

架空地线电磁感应电流计算与仿真分析^①

徐 明, 赵俊霖, 伍家洁

重庆电力高等专科学校 电力工程学院, 重庆 400053

摘要: 对架空地线电磁感应电流产生的机理进行分析, 利用 ATP-EMTP 上搭建不同电压等级的架空线路模型, 并计算光纤复合架空地线(Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire, OPGW)上的电磁感应电流, 分析了影响 OPGW 上感应电流大小的因素, 为实测及利用此感应电流进行感应取电提供参考依据。

关键词: 架空地线; 电磁感应; 电磁暂态分析程序

中图分类号: TN913.31; TM452

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)10-0049-05

220 kV 及其以上的高压输电线路中, 架空地线通常采用双地线方式, 其中的一根为绝缘架空地线, 另一根为光纤复合地线, 光纤复合架空地线(OPGW)通常会逐塔接地, 因此会与大地形成一个回路, 光纤复合地线上便会产生感应电压与感应电流^[1]。经研究表明, 架空地线上的最大取能功率通常可以满足输电线路在线设备的供电需求^[2-4], 而这些能量常常被认为是不利因素而得不到利用^[5-8]。

结合重庆市电力设计院提供的渝万铁路复盛牵引变 220 kV 外部供电工程(明月山一牵引站子项)及 750kV 兰州一官亭示范工程的输电线路中同塔双回段的参数进行了仿真计算^[9], 并分析了线路负荷、杆塔接地电阻及线路换位对架空地线感应电流的影响。

1 理论分析

以单回输电线路为例, 典型的高压输电线路模型见图 1^[10]。图中, A, B, C 为高压输电线路的相线, D, E 为架空地线, D 为普通绝缘架空地线, E 为 OPGW。

根据麦克斯韦原理, 当高压输电线路 A, B, C 上流过交变电流时会在空间产生交变磁场, 而该交变磁场切割由两根防雷地线 D, E 和铁塔组成的空间闭合平面时会在该平面上产生出感应电动势, 它正比于输电线路的电流和载流线之间的互感。从图中可以看出, D, E 到 A, B, C 的距离是不相等的, 所以 D, E 之间的互感是有差别的, 因此, 即便三相负荷电流完全相同, 也会在 D, E 上感应出一个纵电动势, D, E 与 A, B, C 之间的不完全对称又使得 D, E 上产生的感应电压大小不完全相同, 在此感应电压的作用下, OPGW 逐基接地后与大地形成回路, 产生感应电流。

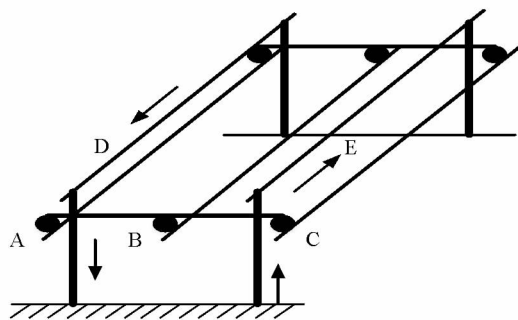


图 1 输电线路结构图

① 收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 2016 年重庆市教委科技项目(KJ1602402)。

作者简介: 徐 明(1972-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护、远动及调度自动化系统研究。

2 计算模型

在 220 kV 及其以上的输电线路实际施工中, 光纤复合架空地线(OPGW)逐基杆塔接地, 普通地线则是分段接地, 分段接地时每段长度 4~6 km. ATP-EMTP 中有专门模拟输电线路模型的元件 LCC, 可计算线路参数. 图 2 为建立的计算感应电流的仿真模型^[11].

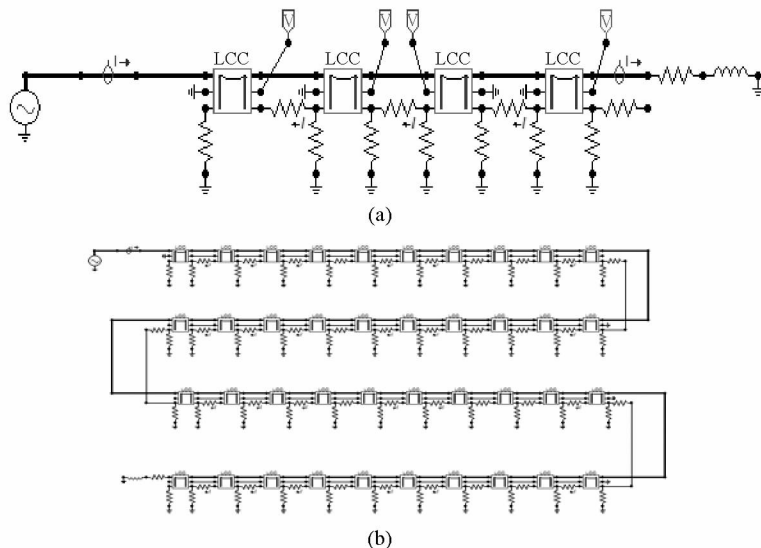


图 2 架空地线感应电流、感应电压仿真模型

图 2(a)中, 每个 LCC 长 1 km, 共有 4 个 LCC. 图 2(b)中, 1 个 LCC 位 0.5 km, 共有 40 个 LCC. 为了测量 OPGW 中电流, 两个 LCC 之间 OPGW 之间串联了小电阻 0.01 Ω .

