

同杆多回输电线路感应电计算及分析

严伟佳, 邹 铁

(苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 推导了同杆架设多回输电线路感应电压电流的计算公式, 并由此得出停运线路上感应电压电流是由各运行回路对其单独作用产生的结果相量叠加而成。进一步对运行回路在不同相位排列下停运线路上感应电的大小进行了计算研究, 得出通过合理安排运行线路相位可以有效减小线路感应电的结论。

关键词: 多回输电线路; 感应电压; 感应电流; 静电感应; 电磁感应; 相量叠加

中图分类号: TM725

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)02-0067-03

随着我国经济不断发展, 线路通道所需的土地成本不断增加, 为有效减小线路走廊及建设费用, 同杆并架双回线路运用已经十分普及, 同时, 同杆多回输电线路使用也逐渐增多。对于同杆架设双回线路感应电压电流的计算研究以及相应的防范措施国内已有多篇文献做过介绍^[1-4], 而四回路甚至更多回路感应电压的计算研究还未见有文献报道。本文以一四回路为例计算并分析其感应电压电流。

1 感应电压电流计算方法

1.1 输电线路电压降的相量方程

$$-\begin{bmatrix} \frac{dV_1}{dx} \\ \frac{dV_2}{dx} \\ \dots \\ \frac{dV_n}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: V 为导线 i 对地电压相量; I 为导线 i 的电流相量; Z 为导线阻抗矩阵。

1.2 输电线路电压与电荷方程

$$-\frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} \frac{dI_1}{dx} \\ \frac{dI_2}{dx} \\ \dots \\ \frac{dI_n}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: V 为导线 i 对地电压相量; I 为导线 i 的电流相量; C 为导线电容矩阵。

1.3 感应电压、电流公式推导

式(1,2)完整地描述了 n 根导线在交流稳态下的电压电流方程^[5]。假设第 n 根导线停运, 计算其他运行导线对其产生的感应电压电流。

1.3.1 静电感应电压计算

导线两端开路情况, 第 n 根导线的静电感应电压计算公式。根据方程式(2), $I_n=0$, $dI_n/dx=0$, 将第 n 行展开可得:

$$V_n = -(C_{n1} \times V_1 + C_{n2} \times V_2 + \dots + C_{n(n-1)} \times V_{n-1}) / C_{nn} \quad (3)$$

1.3.2 电磁感应电压电流计算

导线两端断开时, 电磁感应电压计算公式。根据方程式(1), 其中 $I_n=0$, 将第 n 行展开可得:

$$dV_n/dx = -(Z_{n1} \times I_1 + Z_{n2} \times I_2 + \dots + Z_{n(n-1)} \times I_{n-1}) \quad (4)$$

设线路上各点电压均匀分布, 则:

$$V_n = -L \times (Z_{n1} \times I_1 + Z_{n2} \times I_2 + \dots + Z_{n(n-1)} \times I_{n-1}) \quad (5)$$

导线两端接地时, 接地电阻为 Z , 则电磁感应电流为:

$$I_n = V_n / (Z_{nn} + 2Z) \quad (6)$$

从感应电压电流的计算公式可以得出, 停运导线上感应电压电流可以由各相运行导线分别对其产生的值相量叠加而得。根据这个结论, 可以定量分析各运行回路单独对停运线路产生的感应电的贡献, 并据此研究减小感应电压电流的方法。

2 计算验证分析

2.1 计算验证

采用 EMTP 计算验证相量叠加的正确性。选择苏州地区已投入运行的一条同杆架设四回线路, 取回路 1、回路 2、回路 3 作为验证算例, 回路 3 停电检修。塔形如图 1 所示, 混压四回线路长 13.54 km, 回路 1、回路 2 为 500 kV, 导线型号为 4×LGJ630/45, 绝缘子平均长度以 5 m 计算, 导线弧垂平均以 10 m 计, 回路 3、回路 4 为 220 kV, 导线型号为 2×LGJ630/45, 绝缘子平均长度以 2 m 计算, 导线弧垂平均以 8 m 计。500 kV 回路 1、回路 2 负荷电流 770 A, 回路 1 相位从上至下为 a, b, c; 回路 2 相位从上至下 b, c, a。

