

# 500 kV 同塔双回输电线路感应电压和感应电流建模分析

唐浩龙, 樊艳, 冯千秀, 牟婷婷

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:**考虑到同塔双回输电线路一回运行、一回停运时,在停运线路上可能产生较大的感应电压和感应电流,对检修人员和设备产生一定的安全隐患。为了研究不同运行工况下的感应电压和感应电流,利用 ATP-EMPT 软件建立了 500 kV 同塔双回架空输电线路仿真模型;计算分析了线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响;最后,利用混合差分进化-粒子群优化算法对上述影响因素与感应电压和感应电流进行多变量拟合。结果表明:线路长度对电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流影响较大;输送功率对电磁感应电压和电磁感应电流影响较为显著;运行电压对静电感应电压、电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流均有影响,几乎均成正比关系;土壤电阻率对电磁感应电压和电磁感应电流有一定影响。通过多元拟合分析,建立了上述影响因素与感应电压和感应电流的函数关系,为后续工程中感应电压、感应电流的估算提供了参考。

**关键词:**同塔双回;感应电压;感应电流;多元拟合

中图分类号:TM 723 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0041-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220307

## Modeling and Analysis of Induced Voltage and Induced Current of 500 kV Double-circuit Transmission Lines on the Same Tower

TANG Haolong, FAN Yan, FENG Qianxiu, MOU Tingting

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

**Abstract:** When one circuit of transmission line operates and the other circuit of transmission line stops, large induced voltage and induced current may be generated on the shutdown line, which has certain potential safety hazards for operators and equipment. In order to study the induced voltage and induced current under different operating conditions, a simulation model of 500 kV double-circuit overhead transmission line on the same tower is established by using ATP-EMPT software. Then, the effects of line length, transmission power, operating voltage and soil resistivity on induced voltage and induced current are calculated and analyzed by the model. Finally, the hybrid differential evolution-particle swarm optimization algorithm is used to fit the formula of induced voltage and induced current. The results show that: the line length has a great influence on the electromagnetic induced voltage, electrostatic induced current and electromagnetic induced current. The transmission power has a significant effect on electromagnetic induced voltage and electromagnetic induced current. The operating voltage has an effect on the induced voltage and induced current, almost in direct proportion. Soil resistivity has a certain effect on electromagnetic induced voltage and electromagnetic induced current. Through multi-variable fitting analysis, the functional relationship between the above influencing factors and induced voltage and induced current is obtained, which provides a reference for the estimation of induced voltage and current in subsequent projects.

**Key words:** double-circuit transmission lines on the same tower; induced voltage; induced current; multi-variable fitting

## 0 引言

随着中国电力行业的迅猛发展,超高压、特高压

输变电工程不断增多,众多变电站、换流站之间的输电线路分布也越来越密集。为了解决输电线路通道走廊受限问题,节省工程总投资,同塔双架设的输电

线路形式成为了目前的主流趋势。线路同塔双回架设经济方便,优势明显,但也为后期线路的检修、维护工作带来了新的难题。

由于采用同塔双回结构,导致两回线路之间的相间距离大幅减小,使得耦合线路作用进一步加强。当其中一回线路运行而另一回线路需要停电检修时,正常运行的线路会在停运线路上感应出较大的电压和电流,给检修人员和运行设备带来安全隐患。文献[1]研究了 110 kV 同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害。文献[2-3]研究了不同电压等级输电线路同塔架设时各回路之间感应电压和感应电流的变化规律,并对线路接地开关参数的选择提出了要求。文献[4-5]对某 330 kV 和 500 kV 同塔双回输电线路下平行运行的 380 V 线路进行了感应电压、感应电流的仿真计算,推荐了检修作业方式。文献[6]仿真计算了 $\pm 800$  kV、 $\pm 500$  kV 直流线路运行时,在邻近直流线路的 1000 kV 特高压同塔双回线路上产生的感应电压。关于同塔双回输电线路感应电压、感应电流的研究目前已较多,但对其影响因素的多变量拟合和感应电压、感应电流简易估算的研究却鲜有报道。