3 架空地线感应电流仿真分析

根据《电力工程高压送电线路设计手册》对不换位线路“导(地)线—地”回路的自阻抗及互阻抗的计算公式, 可以算出地线上每公里的电磁感应电动势^[12].

“导(地)线—地”回路的自阻抗:

$$Z_{gg} = \left(R + 0.05 + j0.145 \lg \frac{D_0}{r_e} \right), \Omega/\text{km} \quad (1)$$

互感阻抗:

$$Z_{gn} = 0.05 + j0.145 \lg \frac{D_0}{d_{gn}}, \Omega/\text{km} \quad (2)$$

$$D_0 = 210 \sqrt{\frac{10\rho}{f}} = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{m} \quad (3)$$

其中,

D_0 为大地中电流的等价深度; f 为电流频率; ρ 为大地电阻率; R 为导(地)线的电阻; r_e 为导线的有效半径; d_{gn} 为线间距离.

故对单回线路, 地线上的感应电流为

$$I_g = \frac{Z_{ga}I_a + Z_{gb}I_b + Z_{gc}I_c}{Z_{gg}} \times K, \text{A} \quad (4)$$

d_{1a}, d_{1b}, d_{1c} 分别为地线与各相导线之间的距离, 单位为 m.

从式(4)中可以看出, 影响架空地线感应电流的因素有线路的负荷电流、杆塔的接地电阻. 此外, 输电线路换位对架空地线中的感应电流也有影响.

3.1 正常运行条件下线路负荷对感应电流的影响

取运行电压 765 kV; 直流电阻: 0.072 32 Ω/km , 导体外直径: 2.763 cm, 导体内直径: 0.8 cm, 分裂

导体数: 6, 分裂导体间距: 40 cm. 地线直流电阻: $0.4332 \Omega/\text{km}$, 导体外直径(地线): 1.16 cm, 导体内直径(地线): 0 cm, 土壤电阻率: $100 \Omega/\text{m}$.

负荷变化时 750 kV 单回输电线路中 OPGW 中电流有效值的变化如表 1 所示.

表 1 不同负荷下 750kV 单回线路 OPGW 中电流有效值

末端等效阻抗/ Ω	开路	$1200+j400$	$900+j300$	$600+j200$	$300+j100$
OPGW 中电流有效值/A	0.7	14.0	18.7	28.1	56.3

负荷变化时 750 kV 双回输电线路中 OPGW 中电流有效值的变化如表 2 所示.

表 2 不同负荷下 750 kV 双回线路 OPGW 中电流仿真值

末端等效阻抗/ Ω	开路	$1200+j400$	$900+j300$	$600+j200$	$300+j100$
OPGW 中电流有效值/A	1.2	31.4	42.1	63.5	127.3

分析上表中的数据, 从图 3 和 4 可以看出, 随着线路负荷的增大, 输电线路中的电流会增大, OPGW 中的感应电流也会随之增大.

