行费用中所占比例增大, 如何保证在线路故障后以及随后的操作过程中降低过电压水平, 是过电压保护所要解决的问题, 也是继电保护所要解决的问题, 该问题的重要性甚至超过了对继电保护的速动性的要求; 二是由于线路自然功率大, 波阻抗小, 特高压长距离输电线路的分布电容电流将达到很高的水平, 如何在这个电容电流存在情况下保证继电保护的快速正确动作也必须予以认真考虑。

众所周知, 由于储能元件存在, 能量不能突变, 因此, 在高压长线空载投入和故障切除时将产生过电压。为保证在该过电压出现时绝缘子不被击穿, 可以采取的方案有: ①提高线路绝缘水平; ②通过合理配置和选择避雷器, 防止过电压损坏电气设备; ③增设并联电抗器; ④通过设置合理的继电保护动作顺序和断路器跳闸顺序来限制过电压, 让它不能达到高数值。方案 1 要增大投资; 方案 2 会引起避雷器安装点的对地导通, 从而引起继电保护动作范围扩大、停运设备增加; 方案 3 对于限制过电压是有用的, 但是一方面增大了投资, 另一方面与断路器的操作配合复杂; 方案 4 根本就不让线路上出现超过规定值的过电压, 当然是最好的方案, 但这个方案有效吗? 俄罗斯特高压线路保护运行经验和本文的分析说明了这一点^[2]。

高压长线分布电容的存在导致对地电容电流增加, 这是一个基本的电气现象, 对于一般的高压和超高压长线来讲, 问题并不严重。对于特高压输电线路而言, 该问题可能是致命的。例如: 分相电流差动

收稿日期: 2004-06-21; 修回日期: 2004-08-12。

国家自然科学基金资助项目(50077011, 50377019); 国家自然科学基金国际合作基金资助项目(50140430686)。

保护目前广泛应用于我国 500 kV 超高压输电线路,运行经验表明该保护是优秀的,能够满足快速有选择切除故障的要求。但是在特高压长距离情况下,电容电流将显著增大,差动保护能否正常工作?

本文围绕上述两个问题进行了初步理论分析和仿真研究,结果表明:制定合理的保护动作顺序,可以有效限制过电压水平;特高压长线分布电容电流的存在使得差动保护作为主保护面临困难,必须另辟蹊径。

2 过电压现象以及继电保护对过电压的限制作用分析

线路有多种运行方式,运行中会发生故障,对应地也有许多操作,包括正常操作和故障后分断操作。对于继电保护而言,故障后的分断和重合操作是重点考虑对象,它是继电保护直接作用的结果。例如:单相接地故障发生后,可能的继电保护动作情况是,单相故障跳单相,重合闸不成功跳三相;如果由于单相跳闸后的非全相运行产生的过电压数值过大,则应跳三相。事实上,由于两端保护动作时间不同,断路器动作特性差异,两端甚至同一端不同相不可能同时开断,这正是过电压产生的原因。以下围绕一个具体例子对断路器因为故障开断而产生的过电压现象以及限制措施进行分析说明。

图 1 为一个 750 kV 特高压输电系统,线路参数 $L_0=0.892$ mH/km, $C_0=13.2$ nF/km, $Z_c=260 \Omega$ 。

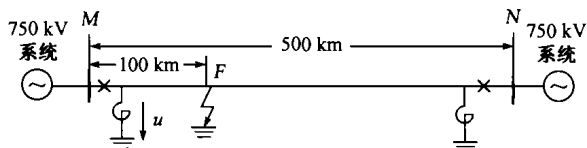
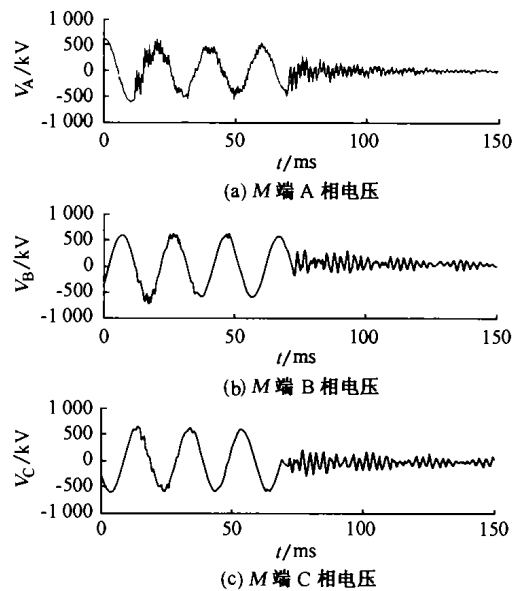