为了准确分析同塔双回输电线路感应电压、感应电流的变化规律和影响因素,下面利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMPT 建立了 500 kV 同塔双回架空输电线路仿真模型,计算分析了线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响,并利用混合差分进化-粒子群优化算法对上述影响因素进行拟合,给出了感应电压、感应电流的多元拟合公式。

## 1 感应电压和感应电流理论分析

同塔双回输电线路当一回线路正常运行、另一回线路停运时,停运线路上会产生静电耦合和电磁耦合作用<sup>[7]</sup>,两条线路间的耦合如图 1 所示。其中, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 为正常运行线路的三相电压; $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 为正常运行线路的三相电流; $C_{Aa}$ 、 $C_{Ba}$ 、 $C_{Ca}$ 和  $M_{Aa}$ 、 $M_{Ba}$ 、 $M_{Ca}$ 分别为正常运行线路 A、B、C 三相与停运线路 a 相间的单位长度互电容和互电感; $C_{a0}$ 和  $M_{a0}$ 分别为停运线路 a 相单位长度对地电容和对地电感; $L$ 为线路长度。

对停运线路 a 相任意位置列出感应电压、感应

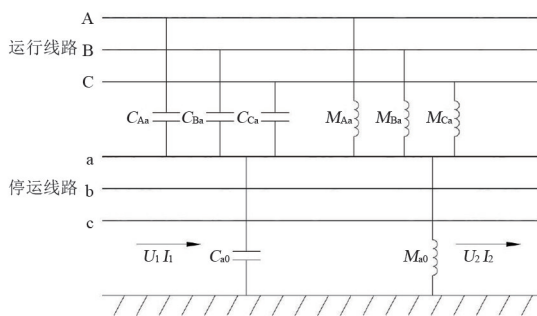


图 1 同塔双回线路耦合

电流计算方程为:

$$-\frac{\partial U}{\partial L} = j\omega M_{a0} I + j\omega M_{Aa} I_A + j\omega M_{Ba} I_B + j\omega M_{Ca} I_C \quad (1)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial L} = j\omega C_{a0} U + j\omega C_{Aa} (U - U_A) + j\omega C_{Ba} (U - U_B) + j\omega C_{Ca} (U - U_C) \quad (2)$$

由于正常运行线路三相电压电流相角差为  $120^\circ$ ,代入式(1)和式(2)得:

$$U_2 = U_1 \cos(\gamma L) - jI_1 Z_c \sin(\gamma L) + (\alpha/\gamma^2) U_A [1 - \cos(\gamma L)] - j(M/M_{a0}) Z_c I_A \sin(\gamma L) \quad (3)$$

$$I_2 = -j(U_1/Z_c) \sin(\gamma L) + I_1 \cos(\gamma L) + j(\alpha/\gamma^2 Z_c) U_A \sin(\gamma L) + (M/M_{a0}) I_A [\cos(\gamma L) - 1] \quad (4)$$

其中:

$$\gamma = j\omega \sqrt{M_{a0}(C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca})} \quad (5)$$

$$\alpha = -\omega^2 M_{a0} [C_{Aa} + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})C_{Ba} + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})C_{Ca}] \quad (6)$$

$$Z_c = \sqrt{M_{a0}(C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca})} \quad (7)$$

$$M = M_{Aa} - (\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})M_{Ba} - (\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})M_{Ca} \quad (8)$$

式中: $U_1$ 、 $I_1$ 为停运线路首端电压、电流; $U_2$ 、 $I_2$ 为停运线路末端电压、电流; $\gamma$ 为线路的传输参数; $\alpha$ 为等效电容; $M$ 为等效电感; $Z_c$ 为波阻抗。