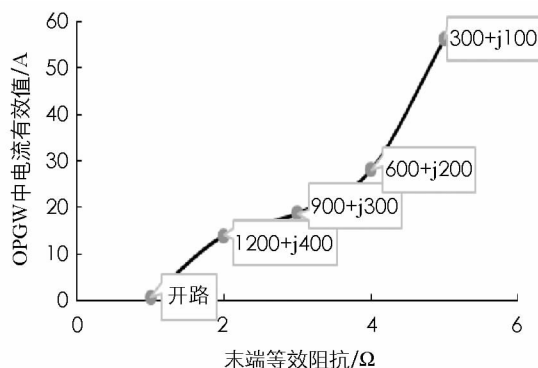


图 3 不同负荷下 750 kV 单回线路 OPGW 中电流有效值

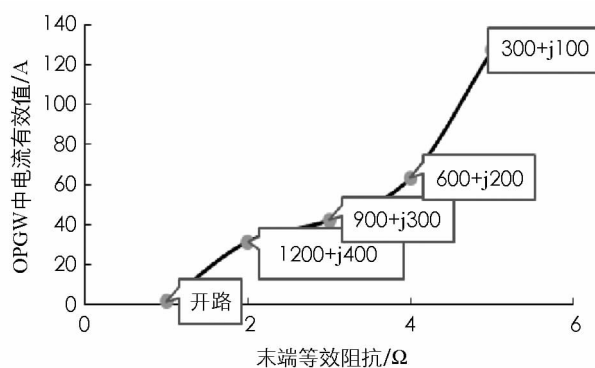


图 4 不同负荷下 750 kV 双回线路 OPGW 中电流仿真值

3.2 正常运行条件下杆塔接地电阻对感应电流的影响

220 kV 线路中, 每个 LCC 长 1 km, 共有 4 个 LCC. 电源电压为 269 kV, 负荷为 $100+j148\text{MVA}$, 杆塔接地电阻 R 分别取 0.1, 1, 5 Ω . OPGW 中电流幅值如图 5 所示.

750 kV 线路中, 每个 LCC 长 0.5 km, 共有 40 个 LCC. 电源电压为 765 kV, 负荷为 $1756+j100\text{MVA}$, 杆塔接地电阻 R 分别取 0.1, 1, 5, 10 Ω . OPGW 中电流幅值如图 6 所示.

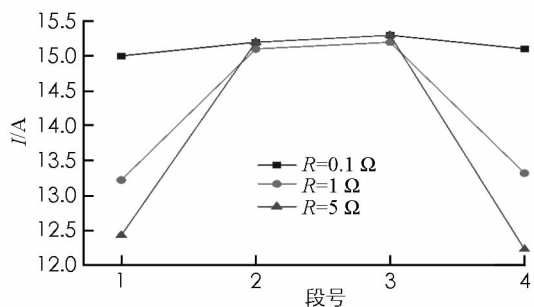


图 5 220 kV 输电线路中 OPGW 电流幅值

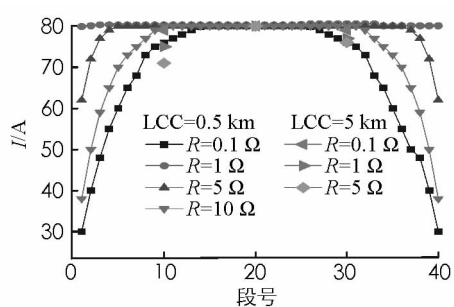


图 6 750 kV 输电线路 OPGW 中的电流幅值

从图可得, 当杆塔接地电阻 R 位于输电线路的中间档距时, 架空地线中的电流 I 变化很小, 接地电阻 R 对电流 I 几乎没有影响. 当杆塔接地电阻 R 位于输电线路的两端时, 随着接地电阻 R 的增大, 架空地线中的电流 I 随之减小. 当杆塔接地电阻 R 减小到一个较小的值(0.1 Ω)时, 接地电阻 R 对电流 I 的影响降到最低, 输电线路各段电流几乎相同. 这是由于 OPGW 与杆塔和大地形成网状回路, 除去首末两端的杆塔, 其余的杆塔均被相邻的网状回路中一起使用. 在两个相邻的网状回路中, 每个杆塔上流过的电流大小

相同,方向相反,所以在杆塔中流过电流实际为零.而在首末两端的杆塔上,其被一个网状回路使用,杆塔中有电流流过,改变杆塔接地电阻 R 的大小,杆塔中流过的电流也会随之改变.

所以说,杆塔的接地电阻 R 在线路边缘对架空地线中的电流 I 影响最大,随着杆塔的接地电阻 R 逐渐减小,其影响因子也逐渐减小,直至可忽略.

3.3 正常运行条件下线路换位对感应电流的影响

在高压(交流)输电线路路上,由于三相导线在空间布置上是不完全对称的,所以会导致三相的阻抗和导纳不完全相同.随着输电线路距离的增长,这种不平衡会累加,致使线路末端电压出现大的偏差.所以,当输电线路的长度超过一定的距离时,会对三相导线换位,而架空地线通常不换位.

在 ATP-EMTP 中建立如图 7 所示的换位电路,750 kV 双回输电线路进行逆相序同相换位和反相换位两种形式,分别计算了两种情况下 OPGW 中的感应电流.在换位电路中每 5 km 进行一次换位.

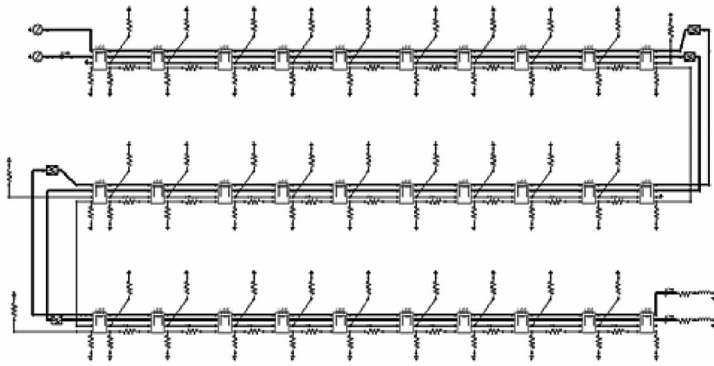


图 7 同塔双回线路逆相序反向换位电路

由表 3~表 5 可以看出,在同塔双回输电线路中,导线换位后地线中的感应电流会大幅降低,在不同的线路负荷下,最大降幅可达 61.4%.采取逆相序反向换位后 OPGW 中电流有效值的变化最大.

