

# 潜供电弧的仿真分析

林 莘, 何柏娜, 徐建源

(沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110023)

Simulation and Analysis of Secondary Arc

LIN Xin, HE Bai-na, XU Jian-yuan

(Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

摘要: 介绍了超高压输电线路上产生潜供电弧的机理。基于电路原理得出恢复电压和潜供电流的数学表达式, 运用 MATLAB 编程得到恢复电压和潜供电流的数值。通过 SIMULINK 组建模块, 仿真整个电路, 得到恢复电压和潜供电流的波形图和数值。分析快速接地开关抑制潜供电弧的机理, 在线路上安装快速接地开关, 选用电动弹簧操作机构来提高 HSGS 的关合速度, 降低弧道上的潜供电流和恢复电压, 减少了潜供电弧的熄灭时间, 从而确保了单相自动重合闸的成功。

关键词: 快速接地开关; 潜供电流; 潜供电弧; 恢复电压

中图分类号: TM762.25 文献标识码: A

Abstract: This paper presents the theory of generating secondary arc current in ultra-high-voltage (UHV) power transmission system. The mathematic representations of recovery voltage and secondary arc current can be obtained based on circuit principle, and the values can also be obtained by using MATLAB. Based on SIMULINK the whole circuit has been simulated, thus, the waveshapes of recovery voltage and secondary arc current are obtained. The effect of secondary arc suppression is studied when the high speed grounding switch (HSGS) is adopted. The mechanism of secondary arc restriction by HSGS is analyzed. Motor-driven spring operating mechanism has been used to enhance breaking velocity of HSGS. The magnitude of the secondary arc current and recovery voltage in arc path are obviously reduced after using HSGS on line. Then it reduces the extinction time of the secondary arc and assures successful single-phase auto reclosure.

Key words: high speed grounding switch(HSGS); secondary arc current; secondary arc; recovery voltage

## 0 前言

随着电压等级的提高, 潜供电弧对系统的影响越

来越明显, 如果不能及时熄灭潜供电弧, 将使实行单相自动重合闸操作的断路器重合于弧光接地故障, 从而造成重合闸失败, 影响供电安全和系统稳定。在 750 kV 电压等级的线路上, 由于电压较高、线路较长、容量较大, 使得潜供电弧持续燃烧时间较长<sup>[1]</sup>, 无法实现单相自动重合闸。因此在特高压领域特别是我国将要发展的百万伏级线路则更需要研究潜供电弧的参数, 为选择抑制潜供电弧的方法提供理论依据。

## 1 潜供电弧的计算与仿真

潜供电弧的两个重要参数是恢复电压和潜供电流。非故障相通过静电耦合和电磁耦合向故障点供电, 其形成的电流称为潜供电流, 潜供电流所形成的接地弧光则称为潜供电弧。潜供电弧熄灭后瞬间出现在弧道上的电压称为恢复电压。熄灭潜供电弧可归结为降低恢复电压和减小潜供电流。恢复电压和潜供电流都包括静电感应分量和电磁感应分量<sup>[2-3]</sup>。计算恢复电压和潜供电流的线路简化电路图见图 1。其中 HSGS 为快速接地开关, DL 为断路器,  $C_1$  为单位长度的相间电容。

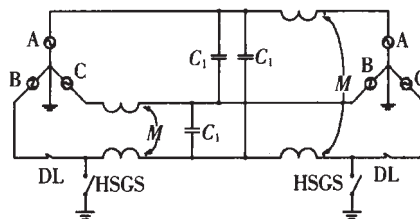


图 1 线路简化电路图

设故障前的三相对称电压为  $U_A$ ,  $U_B$  和  $U_C$ , 幅值为  $U$ , 假定 C 相短路。由图 1 可得到电容耦合回路, 见图 2, 图中  $C_0$  为单位长度线路的对地电容,  $l$  为线路长度。现以 750 kV, 150 km 长线路为例来计算恢