1)当停运线路两端均不接地时,停运线路中感应电流  $I_1 = I_2 \approx 0$ 。且对于一般线路,有  $\gamma L \ll 1$ ,则有

$$U_1 = U_2 \approx (\frac{\alpha}{\gamma^2}) U_A = \frac{C_{Aa} U_A + C_{Ba} U_B + C_{Ca} U_C}{C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca}} \quad (9)$$

2) 当停运线路一端接地、一端不接地时, 设末端接地, 即  $I_1=0, U_2=0$ , 则有

$$|U_1| \approx |j\omega L(M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C)| \quad (10)$$

$$|I_2| \approx |j\omega L(C_{Aa}U_A + C_{Ba}U_B + C_{Ca}U_C)| \quad (11)$$

3) 当停运线路两端均接地时, 有  $U_1=0, U_2=0$ , 则

$$I_1 \approx I_2 \approx -(M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C)/M_{a0} \quad (12)$$

## 2 仿真计算

### 2.1 计算模型

所研究的输电线路采用同塔双回结构, 研究基准参数设定如下: 线路长度为 60 km, 线路运行额定电压为 525 kV, 额定输送功率为 1000 MW, 导线规格型号为  $4 \times \text{JL/LB20A}-400/50$ , 分裂间距为 400 mm; 架空地线采用 JLB20A-120; 工频接地电阻取  $10 \Omega$ , 土壤电阻率取  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。同塔双回杆塔结构如图 2 所示。

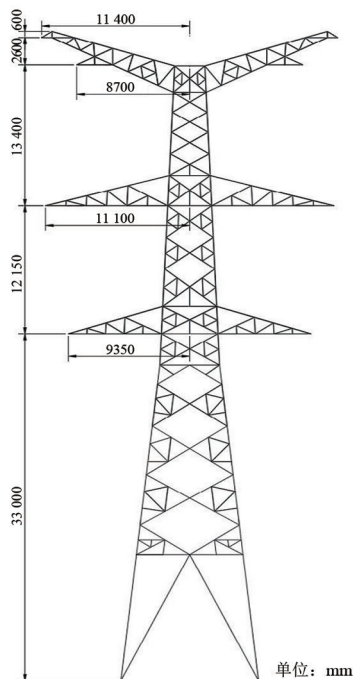


图 2 500 kV 同塔双回杆塔结构

利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中的架空线路 LCC 模块建立同塔双回 PI 仿真模型, 该模型适用于长度不超过 300 km 的架空输电线路的计算<sup>[8]</sup>, 且系统运行参数、线路和杆塔参数均可采用详细参数<sup>[9]</sup>。

### 2.2 静电感应电压计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行,

且停运线路两端均不接地时, 设定运行线路输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过上述仿真模型, 计算得到停运线路上产生的最大感应电压为 34.23 kV (幅值), 静电感应电压三相波形如图 3 所示。

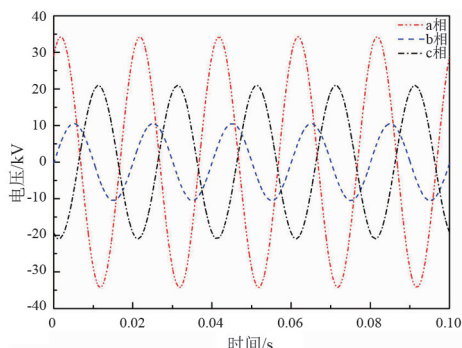


图 3 停运线路静电感应电压

### 2.3 电磁感应电压与静电感应电流计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行, 且停运线路一端接地、一端不接地时, 设定运行线路输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过计算得到停运线路上产生的最大电磁感应电压为 9.44 kV (幅值), 最大静电感应电流为 8.08 A (幅值), 电磁感应电压与静电感应电流三相波形如图 4 和图 5 所示。

