

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180962

基于 SCADA 系统的小电流接地故障选线方法研究

朱涛

(国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430013)

摘要: 为了有效改善调度员仍然采用“拉路”法进行选线的现状, 利用各级调度机构已有的 SCADA 系统获取线路的稳态零序电流, 提出了基于调度 SCADA 系统的小电流接地选线方法。新的选线方法能够应用于中性点不接地和中性点经消弧线圈接地的小电流系统, 通过比较各条线路稳态零序电流幅值和变化量辨识故障线路, 最多 1 次拉路操作就能确认故障线路。截至目前, 武汉电网已有 19 座变电站开始应用新的选线方法进行选线, 累计 14 次单相接地故障全部判断正确。实际选线案例和应用过程表明, 该方法准确有效, 具有广泛的适用性和推广性。

关键词: SCADA 系统; 稳态零序电流; 比较选线方法; 幅值最大; 幅值变化量最大

Fault line selecting method in non-solidly-earthed network based on SCADA system

ZHU Tao

(Wuhan Power Supply Company, State Grid of Hubei Electric Power Company Limited, Wuhan 430013, China)

Abstract: In order to effectively improve the situation of dispatchers using the "Pull Line" method for line selection, the SCADA system of all levels of dispatching agencies is used to obtain the steady zero-sequence current of the line, and a small current grounding line selection method based on the dispatching SCADA system is proposed. The new line selection method can be applied to small current systems where the neutral point is not grounded and the neutral point is grounded via the arc suppression coil. By comparing the steady zero-sequence current amplitude and variation, the fault line can be confirmed by up to 1 pull operation. Up to now, 19 substations in Wuhan Power Grid have begun to apply new line selection methods for line selection, and all the 14 single-phase ground faults have been judged correctly. The actual line selection case and application process show that the method is accurate and effective, which could be widely applied and promoted.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277135).

Key words: SCADA system; steady zero sequence current; comparison line selection method; maximum amplitude; maximum amplitude variation

0 引言

我国小电流接地故障选线方法从 1957 年开始研究至今已超过 60 年, 目前已有的各类选线方法主要分为三类^[1-3]: 第一类是暂态分量法, 这种选线方法通过高速数据采集装置记录故障时刻的电压、电流信号, 利用小波包、希尔伯特变换、差分滤波等智能算法提取暂态特征分量, 通过比较暂态特征信号或辨识特征模型进行选线^[4-14]; 第二类是注入信号法, 发生单相接地故障后通过信号发生装置向系统中注入特定扰动信号, 通过比较注入信号在各条

线路中的分布特征进行选线^[15-17]; 第三类方法为中电阻法^[18-20], 接地故障发生后自动投入中性点上的中电阻, 利用接地故障产生的零序电压自动形成零序电阻电流, 再通过比较零序电阻电流在各条线路中的分布进行选线。虽然上述方法在仿真应用过程中都取得了较好的选线效果, 但在实际应用过程中均需要在变电站加装高速数据采集装置或对变电站中性点接地方式进行改造。在大规模推广过程中, 上述选线方法均存在改造费用高、后期运维成本高等诸多问题, 这也导致电网实际运行过程中, 仍然主要采用最原始的“拉路法”进行选线。

针对这一现状, 以“简单实用”、“易于大规模推广”为研究方向, 提出了基于调度 SCADA 系统

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51277135)

(Supervisory Control and Data Acquisition)的稳态零序电流选线方法: 对于中性点不接地系统, 通过比较零序电流幅值辨识故障线路; 对于中性点经消弧线圈接地系统, 首先断开零序电流幅值最大的线路, 然后通过比较零序电流幅值变化量辨识故障线路。基于调度 SCADA 系统的稳态零序电流选线方法, 相对于“暂态分量法”、“信号注入法”、“中电阻法”等各类先进选线方法仅增加了 1 次拉路操作, 但由于 SCADA 系统在各级调度机构均已成熟应用^[21-23], 无需在变电站端新增专门的选线装置或对变电站中性点进行改造, 具有广泛的适用性和推广性。