表 3 750 kV 同塔双回线路地线电流

末端等效阻抗/ Ω	末端有功功率/MW	OPGW 中电流有效值平均值/A		
		不换位	逆相序同向	逆相序反向
开路	0	1.2	1.1	0.7
$(1200+j400)/2$	438×2	31.4	23.2	12.3
$(900+j300)/2$	584×2	42.1	31.2	16.4
$(600+j200)/2$	874×2	63.5	46.8	24.6
$(300+j100)/2$	1740×2	127.3	93.5	49.2

表 4 逆相序同向换位与不换位比较

末端等效阻抗/ Ω	末端有功功率/MW	OPGW 中电流有效值平均值变化/%
开路	0	-8.3
$(1200+j400)/2$	438×2	-25.8
$(900+j300)/2$	584×2	-25.9
$(600+j200)/2$	874×2	-26.3
$(300+j100)/2$	1740×2	-26.6

表 5 逆相序反向换位与不换位比较

末端等效阻抗/ Ω	末端有功功率/MW	OPGW 中电流有效值平均值变化/%
开路	0	-41.7
$(1200+j400)/2$	438×2	-60.8
$(900+j300)/2$	584×2	-61.0
$(600+j200)/2$	874×2	-61.3
$(300+j100)/2$	1740×2	-61.4

4 结 论

高压输电线路 OPGW 中感应电流大小处于几安培至上百安培之间, 利用 OPGW 中的能量进行感应取电是可行的. 随着线路负荷的增大, 输电线路中的电流会增大, OPGW 中的感应电流也会随之增大. 杆塔的接地电阻 R 在线路边缘对架空地线中的电流 I 影响最大, 随着杆塔的接地电阻 R 逐渐减小, 其影响因子也逐渐减小, 直至可忽略. 导线换位后地线中的感应电流会大幅降低, 在不同的线路负荷下, 最大降幅可达 61.4%. 采取逆相序反向换位后 OPGW 中电流有效值的变化最大.

参考文献:

- [1] 田志刚, 赵宏伟, 冯 波, 等. OPGW 感应取电技术概述 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 155-158.
- [2] 史志强, 邹德华, 俞 乾, 等. 750 kV 同塔双回输电线路感应电压和电流的研究 [J]. 高压电器, 2018, 54(8): 120-126, 132.
- [3] 汪峰渊, 陈 达. 基于架空地线感应电流回收利用的探讨 [J]. 电工技术, 2018(13): 33-35, 39.
- [4] 胡 科, 陈国初. 500 kV 架空地线不同导线排列方式和损耗 [J]. 上海电机学院学报, 2018, 21(1): 33-38.
- [5] 吴 姜, 樊 飞, 肖景良. 500 kV 同塔双回线路感应电流及感应电压规律研究 [J]. 电力勘测设计, 2017(2): 56-61.
- [6] 蒋兴良, 谢彦斌, 胡建林, 等. 典型架空输电线路地线电磁取能等效电路的分析 [J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2052-2057.
- [7] 郭志涛. 1000 kV 同塔双回线路地线感应电压和感应电流计算分析 [J]. 机电信息, 2015(36): 122-124.
- [8] 冯奕军, 翟柱新, 邓艺娜. 基于拉曼散射的分布式 OPGW 温度测量 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(12): 96-100.
- [9] 国家电网公司. 国家电网公司 750 kV 输变电示范工程建设总结 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [10] 刘明兴. 输电线路在线监测装置感应电源的研究与设计 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [11] 李云阁. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [12] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

Calculation and Simulation Analysis of Electromagnetic Induction Current of Overhead Ground Line

XU Ming, ZHAO Jun-lin, WU Jia-jie

School of Electric Power Engineering, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China

Abstract: The mechanism of the generation of the electromagnetic induced current in the Overhead Ground line has been analyzed, and the model of the Overhead line with different voltage levels been constructed on the Atp-Emtp, and the electromagnetic induced current on the Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire been calculated, and the factors influencing the induced current on the OPGW been analyzed. It provides a reference basis for the actual measurement and the use of the induced current to carry out the induced power retrieval.

Key words: overhead ground wire; electromagnetic induction; EMTP