图 1 750 kV 输电系统
Fig. 1 750 kV transmission system

设正常运行的系统在线路 MN 的 F 点发生单相接地后,假定靠近故障点侧的保护(M 侧)先动作,而且三相同步跳闸,这时线路 M 端的线路侧电压计算结果如图 2 所示。

由图可见,故障切除后,线路 M 端电压经过微弱的振荡变为 0,两侧电压都不升高。这是理想开断方式,事实上断路器同步开断是无法做到的。

图 3 为上述故障后(12 ms),线路 M 侧保护动作同时(65 ms)切除三相线路,而 N 端保护不动作时的波形。此时,在 N 端电源作用下,故障相电压不高,因为故障依然存在;健全相 B,C 相电压达到很高的数值,约为 2 倍额定电压,这是不能接受的。



故障起始时刻为 12 ms, 断路器于 65 ms 开断

图 2 发生单相接地故障,两端断路器三相同步开断后 M 端三相电压

Fig. 2 Three-phase voltages when a phase A to ground fault occurs and the all breakers at the two-ends M and N operate

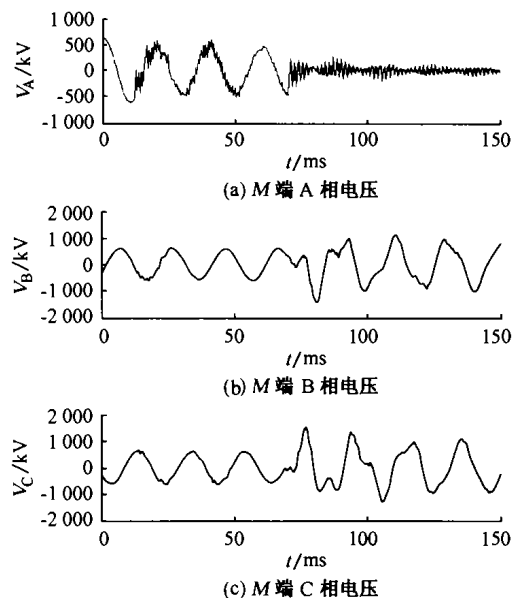


图 3 发生单相接地故障,只有 M 端断路器三相同步开断后 M 端三相电压

Fig. 3 Three-phase voltages when a phase A to ground fault occurs and the all breakers at the end M operate

图 4 给出了按照规定动作时间切除两端各相线路的过电压计算结果。动作顺序是:M 端 A 相在故障后 65 ms 时刻跳闸,接着在较短的时延后 N 端 A 相在 75 ms 跳闸;M 端健全相(B,C 相)在 A 相动作后 1 个周期即 85 ms 跳闸,接着 N 端健全相 B,C 相在 90 ms 跳闸。