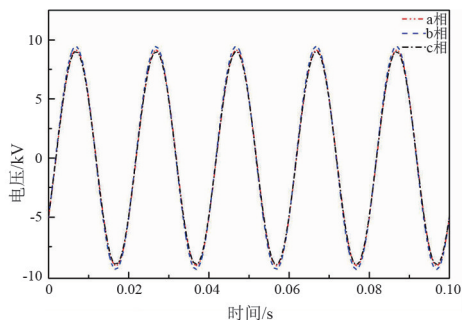


图 4 停运线路电磁感应电压

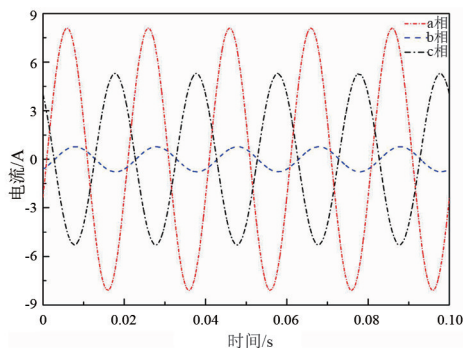


图 5 停运线路静电感应电流

### 2.4 电磁感应电流计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行, 且停运线路两端均接地时, 设定运行线路输送功

率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过上述仿真模型, 计算得到停运线路上产生的最大电磁感应电流为 288.42 A (幅值), 电磁感应电流三相波形如图 6 所示。

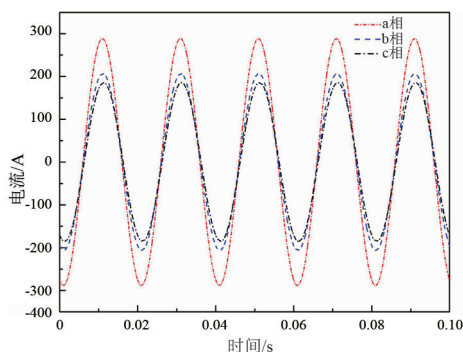


图 6 停运线路电磁感应电流

### 3 感应电压和感应电流影响因素分析

为了研究不同运行工况下感应电压与感应电流的大小, 以停运线路 a 相为例, 分别以线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率为控制变量进行分析。设定基准线路长度为 60 km, 输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV, 土壤电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。对某一影响因素进行分析时, 保持其他影响因素参数一致。

#### 3.1 线路长度

为了研究线路长度对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定线路长度分别为 20 km、40 km、60 km、80 km 和 100 km, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 线路长度对静电感应电压影响较小; 电磁感应电压和静电感应电流随线路长度的增加而增大, 近似成正比关系; 电磁感应电流随线路长度增加而变小, 但逐渐趋于平缓。

#### 3.2 输送功率

为了研究输送功率对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定输送功率分别为 500 MW、1000 MW、1500 MW、2000 MW 和 2500 MW, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 静电感应电压和静电感应电流随输送功率的增加而增大, 但二者整体变化幅度均较小; 电磁感应电压和电磁感应电流随输送功率的增加而显著增大, 近似成正比关系。

