

输电线路三相不平衡电流及高抗过补偿仿真分析

郑幸, 陈逸鹏, 齐冬辉

引用本文:

郑幸, 陈逸鹏, 齐冬辉. 输电线路三相不平衡电流及高抗过补偿仿真分析[J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 78-84.

ZHENG Xing, CHEN Yipeng, QI Donghui. Simulation Analysis of Three Phase Unbalanced Current and Over Compensation of High Voltage Reactor in Transmission Line[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 78-84.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于EMTP的高压输电工程电磁暂态研究](#)

Research on Electromagnetic Transient of HV Power Transmission Project Based on EMTP

南方能源建设. 2017, 4(1): 57-60 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.010>

[面向电网规划设计的电磁暂态仿真研究与应用](#)

Research and Application on Electromagnetic Transient Simulation for Power Grid Planning and Design

南方能源建设. 2018, 5(3): 19-25 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.003>

[Matlab/SPS与EMTP的操作过电压仿真分析及比较](#)

Switching Overvoltage Simulation Analysis and Comparision Between Matlab/SPS and EMTP

南方能源建设. 2015, 2(z1): 35-37,92 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.008>

[特高压同塔双回输电线路自然功率研究](#)

Research on the Surge Impedance Load of UHV Double Circuit Transmission Lines on the Same Tower

南方能源建设. 2016, 3(2): 53-57 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.010>

[避雷器安装方案对线路耐雷性能的影响研究](#)

Influence of Arrester Installation Scheme on Line Lightning Protection Performance

南方能源建设. 2017, 4(1): 75-80,101 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.014>

输电线路三相不平衡电流及高抗过补偿仿真分析

郑幸[✉], 陈逸鹏, 齐冬辉

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 超高压输电线路的安全稳定运行对电网安全至关重要, 在电网规划建设、新建变电站对原有长线路解口构网时, 可能出现以下问题: 如线路的三相不平衡电流不满足整定要求、线路高抗过补偿而产生过电压等, 这些问题严重威胁电网的安全稳定运行, 必须予以解决。[方法] 为了解决上述问题, 利用电磁暂态软件 ATP-EMTP, 依托同塔双回 500 kV 输电线路工程实例, 对线路中出现的三相不平衡电流与过电压等进行仿真研究, 以探究这些参数的影响因素与变化机理, 进而提出应对方案。[结果] 仿真结果表明, 影响同塔双回线路不平衡电流的主导因素包含换位与相序布置, 增加换位次数、采用逆相序布置可有效降低其不平衡电流水平; 影响工频谐振过电压的主要原因是补偿度是否接近全补偿, 过补偿时提高补偿度可降低恢复电压、但潜供电流会相对升高。[结论] 上述结论对电网规划建设与安全运行具有指导与借鉴意义, 可有效解决实际工程中相关问题。

关键词: 输电线路; 三相不平衡; 过补偿; ATP-EMTP

中图分类号: TM7; TM743

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)02-0078-07

开放科学(资源服务)二维码:



Simulation Analysis of Three Phase Unbalanced Current and Over Compensation of High Voltage Reactor in Transmission Line

ZHENG Xing[✉], CHEN Yipeng, QI Donghui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The safe and stable operation of UHV transmission lines is essential to the safety of power grids. When the new substation deconstructs the original long line in the power grid planning and construction, the following problems, such as the three-phase unbalanced current line does not meet the setting requirements, line high impedance over-compensation generates overvoltage, may occur. These problems may seriously threaten the safe and stable operation of the power grid and should be solved. [Method] In order to solve the above problems, the electromagnetic transient software ATP-EMTP was used to simulate the unbalanced current and overvoltage in 500 kV transmission lines on the same tower, so as to explore the influencing factors and change mechanism of these parameters, and then put forward countermeasures. [Results] The simulation results show that the main factors affecting the double circuit line's unbalanced current on the same tower include transposition and phase sequence arrangement. Increasing the number of transpositions can effectively reduce the unbalanced current level. By adopting a reverse phase sequence arrangement is also efficient. The main reason that affects the power frequency resonance over-voltage is whether the compensation degree is close to full compensation. During over-compensation, increasing the compensation degree can reduce the recovery voltage, but the potential supply current will increase relatively. [Conclusion] The above conclusions have guiding and reference significance for power grid planning, construction, and safe operation. Furthermore, it can effectively solve related problems in actual projects.