收稿日期: 2006-06-17

作者简介: 林 莘(1961-), 女, 西安人, 教授, 博士生导师, 从事高压电器有关理论及应用方面的研究。

复电压和潜供电弧,笔者采用的是 LGJ-4×800 布线方式,导线直径为 24.2 mm,分裂间距为 500 mm,水平排列相间距离为 1.7 m,可通过 Matlab 编程得到线路各参数分别为:  $C_1=0.0248 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $C_0=0.0043 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $M=0.1523 \text{mH}/\text{m}$ ,  $M$  为单位长度的相间互感;  $L=0.4598 \text{mH}/\text{m}$ ,  $L$  为单位长度的的电感。

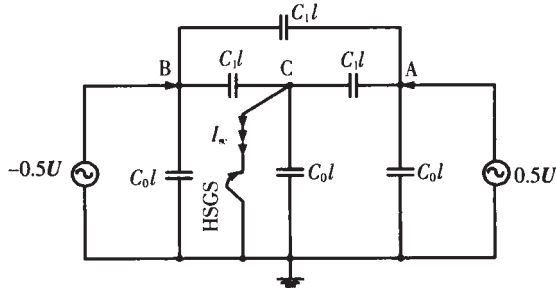


图2 电容耦合回路

### 1.1 静电感应分量

恢复电压和潜供电流的静电感应分量通过相间电容产生,图3是静电感应仿真图,用定时器控制开关的关合来模拟短路发生的情况,通过示波器可以看到电流和电压的波形和数值。根据图2可计算出静电感应分量的理论值。

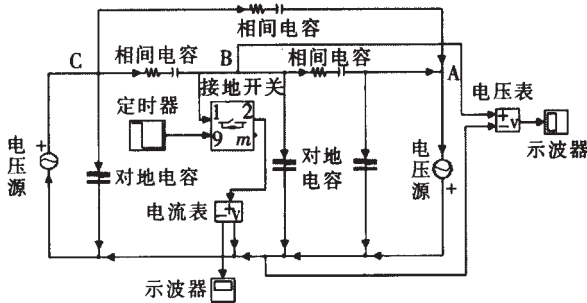


图3 静电感应仿真图

整个计算过程忽略电弧电阻,得到恢复电压的静电感应分量最终表达式为:

$$U_{sc} = -0.5U \times \frac{2C_1}{2C_1 + C_0} \quad (1)$$

潜供电流的静电感应分量表达式为:

$$I_{sc} = -0.5U \times (-j\omega 2C_1 l) = j\omega C_1 l U \quad (2)$$

可见恢复电压和潜供电流的静电感应分量均由电容而定,而电压值与线路长度无关,可计算出其值为 107.98 kV(忽略线损)。通过 SIMULINK 仿真得到波形图见图 4(a),可以看出波形大致成正弦波,同时得到静电感应分量数值为 106.21 kV。电流值与线路长度成正比,其值为 52.8 A(忽略线损),其仿真波形见图 4(b),从图中可知静电感应分量幅值为 51.2 A。

### 1.2 电磁感应分量

恢复电压的电磁感应分量是由故障相和非故障相之间的感应电动势产生的,感应电势随故障点位置变化而变化,其中点处的感应电势表达式为:

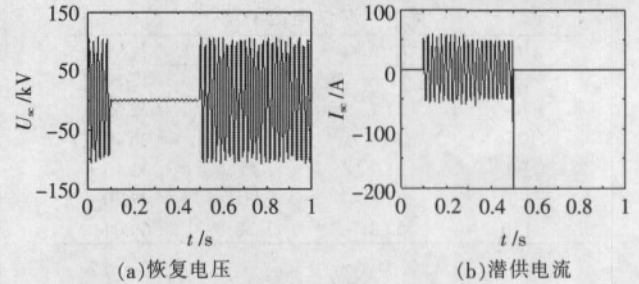


图4 恢复电压与潜供电流的静电感应波形图

$$E = \int_{1/2}^0 -j \frac{\omega M U}{Z_{c1}} e^{j \frac{x}{l}} dx = \frac{j 2 M U}{l} \sin \frac{j}{4} e^{\frac{j}{4}} \quad (3)$$

式中:  $Z_{c1}$  为波阻抗;  $l$  是传输线的特征参数,对超高压输电线路来说,  $l$  比较小,则  $\sin \frac{j}{4} \approx \frac{j}{4}$ 。

