

# 对地电容对开关误动影响研究

变电站直流系统单点接地状态下，绝缘监测装置切换桥电阻投切过程中，会出现继电器线圈端电压波动导致开关误动作。通过对等效电路进行拉普拉斯变换计算，利用RT-LAB仿真平台和实验系统，研究直流系统中对地电容对继电器线圈端电压波动的影响。得到不同接地状态下不同类型对地电容数值与继电器线圈端电压波动最大值的对应关系曲线，得出对地电容引起开关误动作的特点。

徐强超 江文东/广州供电局有限公司 王 琦/武汉科技大学信息学院  
李永祥/广州市仟顺电子设备有限公司



徐强超/高级工程师

电力系统保护装置通常由变电站直流系统来供电，当直流系统中单点接地时有可能出现保护误判而引起开关跳闸的现象，这已成为变电站的安全隐患，近年来有不少文献针对保护装置误动作现象进行了研究，文献[1-2]认为，直流系统发生单点接地时保护误动作是由于直流系统中的对地电容，尤其是长电缆的电容效应而引起的。文献[3-6]在研究中也提到了对地电容对于继电器误动作影响较大。

本文分析直流系统不同位置的单点接地状态下，系统绝缘监测装置的切换桥电阻投切过程中，继电器线圈端电压波动超过设定值而误动作的现象，研究了直流系统中对地电容对于继电器误动作的影响。采用等效电路计算继电器两端电压波动，建立RT-LAB仿真模型，并搭建物理实验系统验证仿真结果的准确性。通过研究发现，直流系统中并非所有对地电容都对继电器误动作均造成较大影响，其影响会根据系统单点接地

位置不同而存在较大差异，对于相同接地情况，不同的对地电容造成的影响也不尽相同。研究最终得出一系列对地电容与继电器线圈端电压之间的关系曲线，较全面地揭示了变电站直流系统中对地电容变化对继电器误动作的影响。

## 等效电路计算

直流系统包含有蓄电池、充电装置、告警装置、绝缘监测仪、空气开关和保险等<sup>[6]</sup>，其可以表示为如图1的等效电路图。

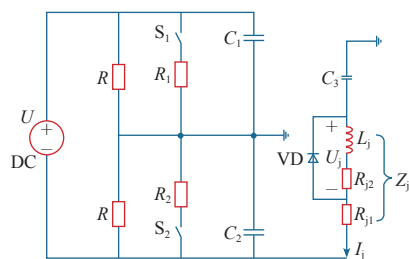


图1 等效电路图

其中， $U=220\text{ V}$ 为直流系统电源； $R$ 是绝缘监测装置中的平衡桥电阻； $R_1$ 和 $R_2$ 是绝缘监测装置中的正负极切换桥电阻，取 $R_1=R_2$ ； $C_1$ 和 $C_2$ 分别是正极和负极所有设备对地电容，取 $C_1=C_2$ ； $C_3$ 为长电缆分布对地电容； $Z_j$ 是继电器线圈阻抗，由三部分组成：线圈串联电阻 $R_{j1}$ ，线圈电阻 $R_{j2}$ 和线圈电感 $L_j$ 。当直流系统中分别发生正极高阻接地、负极高阻接地和继电器线圈低阻接地时，其中 $R_d$ 为接地电阻。正常运行时 $S_1$ 和 $S_2$ 为闭合状态。在系统接地状态下， $S_1$ 和 $S_2$ 分别进行开断和闭合动作时，会引起继电器线圈端电压 $U_j$ 产生较大波动，当 $U_j$ 超过设定值