截至目前, 基于 SCADA 系统的小电流接地故障选线方法已推广应用于武汉电网 19 座变电站, 累计发生的 14 次单相接地故障全部选线正确, 有效改善了主要依靠“拉路法”进行选线的局面。

1 稳态特征量分析

小电流接地系统按中性点接地方式分为不接地和经消弧线圈接地两种型式。

1.1 中性点不接地系统

中性点不接地系统发生单相接地故障后, 其零序网络和零序电流分布如图 1 所示。

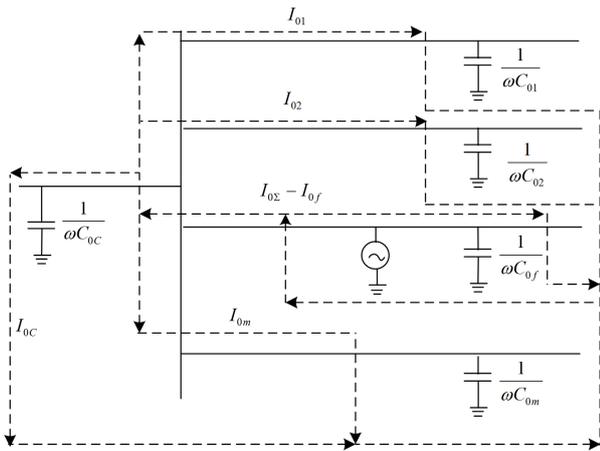


图 1 不接地系统单相故障时零序电流分布

Fig. 1 Zero sequence current distribution in ungrounded system

由图 1 可知, 各条线路的对地电容电流均要流过故障点。此时, 故障线路零序电流为所有非故障线路对地电容电流之和, 如式(1)所示。

$$I_{0f} = I_{01} + I_{02} + \dots + I_{0m} \quad (1)$$

式中: I_{0f} 为故障线路零序电流; $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0m}$ 分别为非故障线路 1、线路 2 至线路 m 的零序电流。由求和公式可知, 故障线路零序电流值幅值最大。

1.2 中性点经消弧线圈系统

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故

障后, 其零序网络和零序电流分布如图 2 所示。

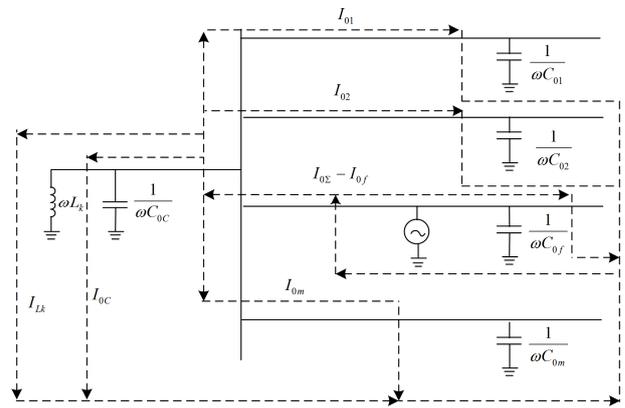


图 2 消弧线圈接地系统单相故障时零序电流分布

Fig. 2 Zero sequence current distribution in Petersen coil grounding system

由图 2 可知, 除了各条线路对地电容电流流过故障点外, 消弧线圈补偿的电感性电流也要流过故障点。此时, 故障线路零序电流如式(2)所示。

$$I_{0f} = I_{01} + I_{02} + \dots + I_{0m} - I_{Lk} \quad (2)$$

式中: I_{0f} 为故障线路零序电流; $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0m}$ 分别为非故障线路 1、线路 2 至线路 m 的零序电流; I_{Lk} 为消弧线圈补偿的零序电流。由于消弧线圈补偿的感性电流与线路对地电容电流相互抵消, 故障线路零序电流幅值不一定最大。同时, 由于消弧线圈采用过补偿形式运行, 故障线路流过的电流为感性电流, 方向由线路流向母线, 而非故障线路流过的电流为容性电流, 方向由母线流向线路。因此, 故障线路与非故障线路稳态零序电流的实际方向相同, 无法通过零序电流方向辨识故障线路。