利用 EMTP 的 LCC 中 9 根导线模型搭建三回

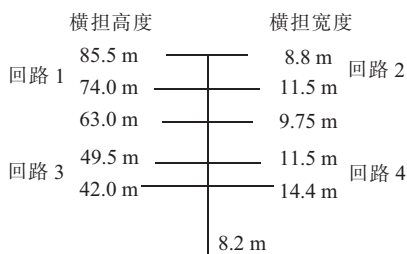


图 1 杆塔结构图

输电线路模型。首先,分别计算出回路 1、回路 2 单独对停电回路 3 上相作用产生的感应电压电流;然后,计算回路 1、回路 2 共同对回路 3 作用产生的感应电压电流;最后,将共同作用结果与相量叠加的结果对比,判断相量叠加的正确性。为了直观,本文使用有效值和相角的形式表示感应电压电流大小,其中两端开路 and 一端接地时为电压值,两端接地时为回路电流值,电磁感应两端开路电压为线路两端电压差。停运线路静电感应、电磁感应计算结果如表 1 所示。

对比回路 1、回路 2 相量叠加与回路 1、回路 2 共同作用的结果,两者完全吻合,可见停运线路上感应电压电流可由各回路单独作用产生的结果相量叠加而得,这与理论推导是一致的。

2.2 感应电分析

从表 1 数据可见,在停运线路两端开路情况下,静电感应电压很大,可达几十 kV,但只要一端接地,静电感应电压立刻大大降低,只有几 V,因此通过接地来降低线路静电感应电压是十分有效的措施^[6]。而两端接地情况下,会产生几 A 的容性电流。根据电磁感应电压产生原理,线路两端开路及一端接地情况下感应电压相同,有几百 V,比静电感应电压小很多。而当两端接地形成回路后,电磁感应电流可达几十 A,在连接或开断接地线时,有可能拉弧放电,因此要特别注意绝缘工作^[7]。多回路输电线路系统中的各感应量中,停运线路两端开路情况下的静电感应电压和两端接地情况下的电磁感应电流数值较大,在检修维护作业中需要特别关注,并加以防范。

3 不同相位下感应电压电流研究

多回输电线路系统中,停运线路上的感应电压

电流是由各运行回路产生感应电的相量叠加而得,因此,运行回路之间相对相位不同,产生的感应电的叠加也将不同。从相量叠加原理可知,只要令运行两回路分别产生的感应电压电流相位反相或者尽量靠近反相,那么就能使感应电相互抵消,达到减小感应电的目的。

以实例线路为例。假设回路 1 相位固定,从上至下为 a,b,c,回路 2 从上至下可能的 6 种相位分别列出,计算由其单独作用产生的感应电压电流值。比较两端开路静电感应电压和两端接地电磁感应电流,计算结果如表 2 所示。从表中的计算结果可见,当回路 2 相位从 a,b,c 变为 b,c,a 时,也即电源相位前移 120° ,产生的感应电压电流有效值不变,而相位角相应超前 120° ,这与感应电理论计算公式也是相符的。根据这个结论,6 种相位排列中,只需计算 2 种独立相位关系(如 a,b,c 和 a,c,b)下产生的感应电压电流,另外 4 种相位排列下的感应电压电流可以由此推算而得。

回路 1 产生的静电感应电压为 $72.4 \angle -126.1$ kV,其对应的反向角为 53.9° ,从表 2 中可见 c,b,a 相位下产生的相位角 77.0° 最为靠近,即相量叠加结果最小。回路 1 产生的电磁感应电流为 $37.1 \angle 70.9$ A,其对应的反向角为 -109.1° ,从表中可见 c,b,a 相位下产生的相位角 -128.6° 最为靠近。综上所述,在回路 2 相位为 c,b,a 时,静电感应电压和电磁感应电流相量叠加结果同时为最小。计算在回路 2 相位为 c,b,a 时产生的感应电压电流值如表 3 所示。从共同作用的结果也即相量叠加可见,在合适的相位排列情况下,两回路通过相量叠加最大限度相互消减,感应电大大地减小了。相反,如果相位排列不合适,如回路 2 相位为 a,b,c 时,两回路相量叠加相互加强,那么感应电也将更加严重。同样计算可得中相、下相也在回路 2 相位为 c,b,a 时产生的感应电压电流最小。因此,通过运行回路相位的合理排列,可以有效降低感应电压电流的大小。