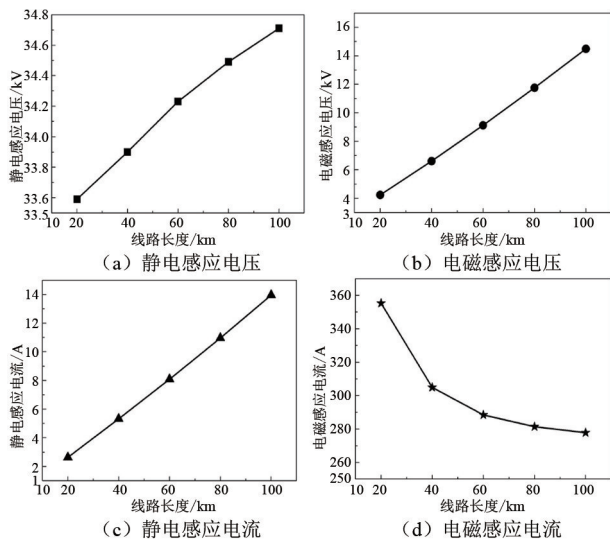


图 7 线路长度对感应电压和感应电流的影响

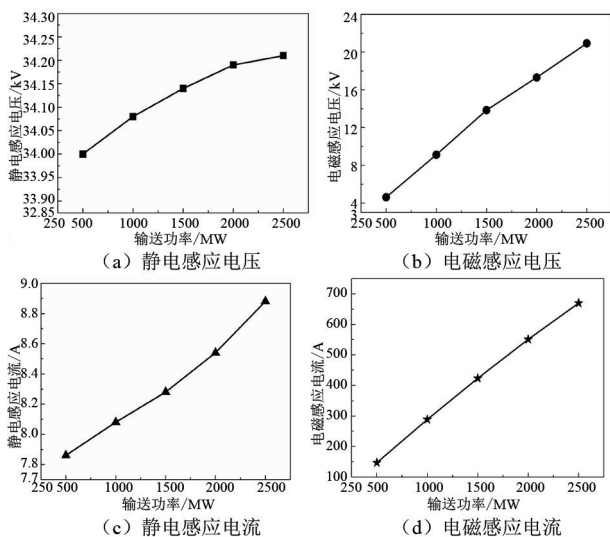


图 8 输送功率对感应电压和感应电流的影响

#### 3.3 运行电压

为了研究运行电压对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定运行电压分别为 505 kV、515 kV、525 kV、535 kV 和 545 kV, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 静电感应电压、电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流均随运行电压的增加而增大, 4 项均近似成正比关系。

#### 3.4 土壤电阻率

为了研究土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定土壤电阻率分别为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $200 \Omega \cdot \text{m}$  和  $500 \Omega \cdot \text{m}$ , 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 静电感应电压随土