2 稳态零序电流比较选线方法

根据式(1)可知, 在中性点不接地系统中, 故障线路零序电流幅值最大, 稳态零序电流特征明显, 此时, 通过比较零序电流幅值就能找出故障线路。因此, 本节重点分析中性点经消弧线圈接地系统的稳态零序电流比较选线方法。

2.1 非故障线路稳态零序电流分析

根据图 2 建立故障时刻非故障线路零序网络等效电路, 如图 3 所示。

图 3 中, C_m 为线路 m 的对地电容, R_m 、 L_m 为线路 m 的等效零序电阻和电感, I_{0m} 为流经线路 m 的零序电流。由零序网络等效电路可知, 非故障线路零序电流只受系统中的零序电压影响, 单相接地故障后只要零序电压保持不变, 非故障线路的零序电流也将保持不变。

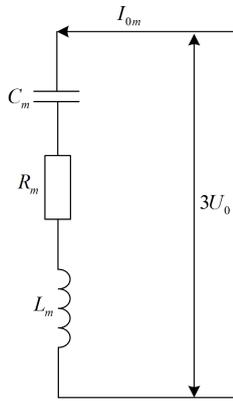


图 3 非故障线路零序网络等效电路

Fig. 3 Normal line equivalent circuit in zero sequence network

2.2 故障线路稳态零序电流分析

消弧线圈通常采用过补偿方式运行，假设其补偿度为 P ，如式(3)所示。

$$I_{Lk} = (1 + P)(I_{01} + I_{02} + \dots + I_{0m}) \quad (3)$$

此时，式(2)可以简化为

$$I_{0f} = -P(I_{01} + I_{02} + \dots + I_{0m}) \quad (4)$$

虽然故障线路的稳态零序电流在幅值和方向上与非故障线路都没有明显区别，但 $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0m}$ 中任意一条线路零序电流发生变化，故障线路 I_{0f} 的零序电流都将发生变化。此时，任意断开某条非故障线路后(假设断开线路 L_2)，故障线路与非故障线路的零序电流变化量如表 1 所示。

表 1 故障线路与非故障线路零序电流变化量

Table 1 Zero sequence current variation in fault line and non-fault line

	故障线路	非故障线路	
零序电流 (断开前)	$I_{0f} = -P(I_{01} + I_{02} + \dots + I_{0m})$	I_{02}	$I_{01}, I_{03}, \dots, I_{0m}$
零序电流 (断开后)	$I_{0f} = -P(I_{01} + 0 + \dots + I_{0m})$	0	基本不变
变化量	PI_{02}	—	0

由于接地故障点仍然存在，系统中的零序电压变化不大，此时 $I_{01}, I_{03}, \dots, I_{0m}$ 基本保持不变，而故障线路零序电流少了线路 L_2 的零序电流 I_{02} 后，其幅值将变化 PI_{02} 。与非故障线路相比，故障线路零序电流幅值变化量在理论上将达到最大。

但由式(4)可知，故障线路零序电流变化量还与消弧线圈的调谐度直接相关，如果 $P \approx 0$ ，那么故障线路零序电流变化量将约等于零，变化量特征不明显。为了保证零序电流变化量特征明显，在消弧线圈控制参数设置过程中，调谐度要严格按照

15%~20%的补偿方式进行设置，避免零序电流变化量特征失效。在实际应用过程中，只要有 1 条线路零序电流超过 1 A，按照 15%的补偿度，幅值变化量就能达到 0.15 A，故障线路零序电流变化量特征都将非常明显，选线方法就能有效应用。

2.3 稳态零序电流比较选线步骤

中性点不接地系统发生单相接地故障后，选择零序电流最大的线路即为故障线路，中性点经消弧线圈接地系统发生单相故障后，虽然不能通过稳态零序电流直接判断故障线路，但由 2.2 节可知，如果试探性地先断开某一非故障线路，通过比较零序电流幅值变化量，则幅值变化量最大的线路即为故障线路。同时，由表 1 可知，断开线路的零序电流幅值越大(即 I_{02} 越大)，则故障线路零序电流幅值的变化量也越大(即 PI_{02} 越大)。因此，在实际选线操作过程中，为了让故障线路零序电流变化量的特征更加明显，可以在试探性选线时选择断开零序电流幅值最大的线路。