## 关键词/Keywords

变电站直流系统·  
接地·  
对地电容·  
继电器误动作·

南方电网公司科技资助项 (K-GZM2013-088)。

$0.6U_D$  (取  $U_D = 24\text{ V}$ ) , 引起继电器误动作。 $U_j$ 产生负向波动时, 由于有二极管VD导通, 不引起开关误动作, 当 $U_j$ 产生正向波动时, 可能导致开关误动作。动作过程中, 继电器回路产生电流 $I_j$ , 通过拉普拉斯变换, 可得到正向 $I_j$ 频域计算式。其中正极接地状态下, 继电器线圈回路正向电流计算公式为

$$I_j(s) = \frac{A}{Bs^2 + Cs + D}U \quad (1)$$

式中,  $A = C_3(R^2R_d^2 + RR_1R_d^2 + R^2R_1R_d + RR_2R_d^2)$ ;  $B = (RR_2 + RR_d + 2R_2R_d)(C_1C_3 + C_2C_3)RR_1R_dR_j$ ;  $C = (RR_2 + RR_d + 2R_2R_d)(C_1RR_1R_d + C_2RR_1R_d + C_3RR_1R_d + C_3RR_dR_j + 2C_3R_1R_dR_j)$ ;  $D = (RR_2 + RR_d + 2R_2R_d)(RR_1 + RR_d + 2R_1R_d)$ 。

由于 $C_2$ 和 $C_3$ 的存在, 使继电器 $Z_j$ 中电感对回路电压影响相对较小, 且根据实际继电器数据可知 $X_j < 10\%R_j$ 。计算中用 $R_j$ 代替 $Z_j$ 以简化计算。得到时域下的 $I_j(t)$ , 端电压波动的最大值计算公式为

$$U_j(t) = I_j(t)R_{j2} + L_j \frac{dI_j(t)}{dt} \quad (2)$$

## 系统仿真

在eMEGAsim仿真平台中开发系统RT-LAB仿真模型。eMEGAsim是由加拿大Opal-RT公司开发的实施数字与模拟混合实时仿真的平台, RT-LAB是与其配套的工业级系统平台软件包, 结合了节点法和状态空间法的优势, 在快速仿真的同时确保了计算结果的准确性。RT-LAB已经在电力系统仿真中得到了较好的应用<sup>[7-8]</sup>。

对正极接地状态模型、负极接地状态模型进行如表1所示的参数设置。

表1 参数表I

| $U/\text{V}$      | $R_j/\Omega$            | $R(RR)/\text{k}\Omega$  | $C_1(C_2)/\mu\text{F}$ | $R_1(R_2)/\text{k}\Omega$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| 220               | 0.01                    | 100                     | 10                     | 5                         |
| $C_3/\mu\text{F}$ | $R_{j1}/\text{k}\Omega$ | $R_{j2}/\text{k}\Omega$ | $L_j/\text{H}$         | $R_d/\text{k}\Omega$      |
| 40                | 20                      | 2.6                     | 6.2                    | 100                       |