Key words: transmission line; three-phase imbalance; over compensation; ATP-EMTP

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2020-05-27 修回日期: 2020-10-26

基金项目: 中国能建广东院科技项目“适用于能源互联网的直流电网技术及应用”(GSKJ2-X06-2019)

伴随电网的不断发展完善与负荷密度的增大,在电网规划建设中,新建变电站对原有长线路解口成为一种常见的构网方式。此举缩短了站间线路长度,打破了原线路的平衡,可能出现以下问题:例如线路的三相不平衡电流不满足整定要求、线路高抗形成过补偿状态进而产生过电压等,对电网的安全稳定运行与检修维护构成重大威胁^[1-2]。超高压输电线路的安全稳定运行对电网安全至关重要,有必要对引起这些变化的关键问题与关键变量、依托工程实例、利用仿真工具进行定量研究,并提出应对方案。

目前在工程中已经遇到如下实例:(1)某500 kV变电站新建工程双解口了原220 km输电线路,原线路的均匀换位方式被打破,新形成的线路三相不平衡电流超过了整定要求,需新增换位塔或采用其他方式降低负序三相不平衡电流;(2)某500 kV电厂送出线路工程中,电厂~变电站线路长约205 km,远期有一开关站对该线路进行解口,解口后线路高抗将呈现过补偿状态,线路的潜供电流、恢复电压等电磁暂态参数不满足电网的运行要求。

针对以上工程中遇到的实际问题,本文拟对长距离输电线路的三相不平衡电流以及线路高抗过补偿方式等关键问题进行深入研究分析^[3-6],以得出能够指导电网设备选择和电网建设的相关结论,下文中不平衡电流若未特殊说明均为负序不平衡电流。

1 输电线路仿真模型选取

1.1 线路原始参数

本文研究以某电厂至某变电站同塔双回500 kV输电线路为基础模型。该线路途经多个地市,采用的塔型各不相同,各个塔型的对地高度及相间距离也各有不同,全线的土壤电阻率也变化较大。线路基本资料如下:线路总长205 km,全线采用同塔双回路设计,仿真模型中导线全线采用4×JL/LB1A-720/50型铝包钢芯铝绞线,地线全线采用2根48芯OPGW。结合远期开关站考虑,线路采用一个完整换位(中间设2基换位塔)。电厂至变电站线路两侧各配置有2×120 Mvar的高压并联电抗器,中性点小电抗采用1 600 Ω。

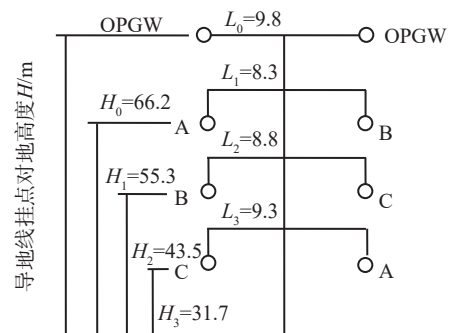
1.2 塔型选取及空间布置

为便于辨析不同因素对关键参数的影响程度,

本文在研究时将全线统一考虑为4×JL/LB1A-720/50导线,同时,为了更好地研究导地线变化对三相不平衡的影响,同一仿真模型中全线的塔采用统一塔型,仅研究的变量发生变化。杆塔导地线参数如表1所示。杆塔导地线布置及空间尺寸如图1所示。结合工程实际,本研究基于广东电网2020年夏大方式电力系统条件进行。

表1 仿真用输电线路主要资料
Tab. 1 The main data of transmission line for transient simulation

资料名称	资料内容示例
起止位置	J1~J2
线路长度	205 km
线路回路数	双回路
导线型号	4×JL/LB1A-720/50型铝包钢芯铝绞线,直径36.2 mm,分裂间距500 mm,20℃直流电阻0.039 1 Ω/km
地线型号	无普通地线
光纤参数	2根48芯OPGW,OPGW-48B1-120,直径15.2 mm,20℃直流电阻0.362 Ω/km。
土壤电阻率	1 500 Ω·m
地线运行方式	OPGW逐塔全部接地