综上所述，中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统的故障线路选择步骤如图 4 所示。

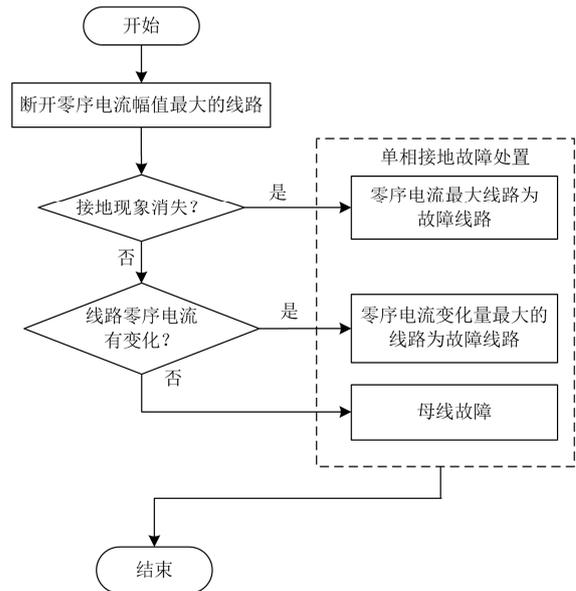


图 4 小电流接地系统选线步骤

Fig. 4 Line-selecting step in indirectly grounding power system

无论是哪种型式的小电流接地系统，发生单相接地故障后，首先断开零序电流最大的线路，如果接地现象消失则零序电流幅值最大的线路为故障线路；否则，选择零序电流幅值变化量最大的线路为故障线路，需要特别指出的是，如果试探性选线后，各条线路零序电流均没有变化，则可以确定母线发生了单相接地故障。

3 实例分析

3.1 零序电流接入 SCADA 系统

零序电流比较选线方法不论是比较幅值还是幅值变化量，都是利用稳态零序电流做分析对象，通过变电站端已有的各种遥测量采集装置和各级调度机构已有的调度 SCADA 系统就能获取各条线路零序电流数据，如图 5 所示。

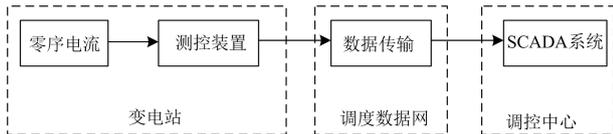


图 5 零序电流数据传送路径

Fig. 5 Transmission path of zero sequence current data

图 5 中，零序电流数据传送方式与变电站内电压、电流等遥测数据传送至调控中心的方式相同，无需新增专门的数据采集设备。以武汉电网常青、营房村两站为例，SCADA 系统中的零序电流如图 6、图 7 所示。

常青 零序电流	
10kV常606零序电流	0.00
10kV常龙二回线常607零序电流	0.00
10kV常花八回线常608零序电流	0.00
10kV常花十二回线常609零序电流	0.00
10kV常花十四回线常610零序电流	0.01
10kV常商线常611零序电流	0.00
10kV常花十六回线常612零序电流	0.01
10kV常花十八回线常613零序电流	0.00
10kV常花四回线常614零序电流	0.00
10kV常花二回线常615零序电流	0.00
10kV常花六回线常616零序电流	0.00
10kV常花十回线常617零序电流	0.00
10kV常花十二回线常618零序电流	0.00
10kV常花十四回线常619零序电流	0.00
10kV常花十六回线常620零序电流	0.00
10kV常花十八回线常621零序电流	0.00
10kV常龙一回线常503零序电流	0.02
10kV常花一回线常504零序电流	0.00
10kV常花三回线常505零序电流	0.01
10kV常506零序电流	0.00
10kV常花五回线常507零序电流	0.01
10kV常花七回线常508零序电流	0.01
10kV常花九回线常509零序电流	0.01
10kV常花十一回线常510零序电流	0.01
10kV常花十三回线常511零序电流	0.02
10kV常花十五回线常512零序电流	0.02
10kV常花十七回线常513零序电流	0.01
10kV常花十九回线常514零序电流	0.17
10kV常花二十一回线常515零序电流	0.00
10kV常美一回线常516零序电流	0.00
10kV常美二回线常517零序电流	0.00