壤电阻率的增加而减小,静电感应电流随土壤电阻率的增加而增大,但二者变化极小;电磁感应电压和电磁感应电流随土壤电阻率的增加而增大。

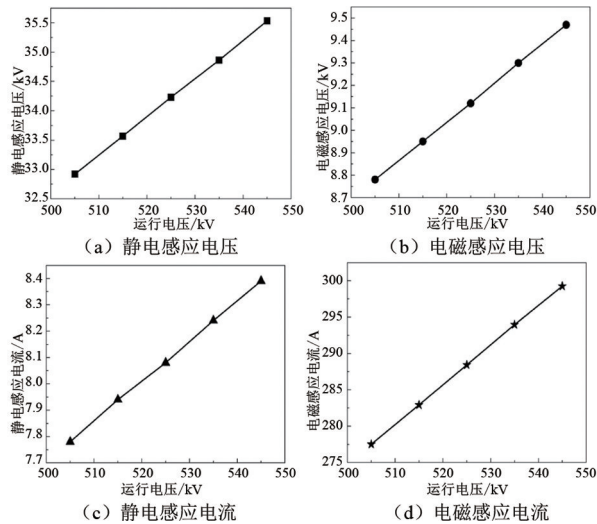


图 9 运行电压对感应电压和感应电流的影响

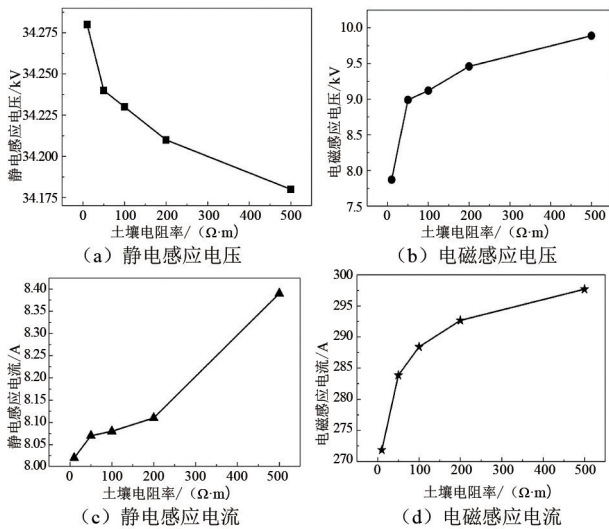


图 10 土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响

### 4 感应电压和感应电流多元拟合分析

根据前面可知,同塔双回输电线路一回运行、一回停运时,停运线路上感应电压和感应电流与线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率都有一定的关系。为了明确该多变量对应关系,利用混合差分进化-粒子群优化算法对其进行拟合,该算法通过使用粒子群优化算法来加快收敛速度,并使用差分进化算法来增加种群的多样性,可以较好地得到全局最优解,实现较优拟合。

根据前面仿真数据,首先对各单变量进行初步拟合,以此确定最优的函数结构。假设静电感应电

压为  $U_s$ ,电磁感应电压为  $U_m$ ,静电感应电流为  $I_s$ ,电磁感应电压为  $I_m$ ,线路长度为  $L$ ,输送功率为  $P$ ,运行电压为  $U$ ,土壤电阻率为  $\lambda$ 。经拟合分析,多变量函数具体可描述如下:

$$\begin{aligned}
 U_s &= a_0 + a_1 L + a_2 \ln P + a_3 U + a_4 \ln \lambda \\
 U_m &= b_0 + b_1 L + b_2 P + b_3 U + b_4 \ln \lambda \\
 I_s &= c_0 + c_1 L + c_2 P + c_3 U + c_4 \ln \lambda \\
 I_m &= d_0 + d_1 \ln L + d_2 P + d_3 U + d_4 \ln \lambda
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中,  $a_0 \sim a_4, b_0 \sim b_4, c_0 \sim c_4$  和  $d_0 \sim d_4$  为待求参数。

利用 Matlab 软件,基于混合差分进化-粒子群优化算法确定上述各值,计算结果如表 1 所示。

表 1 待求参数结果

静电感应电压 $U_s$ /kV	电磁感应电压 $U_m$ /kV
$a_0$ -1.260 2	$b_0$ -18.054 4
$a_1$ 0.014 2	$b_1$ 0.128 1
$a_2$ 0.079 2	$b_2$ 0.008 1
$a_3$ 0.065 1	$b_3$ 0.017 3
$a_4$ -0.028 0	$b_4$ 0.504 3
静电感应电流 $I_s$ /A	电磁感应电流 $I_m$ /A
$c_0$ -9.162 9	$d_0$ -79.184 8
$c_1$ 0.141 4	$d_1$ -50.694 5
$c_2$ 0.000 5	$d_2$ 0.258 7
$c_3$ 0.015 2	$d_3$ 0.545 3
$c_4$ 0.078 8	$d_4$ 6.748 5

为了验证拟合公式的准确性,选取相同工况下的仿真输入数据代入拟合式(13)进行计算,并将计算结果与仿真结果进行对比,结果见表 2。

表 2 仿真结果与拟合结果对比

对比项	仿真结果	计算结果	相对误差/%
静电感应电压 $U_s$ /kV	33.90	33.914	-0.041
	34.08	34.188	-0.317
	33.57	33.537	0.098
	34.24	34.207	0.096
电磁感应电压 $U_m$ /kV	6.61	6.570	0.605
	9.12	9.130	-0.110
	8.95	8.957	-0.078
	8.99	8.780	2.336
静电感应电流 $I_s$ /A	5.32	5.290	0.564
	8.08	8.110	-0.371
	7.94	7.958	-0.227
	8.07	8.055	0.186
电磁感应电流 $I_m$ /A	304.89	310.012	-1.680
	288.47	289.457	-0.342
	282.92	284.007	-0.384
	283.86	284.780	-0.324

- [7] 杨海巍.输电线路岩石锚杆基础试验与破坏模式研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [8] 孙长帅,杨海巍,徐光黎.岩石锚杆基础抗拔承载力计算方法探究[J].岩土力学,2009,30(增刊1):75-78.
- [9] 肖俊,李炳奇,汪小刚.预应力锚索自由段注浆对锚固力影响研究[J].科技创新导报,2013(16):65-68.
- [10] 朱宏伟.锚索自由段嵌固深度设计和确定的理论研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [11] 张永兴,卢黎,饶泉宇,等.压力型锚杆力学性能模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(7):2045-2050.