注:导地线挂对杆塔中心横向距离 L (m)。

图1 相序排列及导地线空间位置

Fig. 1 Phase sequence arrangement and spatial position of ground wire

2 电流不平衡仿真研究

影响线路三相不平衡电流的因素较多,本文选取可能造成影响的几个因素分别进行仿真,选择的因素主要包括:换位次数、相序布置方式、土壤电阻率、地线接地形式、导线对地高度以及导线相间距离等,本节将对影响因素逐一进行仿真计算,分析各个因素对线路三相不平衡电流的影响程度。

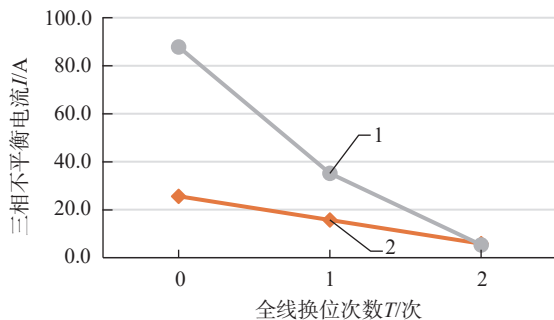
2.1 换位次数的影响

根据设计规定,超过100 km的长线路在设计过程中需适当进行线路换位。结合实际工程设计情况,本节计算在全线不换位、换1次位和换2次位的不同方式下,线路的三相不平衡电流情况。

全线1次换位时,换位点选在距离变电站100 km处;全线2次换位时,换位点选在距离变电站63 km处和128 km处。计算结果如图2所示。

根据仿真结果可知,在全线不换位的情况下,单回线路运行时线路的不平衡电流值最大,其中负序不平衡电流达到87.9 A。全线经过1次换位后,线路的不平衡电流有明显下降,最大不平衡电流为负序不平衡电流35.1 A。全线经过2次换位后,线路的不平衡电流降至最低,其中最大不平衡电流为负序不平衡电流,仅为4.6 A。

从不同运行方式来看,增加线路换位次数对线路双回运行和单回运行时的不平衡电流均有降低的效果,且对线路单回运行时的不平衡电流抑制效果更为明显。从图2可以看出,双回线路运行时,三相不平衡电流由25.6 A降低至5.9 A,下降幅度达到约77%;单回线路运行时,三相不平衡电流由87.9 A降低至4.6 A,下降幅度达到约95%。



注:线路运行方式:1-单回运行;2-双回运行。

图2 线路三相不平衡电流(不同换位次数)

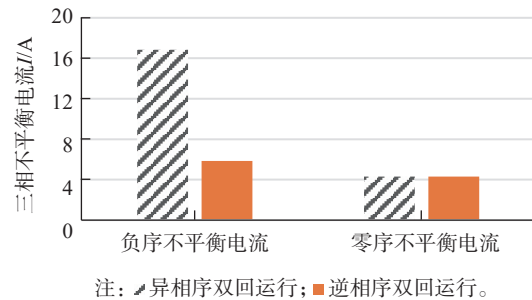
Fig. 2 Three-phase unbalanced current of the line (different transposition times)

综上,增加换位次数可以较好地抑制线路的三相不平衡电流,且对线路单回运行的抑制效果更优。因此,换位次数是影响线路三相不平衡电流的重要因素之一。

2.2 相序布置方式的影响

同塔双回线路在相序布置时经常采用异相序和逆相序两种相序布置方案,本节研究不同相序布置

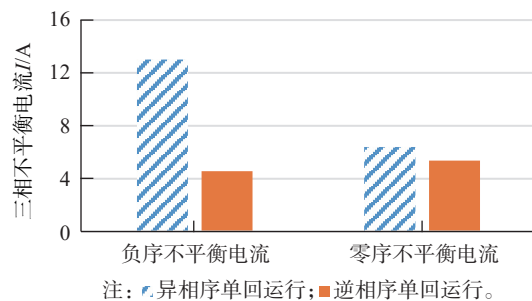
方案对线路的三相不平衡电流的影响。计算结果如图3~图4所示。



注:斜线填充为异相序双回运行;橙色填充为逆相序双回运行。

图3 线路三相不平衡电流(不同相序布置、双回运行)

Fig. 3 Three-phase unbalanced current of the line (different phase sequence layout, double circuit line operation)