图 6 SCADA 系统中常青变零序电流

Fig. 6 Zero-sequence current of Changqing transformer substation in SCADA system

营房村 零序电流	
10kV营一回路505保护测控.零序电流	0.00
10kV营中回路503保护测控.零序电流	0.01
10kV营大一回常504保护测控.零序电流	0.01
10kV营中回路505保护测控.零序电流	0.08
10kV营一回路506保护测控.零序电流	0.01
10kV营西回路507保护测控.零序电流	0.01
10kV营南回路508保护测控.零序电流	0.01
10kV营南回路509保护测控.零序电流	0.00
10kV营东回路510保护测控.零序电流	0.01
10kV营南回路511保护测控.零序电流	0.00
10kV长源回路512保护测控.零序电流	0.00
10kV营南回路513保护测控.零序电流	0.90
1号南源回路514保护测控.零序电流	0.00
2号南源回路515保护测控.零序电流	0.00
3号南源回路516保护测控.零序电流	0.00
4号南源回路517保护测控.零序电流	0.00
5号南源回路518保护测控.零序电流	0.00
6号南源回路519保护测控.零序电流	0.00
7号南源回路520保护测控.零序电流	0.00
8号南源回路521保护测控.零序电流	0.00
9号南源回路522保护测控.零序电流	0.00
10号南源回路523保护测控.零序电流	0.00
11号南源回路524保护测控.零序电流	0.00
12号南源回路525保护测控.零序电流	0.00
13号南源回路526保护测控.零序电流	0.00
14号南源回路527保护测控.零序电流	0.00
15号南源回路528保护测控.零序电流	0.00
16号南源回路529保护测控.零序电流	0.00
17号南源回路530保护测控.零序电流	0.00
18号南源回路531保护测控.零序电流	0.00
19号南源回路532保护测控.零序电流	0.00
20号南源回路533保护测控.零序电流	0.00
21号南源回路534保护测控.零序电流	0.00
22号南源回路535保护测控.零序电流	0.00
23号南源回路536保护测控.零序电流	0.00
24号南源回路537保护测控.零序电流	0.00
25号南源回路538保护测控.零序电流	0.00
26号南源回路539保护测控.零序电流	0.00
27号南源回路540保护测控.零序电流	0.00
28号南源回路541保护测控.零序电流	0.00
29号南源回路542保护测控.零序电流	0.00
30号南源回路543保护测控.零序电流	0.00
31号南源回路544保护测控.零序电流	0.00
32号南源回路545保护测控.零序电流	0.00
33号南源回路546保护测控.零序电流	0.00
34号南源回路547保护测控.零序电流	0.00
35号南源回路548保护测控.零序电流	0.00
36号南源回路549保护测控.零序电流	0.00
37号南源回路550保护测控.零序电流	0.00
38号南源回路551保护测控.零序电流	0.00
39号南源回路552保护测控.零序电流	0.00
40号南源回路553保护测控.零序电流	0.00
41号南源回路554保护测控.零序电流	0.00
42号南源回路555保护测控.零序电流	0.00
43号南源回路556保护测控.零序电流	0.00
44号南源回路557保护测控.零序电流	0.00
45号南源回路558保护测控.零序电流	0.00
46号南源回路559保护测控.零序电流	0.00
47号南源回路560保护测控.零序电流	0.00
48号南源回路561保护测控.零序电流	0.00
49号南源回路562保护测控.零序电流	0.00
50号南源回路563保护测控.零序电流	0.00
51号南源回路564保护测控.零序电流	0.00
52号南源回路565保护测控.零序电流	0.00
53号南源回路566保护测控.零序电流	0.00
54号南源回路567保护测控.零序电流	0.00
55号南源回路568保护测控.零序电流	0.00
56号南源回路569保护测控.零序电流	0.00
57号南源回路570保护测控.零序电流	0.00
58号南源回路571保护测控.零序电流	0.00
59号南源回路572保护测控.零序电流	0.00
60号南源回路573保护测控.零序电流	0.00
61号南源回路574保护测控.零序电流	0.00
62号南源回路575保护测控.零序电流	0.00
63号南源回路576保护测控.零序电流	0.00
64号南源回路577保护测控.零序电流	0.00
65号南源回路578保护测控.零序电流	0.00
66号南源回路579保护测控.零序电流	0.00
67号南源回路580保护测控.零序电流	0.00
68号南源回路581保护测控.零序电流	0.00
69号南源回路582保护测控.零序电流	0.00
70号南源回路583保护测控.零序电流	0.00
71号南源回路584保护测控.零序电流	0.00
72号南源回路585保护测控.零序电流	0.00
73号南源回路586保护测控.零序电流	0.00
74号南源回路587保护测控.零序电流	0.00
75号南源回路588保护测控.零序电流	0.00
76号南源回路589保护测控.零序电流	0.00
77号南源回路590保护测控.零序电流	0.00
78号南源回路591保护测控.零序电流	0.00
79号南源回路592保护测控.零序电流	0.00
80号南源回路593保护测控.零序电流	0.00
81号南源回路594保护测控.零序电流	0.00
82号南源回路595保护测控.零序电流	0.00
83号南源回路596保护测控.零序电流	0.00
84号南源回路597保护测控.零序电流	0.00
85号南源回路598保护测控.零序电流	0.00
86号南源回路599保护测控.零序电流	0.00
87号南源回路600保护测控.零序电流	0.00
88号南源回路601保护测控.零序电流	0.00
89号南源回路602保护测控.零序电流	0.00
90号南源回路603保护测控.零序电流	0.00
91号南源回路604保护测控.零序电流	0.00
92号南源回路605保护测控.零序电流	0.00
93号南源回路606保护测控.零序电流	0.00
94号南源回路607保护测控.零序电流	0.00
95号南源回路608保护测控.零序电流	0.00
96号南源回路609保护测控.零序电流	0.00
97号南源回路610保护测控.零序电流	0.00
98号南源回路611保护测控.零序电流	0.00
99号南源回路612保护测控.零序电流	0.00
100号南源回路613保护测控.零序电流	0.00