不同故障点处的感应电压可通过编程求出,求出感应电压后再通过 SIMULINK 仿真得出电磁感应分量的值,线路上的恢复电压为静电感应分量和电磁感应分量之和。以短路发生在离首端 60 km 处为例,对潜供电流和恢复电压的电磁感应分量进行分析。给出仿真得到的电磁感应电压波形图,见图 5(a),横轴是时间,纵轴是电压,单位是 kV。电磁感应电流波形见图 5(b)。

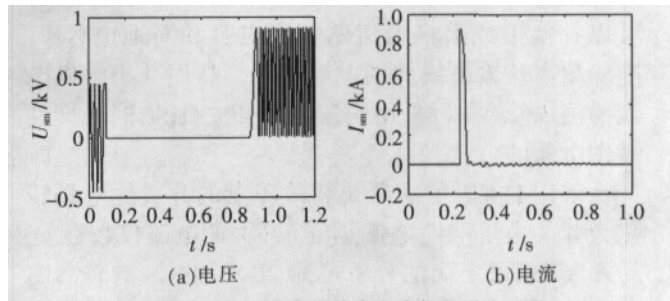


图5 60 km 处电磁感应电流与电压波形图

由图 5(a)可知,电磁感应电压波形大致成正弦波,其峰值为 4 522 V,再加上静电感应电压(107.98 kV),则恢复电压可达上百千伏,可见电磁感应电压所占比重较小。这么大的恢复电压对熄弧不利,所以必需采取措施来减小恢复电压,以达到熄灭潜供电弧的目的。

图 5(b)的纵坐标表示电流的大小,横坐标是采样时间。开关初始状态为开断,没有发生故障。短路发生瞬间,短路点出现过 900 A 左右的电流。过电流之后电流逐渐减小,波形开始有振荡,然后趋于平稳,最终的稳态值为 1.45 A。可见潜供电流的电磁感应分量与静电感应分量相比,所占的比重也较小。

模拟短路发生在不同位置时的情况,得出潜供电流和恢复电压的值,其仿真结果见表 1 和表 2。

仿真结果和理论推导都说明恢复电压的静电感应分量不随故障点位置的变化而改变,潜供电流的静电感应分量与线路长度成正比;电磁感应分量在故障发生在中点位置处为零,越往两端值越大,所以故

表 1 潜供电流的值

X/km	$I_{sc}/A$	$I_{sn}/A$	$I_{cg}/A$
30	10.6	2.00	12.60
60	21.1	1.45	22.55
75	26.4	0	26.40
90	31.7	1.45	33.15
120	42.3	2.00	44.30
150	52.8	7.24	60.04

表 2 恢复电压的值

X/km	$U_{sc}/kV$	$U_{sn}/kV$	$I_H/kV$
30	106.21	6.34	112.55
60	106.21	4.52	110.73
75	106.21	0	106.21
90	106.21	4.52	110.73
120	106.21	6.34	112.55
150	106.21	22.46	128.67

障发生在首末两端时, 潜供电流和恢复电压的幅值最大。潜供电流和恢复电压的电磁感应分量所占的比重较小, 起主要作用的是静电感应分量。

## 2 快速接地开关的设计

抑制潜供电弧主要有两种方法, 即并联电抗器中性点接小电抗和采用快速接地开关。并联电抗器中性点接小电抗的方法是适当选择对地小电抗的数值, 可以补偿形成潜供电流的相间电容和对地电容<sup>[4]</sup>, 削弱超高压输电线路的电容效应, 从而减小潜供电流的值。笔者探讨采用快速接地开关(HSGS)来抑制潜供电弧的方法。

采用 HSGS 的实质是将故障点的开放性电弧转化为开关内压缩性电弧, 流经开关的电流仅数百安, 易开断。通过上面的分析可知, 要求 HSGS 有较高的切合感应电流的能力。快速接地开关的结构见图 6。