4 结束语

(1) 从理论推导和实例验证计算得出停运线路

表 1 感应电压电流相量叠加仿真实验

感应电类型	接地形式	回路 1 单独作用	回路 2 单独作用	回路 1、回路 2 共同作用	回路 1、回路 2 相量叠加
静电感应	两端开路电压 /kV	$41.8 \angle -126.1$	$26.2 \angle -17.0$	$41.5 \angle -89.4$	$41.5 \angle -89.4$
	一端接地电压 /V	$1.27 \angle -39.7$	$0.80 \angle -0.44$	$1.96 \angle -24.6$	$1.95 \angle -24.6$
	两端接地电流 /A	$1.29 \angle 147.5$	$0.72 \angle -104.8$	$1.28 \angle -179.8$	$1.28 \angle -179.9$
电磁感应	两端开路电压 /V	$470.0 \angle 146.0$	$295.6 \angle -99.0$	$437.1 \angle -176.2$	$437.1 \angle -176.2$
	一端接地电压 /V	$470.0 \angle 146.0$	$295.6 \angle -99.0$	$437.1 \angle -176.2$	$437.1 \angle -176.2$
	两端接地电流 /A	$37.1 \angle 70.9$	$11.8 \angle -171.1$	$33.2 \angle 89.1$	$33.2 \angle 89.2$

表2 不同相位下感应电压电流值

相位	a, b, c	b, c, a	c, a, b
两端开路静电感应电压 /kV	26.2∠-137.0	26.2∠-17.0	26.2∠103.0
两端接地电磁感应电流 /A	11.8∠68.9	11.8∠-171.1	11.8∠-51.1

相位	a, c, b	c, b, a	b, a, c
两端开路静电感应电压 /kV	26.2∠-43.0	26.2∠77.0	26.2∠-163.0
两端接地电磁感应电流 /A	14.8∠111.4	14.8∠-128.6	14.8∠-8.6

表3 c, b, a 相位下感应电压电流值

感应电类型	回路1	回路2	回路1、回路2共同作用
两端开路静电感应电压 /kV	41.8∠-126.1	26.2∠77.0	20.4∠-156.3
两端接地电磁感应电流 /A	37.1∠70.9	14.8∠-128.6	23.7∠82.9

上感应电压电流可由各运行回路对其单独作用产生的结果相量叠加而得。

(2) 通过对一条实际投入运行的 500 kV, 220 kV 混压四回路线路的感应电压电流进行计算, 得出两端开路静电感应电压和两端短路电磁感应电流数值较大, 在实际线路运行维护中需要进行重点关注。

同时, 通过接地可以有效地降低静电感应电压。

(3) 根据相量叠加原理对各种相位排列情况下的感应电压电流进行了计算分析, 得出通过合理的相位排列可使各运行回路对停电回路产生的感应电压电流达到最大程度的消减, 有效减小多回输电线路感应电压电流。

参考文献:

- [1] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生. 同杆双回线路感应电压和感应电流测量与计算[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 140-142.
- [2] 尤爱秀. 输电线路感应电压分析与计算[J]. 山西电力技术, 2000, 95(6): 14-16.
- [3] 胡毅, 裴定珍. 500 kV 同塔双回线路感应电压的计算及安全作业方式[J]. 中国电力, 2000, 33(6): 45-47.
- [4] 胡毅, 裴定珍, 王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 31-33.
- [5] 张文亮, 谷定燮, 方文弟, 等. 洪龙 500 kV 带高抗同杆双回线路间的感应作用研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 10-12.
- [6] 韦钢, 李海峰. 同杆并架多回线下方的电场强度和感应电压[J]. 中国电力, 1999, 32(3): 37-40.
- [7] 钱鑫, 施围. 同杆并架双回路不同换位下模量分析[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 24-27.

作者简介:

严伟佳(1981), 男, 江苏常熟人, 工程师, 从事输电线路运行检修等方面的研究工作;

邹铁(1974), 男, 江苏常熟人, 高级技师, 从事输电线路运行检修等方面的研究工作。

Calculation and Analysis of Induced Voltage and Current on Multi-circuit Transmission line

YAN Wei-jia, ZHOU Tie

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: This paper first deduced the calculation formula of induction voltage and current of multiple loop transmission lines, and concluded that the induction voltage and current of outage line could be calculated by operating lines vector superposition of their separate outcome. Furthermore, induction voltage and current of idle transmission line under different phase arrangement were calculated, which showed that lines induced voltage current could be reduced through reasonable arrangement of running line phase.

Key words: multi-circuit transmission line; induced voltage; induced current; static induction; electromagnetic induction; vector superposition

(上接第 66 页)

Application of Ultraviolet Corona Detection Technology in Outer Insulating State Evaluation

ZHU Xiao-qin

(Nantong Power Supply Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Ultraviolet corona detection technology is a comprehensive technology to judge whether equipment works normally by some information obtained by applying ultraviolet imaging technology. This information is the ultraviolet radiation information when corona, flashover or arc discharging happens in equipment. Current application situation, prospects and typical cases of this technology in power system were presented in this paper. The application of ultraviolet corona detection technology in equipment outer insulation status evaluation is introduced through an example.

Key words: ultraviolet corona detection; defect; status evaluation