注:斜线填充为异相序单回运行;橙色填充为逆相序单回运行。

图4 线路三相不平衡电流(不同相序布置、单回运行)

Fig. 4 Three-phase unbalanced current of the line (different phase sequence layout, single circuit line operation)

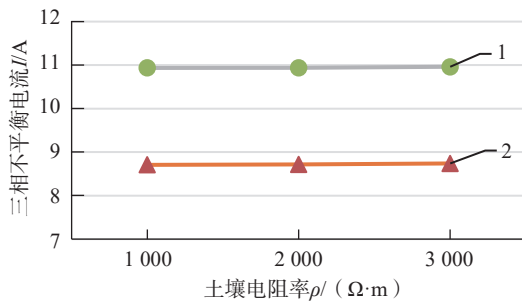
根据仿真结果可知,线路采用不同的相序布置方式对不平衡电流有较大影响。在其它条件全部相同的情况下,对异相序布置而言,线路采用逆相序布置时电厂至变电站线路负序不平衡电流由16.8 A下降至5.9 A,但不同相序布置方式对零序电流抑制效果并不明显。

在实际工程中,某线路最大负序不平衡电流约为144.8 A,超过了保护整定值(100 A),结合计算结果,采用调整相序的方式降低其负序不平衡电流。线路原布置方式为异相序(ABC-BCA),通过调整进线档线路相序的方式将相序调整为逆相序(ACB-BCA),调整后该线路的最大负序不平衡电流降低至约为72.1 A,在保护整定值范围内。

综上,逆相序布置相比异相序布置可以较好地抑制不平衡电流,尤其是负序不平衡电流,因此,相序布置方式是影响线路三相不平衡电流的重要因素之一。

2.3 土壤电阻率的影响

500 kV 电厂~变电站线路杆塔所经过的区域较多,土壤电阻率变化较大,大小在 $500\sim 2\,500\ \Omega\cdot\text{m}$ 范围中变化。在模型中将全线的土壤电阻率设定为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $1\,500\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $2\,500\ \Omega\cdot\text{m}$, 计算不同土壤电阻率下,全线的三相不平衡电流情况,计算结果如图5所示。



注:线路运行方式:1-单回运行;2-双回运行。

图5 线路三相不平衡电流(不同土壤电阻率)

Fig. 5 Three-phase unbalanced current of the line (different soil resistivity)

根据仿真结果可知,当土壤电阻率在 $500\ \Omega\cdot\text{m}\sim 2500\ \Omega\cdot\text{m}$ 范围内发生变化时,线路的不平衡电流只发生极微小的改变,表明输电线路沿线的土地电阻率对同塔双回线路之间的不平衡电流影响较小。因此,可以得出土壤电阻率不是影响三相不平衡电流的主导因素。

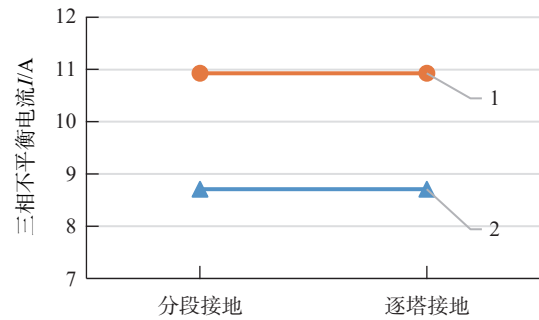
2.4 地线接地形式的影响

电厂至变电站线路全线为 OPGW 逐塔接地,在实际工程应用中,分段接地也是常见的地线接地形式。本节研究不同地线接地形式对线路三相不平衡电流的影响。在模型中将全线的地线接地形式设为逐塔接地和分段接地两种,分别计算全线的三相不平衡电流情况,计算结果如图6所示。

根据仿真结果可知,地线在不同接地形式下,线路的不平衡电流只发生极微小的改变,表明输电线路地线接地形式对同塔双回线路之间的不平衡电流影响较小。因此,可以得出地线接地形式不是影响三相不平衡电流的主导因素。

2.5 导线对地高度的影响

电厂至变电站线路在建设过程中跨越的地区较多,所经过的区域地形复杂,通常会通过调整杆塔呼称高或导线弧垂,改变导线对地高度来满足设计要求。本节根据典型设计和实际应用的塔型,