(上接第45页)

由表2可知,静电感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.317%,平均相对误差为0.138%;电磁感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为2.336%,平均相对误差为0.782%;静电感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.564%,平均相对误差为0.337%;电磁感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为1.68%,平均相对误差为0.683%。通过上述4项对比发现,拟合公式计算结果与仿真结果平均相对误差均在1%以内,吻合程度较高,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了参考。

## 5 结论

通过对500 kV同塔双回输电线路感应电压、感应电流进行研究,得到以下结论:

1) 当同塔双回线路一回运行、一回停运时,在基准设定参数下,停运线路上产生的最大静电感应电压为34.23 kV,最大电磁感应电压为9.44 kV,最大静电感应电流为8.08 A,最大电磁感应电流为288.42 A。

2) 电磁感应电压和静电感应电流与线路长度近似成正比关系,电磁感应电流随线路长度增加而变小,但逐渐趋于平缓;电磁感应电压和电磁感应电流随输送功率成正比关系显著增加,静电感应电压和静电感应电流随输送功率变化较小;感应电压和感应电流均随运行电压增加而增大;土壤电阻率增大使得电磁感应电压和电磁感应电流有一定的增加,对静电感应电压和静电感应电流影响不大。

3) 感应电压、感应电流拟合公式计算结果与仿

- [12] 饶泉宇.预应力岩锚内锚固段锚固性能及荷载传递机理研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [13] 侯中伟,郑卫锋.特高压输电线路岩石锚杆基础选型与设计[J].电力建设,2014,35(10):64-68.
- [14] 郑卫锋,鲁先龙,程永锋,等.输电线路岩石锚杆基础工程临界锚固长度的研究[J].电力建设,2009,30(9):12-14.

作者简介:

鄢秀庆(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事送电结构设计。(收稿日期:2021-09-05)

真结果吻合较好,平均相对误差均在1%以内,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了一定参考。

## 参考文献

- [1] 史华勃,丁理杰,彭施语,等.110 kV同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害研究[J].四川电力技术,2017,40(3):52-55.
- [2] 班连庚,王晓刚,白宏坤,等.同塔架设的220 kV/500 kV输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J].电网技术,2009,33(6):45-49.
- [3] 钟蓉.西宁一日月山750 kV同塔双回线路接地开关选择研究[J].四川电力技术,2011,34(5):54-57.
- [4] 马爱清,徐东捷,王海波,等.500 kV同塔双回输电线路下平行运行0.38 kV线路时的感应电压和感应电荷[J].高电压技术,2015,41(1):306-312.
- [5] 郑云龙,罗日成,邹明,等.330 kV同塔双回输电线路下平行运行的380 V线路感应电压电流仿真计算[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):216-222.
- [6] 刘浩军,阎国增,王少华,等.1000 kV皖南-浙北特高压交流线路静电感应电压分析[J].高电压技术,2015,41(11):3687-3693.
- [7] 龙雄峰.变电站500 kV同塔双回输电线路感应电压研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [8] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [9] 潘俊文,罗日成,吴东,等.500 kV同塔双回输电线路下平行排列油气管道上的感应电压和感应电流仿真分析[J].高压电器,2017,53(10):209-214.

作者简介:

唐浩龙(1994),男,硕士,助理工程师,从事电力设计工作;

樊艳(1979),女,高级工程师,从事电力设计工作;

冯千秀(1982),女,硕士,高级工程师,从事电力设计工作;

牟婷婷(1992),女,硕士,工程师,从事电力设计工作。

(收稿日期:2021-10-30)