正、负极接地后, 开关 $S_1$ 断开, 至 $S_1$ 闭合 $S_2$ 断开变化, 整个过程中继电器线圈端电压波形如图2、图3所示。

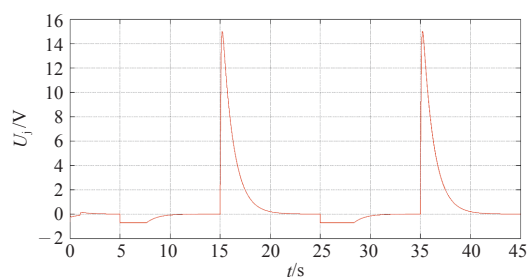


图2 正极接地电压波动图

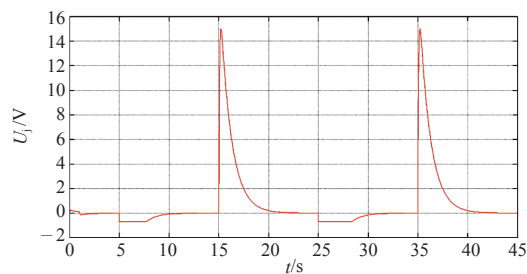


图3 负极接地电压波动图

正极高阻接地与负极高阻接地情况的仿真波形较类似。正常运行状态时, 由于 $C_3$ 的存在, 继电器线圈端电压为零。 $t = 1\text{ s}$ 时发生直流系统正极高阻接地, 接地电阻 $R_d$ 为 $100\text{ k}\Omega$ , 使得 $U_j$ 产生一个小波动, 随后衰减到零。 $t = 5\text{ s}$ 时,  $S_1$ 跳开,  $S_2$ 保持闭合, 随着 $S_1$ 的跳开,  $R_1$ 和 $R_2$ 两端电压重新分配, 电容 $C_3$ 充电, 电流 $I_j$ 流入 $C_3$ , 产生负向电压波动, 因二极管VD导通, 使得 $U_j$ 为二极管导通电压。随着 $C_3$ 的充电过程完成,  $I_j$ 衰减为零,  $U_j$ 重新回到零。 $t = 15\text{ s}$ 时,  $S_1$ 重新闭合, 同时 $S_2$ 跳开,  $R_1$ 和 $R_2$ 两端的电压重新分配, 电容 $C_3$ 放电, 电流 $I_j$ 流出 $C_3$ , 产生正向电压波动。完成一次完整动作过程。 $t = 25\text{ s}$ 时, 再重复一次动作过程。从波形图可知, 过程中有正电压波动超过动作临界值 $14.4\text{ V}$ , 表1的参数在整个动作过程中会导致继电器误动作。

对继电器线圈接地状态模型中元件参数设置如表2所示。

表2 参数表II

| $U/\text{V}$      | $R_j/\Omega$            | $R(RR)/\text{k}\Omega$  | $C_1(C_2)/\mu\text{F}$ | $R_1(R_2)/\text{k}\Omega$ |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| 220               | 0.01                    | 100                     | 10                     | 10                        |
| $C_3/\mu\text{F}$ | $R_{j1}/\text{k}\Omega$ | $R_{j2}/\text{k}\Omega$ | $L_j/\text{H}$         | $R_d/\Omega$              |
| 10                | 20                      | 2.6                     | 6.2                    | 0.01                      |

继电器线圈接地后, 开关 $S_1$ 断开, 随后 $S_2$ 闭合 $S_2$ 断开, 继电器线圈端电压波形如图4所示。

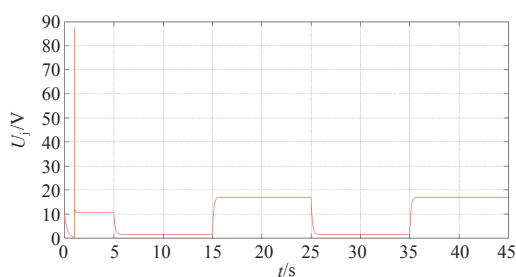


图4 继电器线圈接地电压波动图

正常运行时，由于 $C_3$ 的存在，继电器 $Z_j$ 两端电压为零。 $t=1$  s时继电器线圈发生低阻接地故障，导致电流流过继电器，在线圈端产生较高电压，但是未超过误动作临界值。在 $t=5$  s时刻， $S_1$ 跳开， $S_2$ 保持闭合，随着 $S_1$ 的跳开，线圈端电压发生变化，但未超过误动作临界值。 $t=15$  s时， $S_1$ 重新闭合，同时 $S_2$ 跳开，线圈端电压发生变化，超过了动作临界值14.4 V，完成一次动作过程。在 $t=25$  s时刻开始，重复一次动作过程。从图4可知，表2的参数在整个过程中会导致继电器误动作。

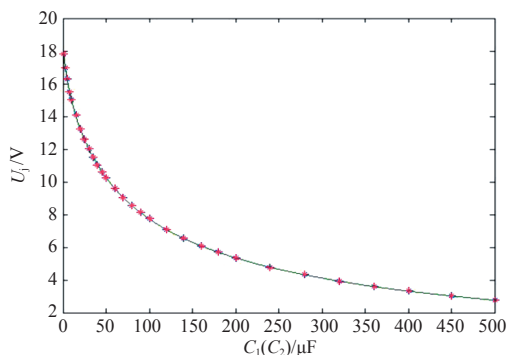
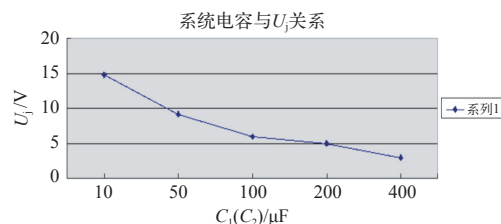
## 对地电容对线圈端电压影响分析