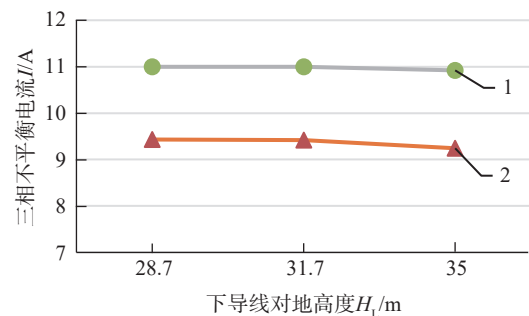


注:线路运行方式:1-单回运行;2-双回运行。

图6 线路三相不平衡电流(不同地线接地形式)

Fig. 6 Three-phase unbalanced current of the line (different types of ground wire)

选择了三种不同对地高度的塔型进行仿真,计算结果图7所示。



注:线路运行方式:1-单回运行;2-双回运行。

图7 线路三相不平衡电流(不同导线对地高度)

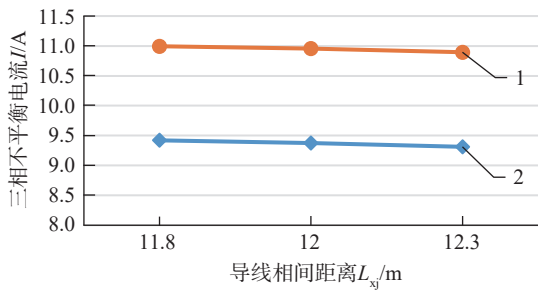
Fig. 7 Three-phase unbalanced current of the line (different height of conductor to ground)

根据仿真结果看出,当线路导线对地高度变化时,线路的不平衡电流只发生极微小的改变,表明导线的对地高度对同塔双回线路之间的不平衡电流影响较小。因此,可以得出导线对地高度不是影响三相不平衡电流的主导因素。

2.6 导线相间距离的影响

电厂至变电站线路在建设过程中跨越的地区较多,所经过的区域地形复杂,根据塔型的不同,导线的相间距离也有所不同,根据典型设计和实际应用的塔型,分别计算了相间距离为 11.8 m、12 m 和 12.3 m 三种不同导线相间距离的线路不平衡电流,计算结果如图8所示。

根据仿真结果看出,当线路导线相间距离变化时,线路的不平衡电流只发生极微小的改变,表明导线相间距离对同塔双回线路之间的不平衡电流影响较小。因此,可以得出导线相间距离不是影响三



注：线路运行方式：1-单回运行；2-双回运行。

图8 线路三相不平衡电流(不同导线相间距离)

Fig. 8 Three-phase unbalanced current of the line (Different interval distance of conductor)

相不平衡电流的主导因素。

3 高抗过补偿方案研究

线路高抗形成过补偿时，电磁暂态参数变化和补偿度以及全线换位次数息息相关^[7-8,9]。本文采用的线路基本模型仍为电厂至变电站双回线路解口后的开关站~变电站线路。为了拟定合理的高抗补偿度方案，对线路长度和其高抗配置进行调整，共拟定3个方案。

假设线路全长 170 km，其充电功率约为 204.9 Mvar，考虑分别两侧配置 120 Mvar、150 Mvar 以及 180 Mvar 的高抗，其补偿度分别达到 106%、133% 和 160%。假设开关站至变电站线路分别有 1 次换位或 2 次换位，若仅 1 次换位时换位点选取在变电站侧 80 km 处；若有 2 次换位时换位点选取在变电站侧 52 km 和 115 km 处。