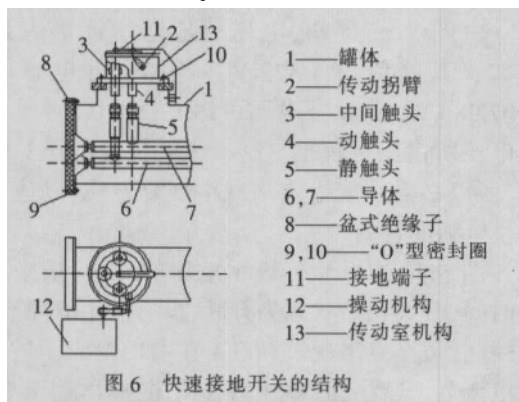


图 6 快速接地开关的结构

如图 6, 操作机构动作, 带动快速接地开关的主轴转动, 并通过拐臂 2 带动导向装置及动触头部分作垂直运动, 完成分、合闸操作。设计 HSGS 的触头系统时要考虑触头是在带电情况下动作, 它的开断要比常规线路接地开关的开断任务重, 所以对触头设计的要求就比较高。笔者采用自力型触头, 这种触头不需要压紧弹簧, 利用材料自身在高弹性变形时产生的变形力为触指的电接触提供可靠的接触压

力, 并利用自身的高导电性达到长期承受额定电流、短时承受短路电流的目的, 由于其良好的耐电蚀性使得在开断和关合过程中烧损小、不熔焊。

笔者选用电动弹簧操作机构来提高 HSGS 的关合速度, 从而达到提高 HSGS 的关合能力的目的。当电动操作时, 按下控制按钮, 接通直流马达电源, 使马达旋转, 带动齿轮组使弹簧储能操作机构的纺锤轴旋转, 压缩弹簧储能。当轴旋转到某一位置时, 弹簧脱扣, 接地开关的动导电管迅速射向静触头而接地。HSGS 快速合上时, 故障相的相对地电容部分被短路, 与短路点构成分流回路, 减少了短路点的潜供电流, 使故障点的恢复电压大大降低, 从而使电弧容易熄灭<sup>[5]</sup>, 待故障点潜供电弧熄灭后, HSGS 迅速开断, 断路器重新合上, 这就确保了单相自动重合闸的成功, 提高系统的稳定性和供电可靠性。

## 3 结论

(1) 根据线路参数计算出恢复电压和潜供电流的数值, 分析了它们与线路参数的关系。对潜供电流而言, 静电感应分量占较大比重, 此分量与线路长度成正比, 而电磁感应分量比重较小; 对恢复电压而言, 静电感应分量与线路长度无关, 与线电压、线路参数等因素有关。潜供电流和恢复电压的电感分量在中点处均为零, 越往两端越大, 所以首末两端潜供电流和恢复电压幅值最大。

(2) 为使 HSGS 快速切断感应电流, 选用电动弹簧操作机构来提高 HSGS 的关合速度, 从而提高 HSGS 的关合能力。选用自力型触头, 使其在关合过程中磨损小。

(3) 目前, 我国正在研究 1100 kV 的 GIS, 对 GIS 的各项技术指标要求都很高, 其中的接地开关采用快速接地开关, 它不仅具有关合短路电流的能力, 还可以达到快速熄灭潜供电弧的目的。

## 参考文献:

- [1] 曹昭华. 500 kV 输电线路单相重合闸过程中潜供电流和恢复电压[J]. 电网技术, 1988, 12(11): 53-55.
- [2] Tanabe M, Yamagata Y, Yanabu S, et al. Interruption Duties and Test Specifications of 1100 kV Gas Circuit Breaker and Its Development for Future UHV Power Transmission in Japan [C]// Colloquium of CIGRE SC13, Report 1.2. Florianopolis 1995: 1542-1549.
- [3] Goda Y, Matsuda S, Inaba T, et al. Forced Extinction Characteristics of Secondary Arc on UHV (1000 kV class) Transmission Lines[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1993, 8(3): 1322-1330, 1333.
- [4] 谷定燮, 陆宠惠. 日本特高压系统过电压和绝缘配合 [J]. 中国电力, 1998, 31(11): 67-69.
- [5] 雍军, 施围, 穆广祺. 采用快速接地开关限制潜供电流 [J]. 高压电器, 1996, 32(2): 28-33.