在仿真模型中，对地电容之外的参数一定，逐渐增加电容值，得到对应的线圈端电压最大值，同时搭建等效电路实验系统，对应仿真参数变化，调整电容值，结合仿真和实验，研究对地电容与线圈端电压最大值关系。

### 1. 正极接地情况

#### (1) $C_1(C_2)$ 与 $U_j$ 关系曲线

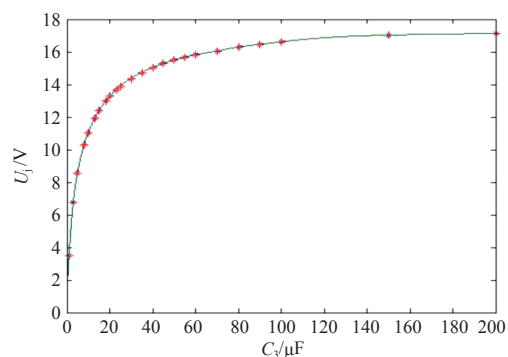
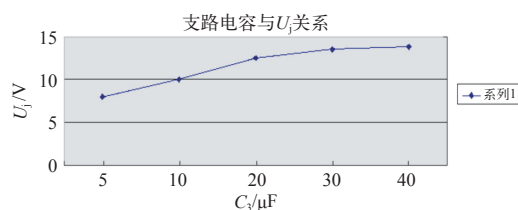
$C_1(C_2)$ 与 $U_j$ 仿真特性曲线如图5所示，实验特性曲线如图6所示。

图5  $U_j-C_1(C_2)$ 仿真特性曲线图6  $U_j-C_1(C_2)$ 实验特性曲线

随着 $C_1(C_2)$ 电容值的增大，对 $U_j$ 的影响逐渐趋于稳定， $C_1(C_2)$ 电容值越小，对应的容性电抗越大，在此过程中导致产生开关误动作的可能性越大。