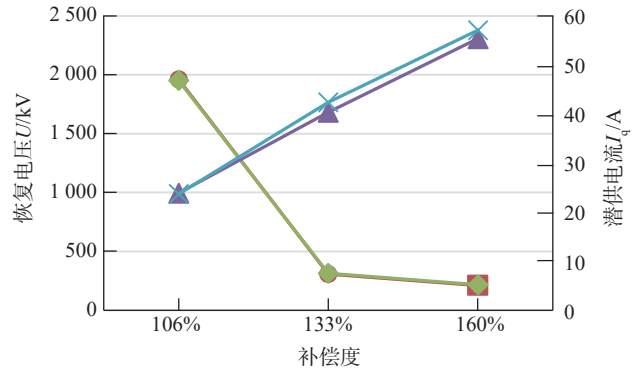
本章对以上几种过补偿方案下线路潜供电流、恢复电压和谐振过电压进行仿真计算。

3.1 恢复电压和潜供电流

潜供电流与恢复电压增加了故障点自动熄弧的困难，可能导致单相自动重合闸失败，从而影响到供电安全与系统稳定，是线路重要的电磁暂态特性^[10-11]。

根据仿真结果可知(如图9所示)，在全线1次换位的条件下，补偿度为106%时，线路的恢复电压最高达到约1962.2 kV，显然已经远远超过恢复电压的限制范围，潜供电流最大约为23.7 A。当线路补偿度提高到133%时，线路的恢复电压有明显的下降，最大值约为315.7 kV，下降幅度达到83.8%，但潜供电流明显升高，潜供电流最大值达到42.4 A。当补偿度进一步提升至160%时，恢复

电压又有进一步的下降，最大值约为217.6 kV，下降幅度达到88.8%，潜供电流进一步升高，潜供电流值最大值达到57.1 A。



注：—●— 卧龙侧；—◇— 开关站侧；—▲— 卧龙侧；—×— 开关站侧。

图9 潜供电流和恢复电压(1次换位)

Fig. 9 Secondary supply current and recovery voltage (1 transposition)

综上所述，这三种过补偿方式下的线路的潜供电流和恢复电压都相对偏高，虽然随着补偿度的提高，恢复电压有明显的下降，但潜供电流却不断升高。

在全线2次换位情况下(如图10所示)，补偿度为106%时，线路恢复电压最高达到约1027.2 kV，潜供电流最大约为18.8 A。当线路补偿度提高到133%时，线路的恢复电压有明显的下降，最大值约为290.9 kV，下降幅度达到71.3%，但潜供电流明显升高，潜供电流最大值达到34.7 A。当补偿度进一步提升至160%时，恢复电压又有进一步的下降，最大值约为217.6 kV，下降幅度达到80%，潜供电流进一步升高，潜供电流值最大值达到52.1 A。

综上所述，在2次换位时，这三种过补偿方式下的线路的潜供电流和恢复电压变化趋势和1次换位基本一致。随着补偿度的升高，潜供电流升高，但恢复电压大幅下降。

进一步对比线路1次换位和2次换位的潜供电流及恢复电压结果可以看到(如图11所示)，同样是补偿度为106%，2次换位时线路的恢复电压较1次换位下降了将近一半。而补偿度为133%和160%时，恢复电压也有所下降，但下降幅度相对有限。潜供电流方面，2次换位的潜供电流较1次换位整体呈下降趋势，下降幅度为5~6 A。

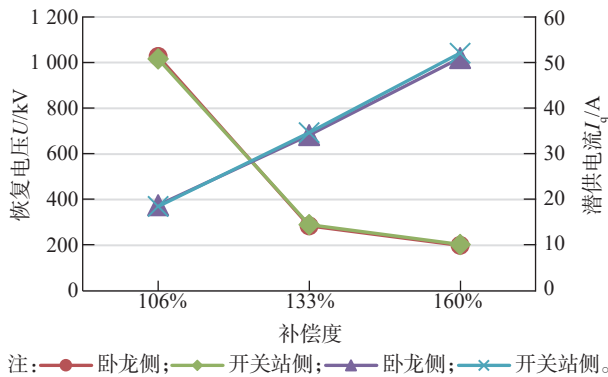


图 10 潜供电流和恢复电压(2次换位)
Fig. 10 Secondary supply current and recovery voltage (2 transpositions)

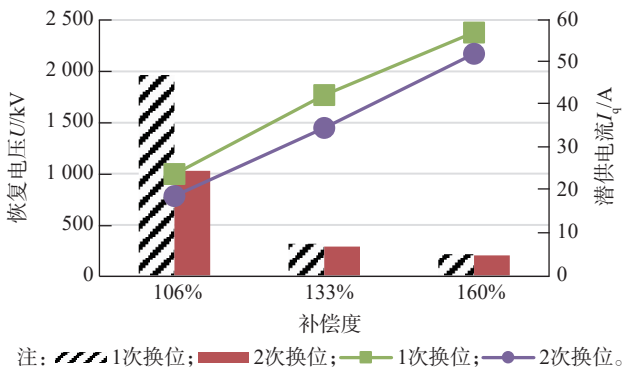


图 11 潜供电流和恢复电压(不同换位次数)
Fig. 11 Secondary supply current and recovery voltage (different transposition times)