在这组操作过程中,三相几乎都不出现过电压。

显然合理的继电保护动作顺序显著降低了故障操作过电压水平。

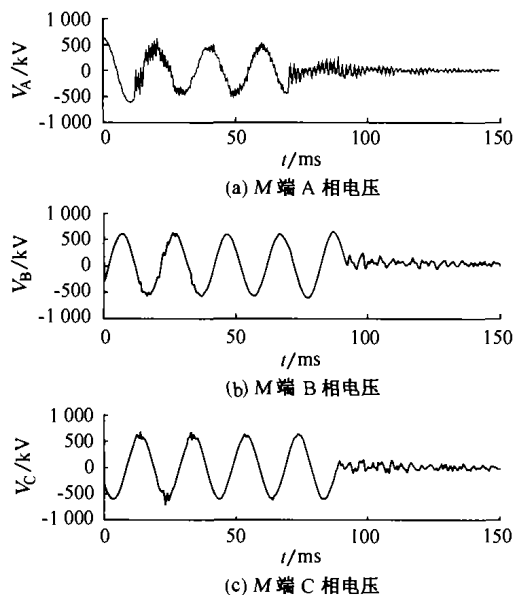


图4 发生单相接地故障后,两端各相断路器按照合理动作顺序开断后M端三相电压(0ms发生故障,两端按次序跳闸: $t_{MA}=65\text{ms}$, $t_{NA}=75\text{ms}$, $t_{MB}=t_{MC}=85\text{ms}$, $t_{NB}=t_{NC}=90\text{ms}$)

Fig. 4 Three-phase voltages at the end M when a phase A to ground fault occurs and the breakers operate according to a proper order

上述例子说明,由于线路电容存在,从故障发生到故障切除的过程中,由于不同时开断,这样在一端电源作用下,行波的来回折反射导致健全相出现了危险的过电压,严重危害系统安全运行。通过合理的保护动作顺序设定,过电压水平明显降低,系统安全性得到保证。

3 特高压长线分布电容以及分布电容电流的计算和分析

特高压线路自然功率大,波阻抗小,单位长度电容大,具体数值可以通过计算得到^[3,4]。根据西北750 kV线路结构(线路参数如第2节中所述),自然功率为2 163.5 MW,在自然功率下传输的电流为1 698 A,而每km电容电流为1.794 A,相当于每100 km为10%额定电流。

对于750 kV特高压线路,最佳输电半径在1 000 km及以上^[3,4],其电容电流将达到或超过100%额定电流,显然,这给差动保护整定带来极大困难。以下结合一个发生单相接地故障的系统说明差动保护应用于特高压输电线路的动作性能。仿真系统仍然采用图1。

a. 不加补偿电抗器,正常情况下保护会误动。

图5给出了图1系统发生单相接地后的线路

MN两端各相差动电流继电器的输出。由图可见,系统正常运行时,线路电容电流使得差动继电器有很大的差电流输出,其峰值是1 270 A,这个值是750 kV线路运行在自然功率情况下流过各相电流的52.88%($1\,270/1\,698=0.5288$);故障后(A相经400 Ω过渡电阻短路)电流是2 kA,二者差别不大,继电保护难以整定。

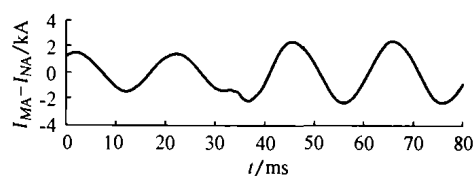


图5 正常运行和区内故障时差动继电器的输出
Fig. 5 Output of differential relay in the normal and internal fault

b. 增加并联电抗器后,差动保护能够保证区内故障正确动作。

按照上述情形,系统不能正常。实际上出于限制过电压的目的,特高压线路两端或一端常常安装并联电抗器,降低操作过程中可能出现的过电压。图6为图1系统在MN两侧安装全补偿电抗器后(每端容量约700 Mvar)的情形。这时并联电抗器产生的感性电流补偿了分布电容所产生的容性电流,差动继电器输出明显降低。内部故障时,合理地整定门槛能够保证继电保护正常动作。

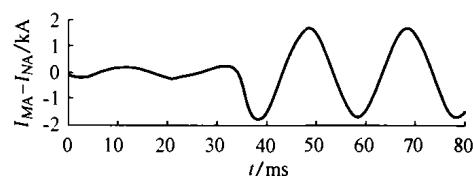


图6 带有并联电抗器时区内故障的差动继电器输出
Fig. 6 Output of differential relay in the normal and internal fault when the system is deployed with shunt reactors

c. 增加并联电抗器后,差动保护在区外故障时保护仍可能误动。

这种情况解决了内部故障的保护动作问题,但是却不能保证保护动作的选择性。图7为上述系统在区外故障时(线路N端母线出口处A相金属性短路)线路MN两端差动继电器输出,非常明显,巨大的非周期分量差电流出现在差动继电器中,线路MN两端保护仍可能误动。