#### (2) $C_3$ 与 $U_j$ 关系曲线

$C_3$ 与 $U_j$ 的仿真特性曲线如图7所示，实验特性曲线如图8所示。

图7  $U_j-C_3$ 仿真特性曲线图8  $U_j-C_3$ 实验特性曲线

随着 $C_3$ 电容值的增大，其对 $U_j$ 的影响逐渐趋于稳定， $C_3$ 电容值越大，引起的 $U_j$ 最大值越大，导致产生开关误动作的可能性越大。

### 2. 负极接地情况

#### (1) $C_1(C_2)$ 与 $U_j$ 关系曲线

$C_1(C_2)$ 与 $U_j$ 的仿真特性曲线如图9所示，实验特性曲线如图10所示。

随着 $C_1(C_2)$ 电容值的增大，其对 $U_j$ 的影响逐渐趋于稳定， $C_1(C_2)$ 电容值越小，导致产生开关误动

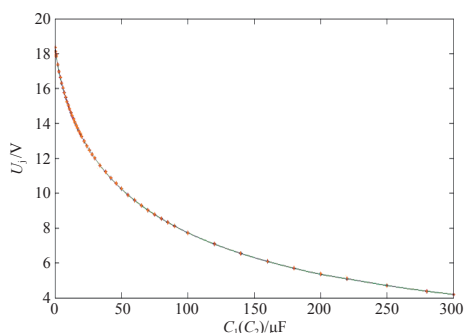


图9  $U_j - C_1(C_2)$  仿真特性曲线

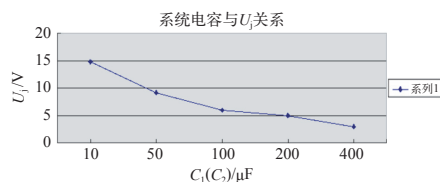


图10  $U_j - C_1(C_2)$  实验特性曲线

作的可能性越大。

### (2) $C_3$ 与 $U_j$ 关系曲线

$C_3$ 与 $U_j$ 的仿真特性曲线如图11所示，实验特性曲线如图12所示。

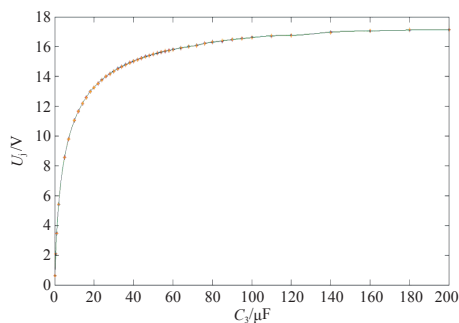


图11  $U_j - C_3$  仿真特性曲线

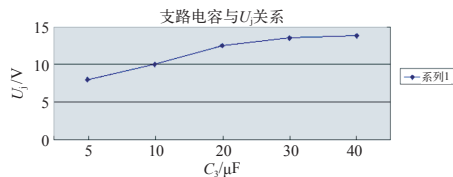


图12  $U_j - C_3$  实验特性曲线

可知随着 $C_3$ 电容值的增大，对 $U_j$ 的影响逐渐趋于稳定， $C_3$ 电容值越大，导致产生开关误动作的可能性越大。

### 3. 线圈接地情况

#### (1) $C_1(C_2)$ 与 $U_j$ 关系曲线

在表2的给定参数条件下，当系统其他参数一

定， $C_1(C_2)$ 分别为1  $\mu\text{F}$ ，10  $\mu\text{F}$ ，100  $\mu\text{F}$ 时 $U_j$ 波形图如图13~图15所示，实验特性曲线如图16所示。

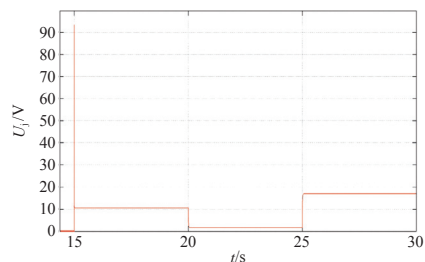


图13  $U_j$ 波形图 ( $C_1(C_2)=1 \mu\text{F}$ )

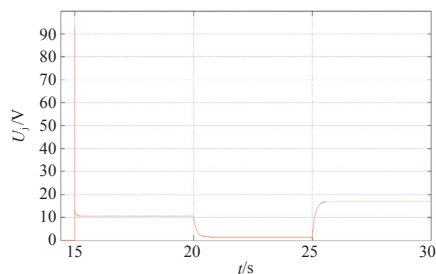


图14  $U_j$ 波形图 ( $C_1(C_2)=10 \mu\text{F}$ )

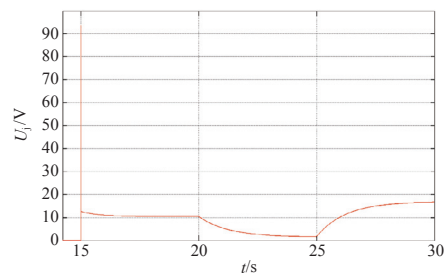


图15  $U_j$ 波形图 ( $C_1(C_2)=100 \mu\text{F}$ )

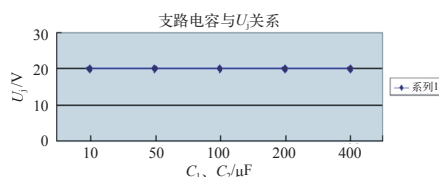


图16  $U_j - C_1(C_2)$  实验特性曲线

从图13~图16可知随着 $C_1(C_2)$ 电容值的增大，过程中的电压稳定值一致，电容的变化影响了动作后过渡过程（动作开始至电压恢复稳定）的时间。两次动作过程后达到的电压稳定值几乎不受电容 $C_1(C_2)$ 影响，从稳定后的电压值可以判断，由于状态最后达到的电压值超过了14.4 V，会导致继电器误动作。

#### (2) $C_3$ 与 $U_j$ 关系曲线

$C_3$ 分别为1  $\mu\text{F}$ ，10  $\mu\text{F}$ ，100  $\mu\text{F}$ 时 $U_j$ 波形图如图

17~图19所示,实验特性曲线如图20所示。

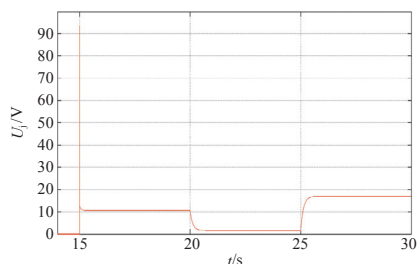


图17  $U_j$ 波形图 ( $C_3=1 \mu\text{F}$ )