综上可知,合理的线路换位次数可以在一定程度上降低恢复电压和潜供电流,但随着补偿度的提升,降低的幅度将逐渐减弱。

3.2 工频谐振过电压

线路上装设高压并联电抗器时,需要校核输电线路非全相运行时是否发生工频电压谐振^[12]。

根据仿真结果可知,补偿度为 106%,线路发生非全相运行时,断开相电压最高 1 027 kV,出现了工频谐振。

补偿度为 133% 时,线路发生非全相运行时,断开相电压最高 291 kV,未出现工频谐振。补偿度为 160% 时,线路发生非全相运行时,断开相电压最高 204 kV,未出现工频谐振。

综上可知,随着补偿度的提高,无论是线路单回运行还是双回运行方式下,过电压均有下降。线路高抗补偿度为 106% 这种接近全补偿的方案下易产生工频谐振,不建议采用,易对设备造成恶劣

影响。

3.3 工频谐振过电压抑制措施

根据 3.2 的结论可知,补偿度为 133% 和 160% 的方案下,线路虽未出现工频谐振,但其过电压仍较高,不利于设备的安全,这种情况可考虑通过调整并联电抗器的中性点小电抗的阻值来降低工频过电压。

调整并联电抗器中性点小电抗的阻值可以补偿相间电容,增大相间阻抗,若选择合适的中性点小电抗的阻值,补偿相间电容,可使相间发生并联谐振,相间阻抗为无穷大,从而使电源电压都施加在相间阻抗上,断开相上的工频感应电压就很小,接近于零。因此,调整并联电抗器中性点小电抗的阻值,可有效限制断开相上的工频感应电压。

以补偿度为 133%,线路 2 次换位的方案为例,分别计算开关站侧中性点小电抗阻值为 300~1 600 Ω 时线路工频过电压,计算结果如图 12 所示。从仿真结果可以看出,线路的过电压随着中性点小电抗阻值的变化呈现一个 U 字型,且最低点出现在阻抗为 400~500 Ω ,若线路高抗维持不变,可将高抗的中性点小电抗调整为该范围,降低线路的工频过电压。

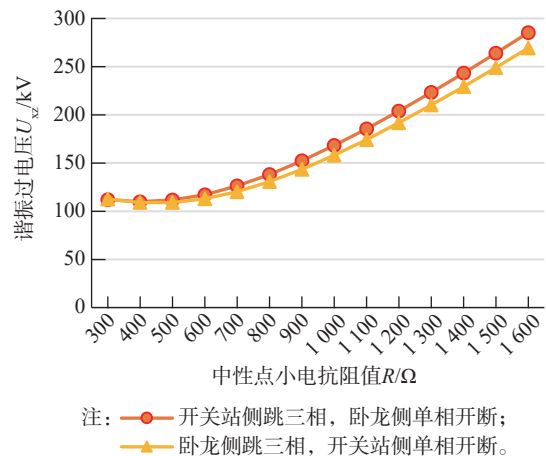


图 12 线路谐振过电压
Fig. 12 Line resonance overvoltage

4 结 论

本文对线路三相不平衡电流的影响因素以及线路高抗过补偿的方案进行了仿真研究,结果表明:

线路的换位次数和相序布置方式对三相不平衡电流的影响较大,是主要的影响因素。线路的土壤

电阻率、地线接地形式、导线对地高度以及导线相间距离对三相不平衡电流影响较小。线路采用合理的换位次数,能够将三相不平衡电流降低至较低水平,同样换位次数情况下,线路采用逆相序布置相对于异相序布置能够更好地降低其三相不平衡电流水平。

高抗过补偿方式下线路的潜供电流和恢复电压普遍偏高,且当补偿度接近全补偿时,会出现工频谐振过电压。因此,在对原有长线路解口后,若线路出现过补偿情况,需要校核其恢复电压和潜供电流、工频谐振过电压等电磁暂态特性,必要时可通过调整高抗的中性点小电抗的阻值来降低工频过电压。