根据本节分析可见,直接把传统的分相电流差动保护应用于特高压输电线路是困难的。当然,采取合理的补偿措施在一定场合能够解决这个问题。如果进一步考虑补偿算法都是以工频电容电流为补

偿对象,从根本上解决故障后暂态过程中的差动电容电流补偿问题,还需要研究不需要补偿的差动保护新原理。

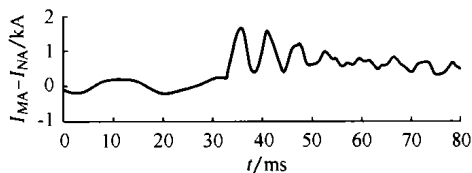


图7 带有并联电抗器时区外故障的差动继电器输出
Fig.7 Output of differential relay in the normal and external fault when the system is deployed with shunt reactors in the two ends of the line

4 结语

特高压输电线路具有电压高、线路长、输送功率大、波阻抗小、分布电容大、线路充电电容电流亦大等特点。这些特点导致特高压线路保护的目的在于传统保护:不是以快速切除故障或者尽量保持系统联络(比如单相重合闸的采用以提高暂态稳定性)为首要目的,而是限制线路过电压,保证设备及系统安全;特高压线路充电电容电流使得差动保护面临考验,必须寻找更合理的保护方式。有关特高压线路保护还存在不少问题,需要深入研究和探讨。

参考文献

- 1 国家电力公司西北电力设计院(Northwest Power Institute of State Power Network). 西北电网公伯峡水电站送出工程及

750 kV 示范工程可行性研究报告(Research Reports on the Feasibility of Transmission Engineering from Gongbo Gorge Waterpower Station of Northwest Power Network and 750 kV Model Engineering). 西安(Xi'an):2002

- 2 巴拉班诺夫·优(Barabanov Yoriy). 俄罗斯750千伏输电线路继电保护(Protection Relays of 750 kV Transmission Line in Russia). 贺家李,译(He Jiali, Trans). 见:北京电机工程学会学术报告会(In: Report of Academic Workshop of Beijing Society of Electrical Engineering). 北京(Beijing):2001
- 3 贺家李,李永丽,郭征,等(He Jiali, Li Yongli, Guo Zheng, et al). 特高压输电线路继电保护配置方案:(一)特高压输电线的结构与运行特点(Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part One Construction and Operation Characteristics). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(23):1~6
- 4 贺家李,李永丽,郭征,等(He Jiali, Li Yongli, Guo Zheng, et al). 特高压输电线路继电保护配置方案:(二)保护配置方案(Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part Two Disposition of Relay Protection). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(24):1~6

董新洲(1963—),男,博士,副教授,中国电机工程学会会员,IEEE高级会员,CIGRE B5-10委员,清华大学-AREVA继电保护与控制研究中心主任,主要研究方向为行波保护、行波测距、小波变换在电力系统中的应用、无通道保护。E-mail: xzdong@mail. tsinghua. edu. cn

苏斌(1977—),男,博士研究生,主要研究方向为特高压输电线路保护和带TCSC的线路保护。

薄志谦(1955—),男,博士,高级工程师,IEEE高级会员,主要研究方向为暂态保护、无通道保护。

STUDY OF SPECIAL PROBLEMS ON PROTECTIVE RELAYING OF UHV TRANSMISSION LINE

Dong Xinzhou¹, Su Bin¹, Bo Zhiqian², He Jiali³

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Energy Automation & Information, Transmission & Distribution, AREVA, Stafford, UK)

(3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper discusses two special problems on relay protection of ultra-high voltage (UHV) transmission line: one is the effect of protection relay operation order on surge voltage, and another is the influence of charge current caused by distributed capacitances in UHV long transmission line on the current differential protection. Theoretical analysis and simulation results show that: adjusting protection relay operation order can effectively limit the surge voltage formed by the operation of circuit breaker, and the existed phase current differential protection with no compensation measurements is unsuitable for UHV transmission lines.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50077011, 50377019) and International Cooperation Funds of NSFC (No. 50140430686).

Key words: ultra-high voltage (UHV) transmission line; protective relaying; distribution capacitance; surge voltage