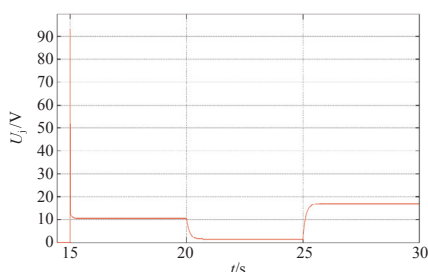


图18  $U_j$ 波形图 ( $C_3=10 \mu\text{F}$ )

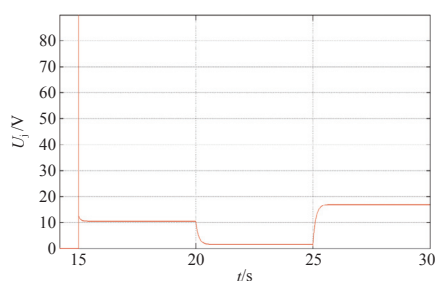


图19  $U_j$ 波形图 ( $C_3=100 \mu\text{F}$ )

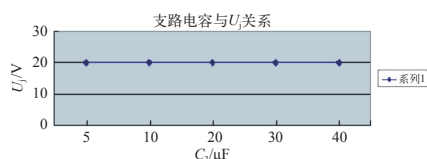


图20  $U_j-C_3$ 实验特性曲线

从图17~图20可知 $C_3$ 的大小不影响 $U_j$ 的电压稳定值,由于状态最后达到的电压值超过14.4 V,不管 $C_3$ 怎么变化最后均导致继电器误动作。原因在于,当线圈发生低阻抗接地时, $C_3$ 的放电电流会直接通过接地电阻流向接地点,不通过 $Z_j$ ,对 $U_j$ 无影响。

## 结束语

本文通过数值计算、仿真和实验研究了变电站直流系统中对地电容对继电器误动作影响。通

过研究发现,当直流系统单点接地状态下,绝缘监测装置切换桥电阻投切时,系统中对地电容对继电器误动作的影响具有以下特点:

1) 直流系统发生正极或者负极高阻接地时,正极和负极所有设备对地电容 $C_1(C_2)$ 数值越增大,对继电器线圈端电压 $U_j$ 最大值大小的影响削弱,逐渐接近稳定,越不容易引起继电器误动作。

2) 直流系统发生正极或者负极高阻接地时,长电缆分布电容 $C_3$ 数值越增大,对继电器线圈端电压 $U_j$ 最大值大小的影响增加,逐渐接近稳定,导致产生继电器误动作的可能性越大。

3) 直流系统发生继电器线圈端低阻接地时,对地电容 $C_1(C_2)$ ,长电缆分布电容 $C_3$ 的大小对继电器线圈端电压 $U_j$ 最大值的影响可以忽略。

## 参考文献

- [1] 吴剑鸣,严正.控制电缆的分布电容对继电保护的影响及防范措施[J].电力自动化设备,2007,27(11):115-118.
- [2] 张奇东.直流回路一点接地造成开关误跳闸的原因分析[J].科学技术,2010(8):99-100.
- [3] 陈志军.500 kV变电站直流系统负荷分配对保护装置的影响[J].继电器,2006,34(7):74-77.
- [4] 方磊,吴建伟,周行,等.一起直流回路故障引起的断路器误动作分析[J].华东电力,2013,41(8):1699-1701.
- [5] 马红昇,刘振松.500 kV变电站断路器误动作分析[J].云南电力技术,2013,41(21):62-65.
- [6] 金海望,董杰,张金祥,等.厂站直流系统接地故障引起开关误跳闸的仿真与研究[J].电网与清洁能源,2013,29(12):75-80.
- [7] 周林,贾芳成,郭珂,等.采用RT-LAB的光伏发电仿真系统实验分析[J].高电压技术,2011,36(11):2814-2819.
- [8] 郑鹤玲,葛宝明,毕大强.基于RT-LAB的光伏发电系统实时仿真[J].电工电能新技术,2010,29(4):62-66.

(收稿日期:2015-02-16) EA