参考文献:

- [1] 电力规划设计总院. 电力系统设计技术规程:DL/T 5429—2009 [S]. 北京:中国电力出版社,2009.
China Electrical Planning & Design Institute Co., Ltd.. Technical code of design for the electric power system:DL/T 5429—2009 [S]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [2] 单蒙,刘为雄. 基于EMTP的高压输电工程电磁暂态研究[J]. 南方能源建设,2017,4(1):57-60.
SHAN M, LIU W X. Research on electromagnetic transient of HV power transmission project based on EMTP [J]. Southern Energy Construction,2017,4(1):57-60.
- [3] 和彦森,宋杲,曹荣江,等. 1 000 kV特高压输电线路潜供电弧试验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):138-143.
HE Y M, SONG G, CAO R J, et al. Test research of secondary arc in 1 000 kV UHV double-circuit transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(16):138-143.
- [4] 曹祥麟. EMTP在特高压交流输电研究中的应用[J]. 高电压技术,2006(7):64-68.
CAO X L. Application of EMTP in the research of UHV AC power transmission [J]. High Voltage Engineering,2006(7):64-68.
- [5] 陈子辉,吴智影,刘贺,等. 电压偏差及三相不平衡对电缆线路损耗的影响[J]. 广东电力,2020,30(5):125-132.
CHEN Z H, WU Z Y, LIU H, et al. Influence of voltage deviation and three-phase unbalance on cable line loss [J]. Guangdong Electric Power,2020,30(5):125-132.
- [6] 刘为雄,曹祥麟,黄庆云,等. 面向电网规划设计的电磁暂态仿真研究与应用[J]. 南方能源建设,2018,5(3):19-25.
LIU W X, CAO X L, HUANG Q Y, et al. Research and application on electromagnetic transient simulation for power grid planning and design [J]. Southern Energy Construction,2018,5(3):19-25.
- [7] 易强,周浩,计荣荣,等. 特高压线路高抗补偿方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(20):98-105.
YI Q, ZHOU H, JI R R, et al. Research on high-voltage reactor compensation of UHV AC transmission lines [J]. Power System Protection and Control,2011,39(20):98-105.
- [8] 李振强,刘昊昕,娄颖. 高抗过补偿对500 kV输电线路电磁暂态的影响研究[J]. 高压电器,2015,51(5):53-58.
LI Z Q, LIU H X, LOU Y. Influence of high voltage shunt reactor overcompensation on the electromagnetic transient of 500 kV transmission line [J]. High Voltage Apparatus,2015(5):53-58.
- [9] 杜斌祥,张友鹏,田铭兴,等. 特高压可控并联电抗器补偿度的研究[J]. 高压电器,2010,46(11):5-8+11.
DU B X, ZHANG Y P, TIAN M X, et al. Research on compensation degree of UHV controllable shunt reactor [J]. High Voltage Apparatus,2010,46(11):5-8+11.
- [10] 李海生,李洪坤,张健全,等. 500 kV并行双回架设线路高抗隔离开关感应电流仿真分析[J]. 电子世界,2017(20):100-103.
LI H S, LI H K, ZHANG J Q, et al. Simulation analysis of induced current of high reactance disconnector for 500 kV parallel double circuit line [J]. Electronic World,2017(20):100-103.
- [11] 商立群,施围. 同杆双回输电线路的潜供电流与恢复电压[J]. 高电压技术,2003(10):22-23+31.
SHANG L Q, SHI W. Study on secondary arc current and recovery voltage on double-circuit lines on the same pole [J]. High Voltage Engineering,2003(10):22-23+31.
- [12] 陈维贤. 超高压长线路中的工频谐振[J]. 中国电机工程学报,1989,9(2):1-10.
CHEN W X. Power frequency resonance in UHV long transmission lines [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,1989,9(2):1-10.

作者简介:



郑幸

陈逸鹏

1989-, 男, 广东广州人, 工程师, 广东工业大学电气工程硕士, 主要从事电力系统规划及设计 (e-mail) chen-yipeng@gedi.com.cn。

郑幸 (通信作者)

1987-, 女, 湖南长沙人, 高级工程师, 华中科技大学工学硕士, 主要从事电力系统规划研究及设计工作 (e-mail) zhengxing@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)