图 7 SCADA 系统中营房村变零序电流

Fig. 7 Zero-sequence current of Yingfangcun transformer substation in SCADA system

将每条 10 kV 线路零序电流显示在一个页面，

便于调控人员比较零序电流的幅值及其变化量。

3.2 中性点不接地系统选线案例

武汉电网常青变 10 kV6#母线的接线方式如图 8 所示。

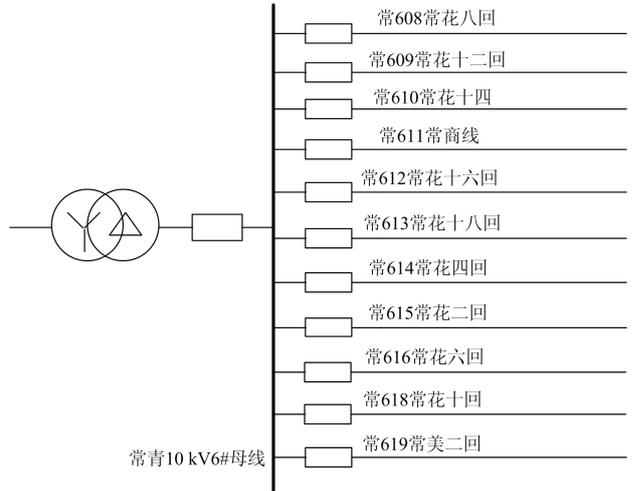


图 8 常青变接线方式

Fig. 8 Connecting mode of Changqing transformer substation

2017 年 2 月 28 日，常青变 10 kV6#母线发生单相接地故障，各条线路零序电流如表 2 所示。

表 2 各条线路零序电流

Table 2 Zero sequence current in feeder

线路	零序电流/A	线路	零序电流/A
常 608 常花八回	0.00	常 614 常花四回	0.31
常 609 常花十二回	0.00	常 615 常花二回	0.96
常 610 常花十四回	4.61	常 616 常花六回	0.33
常 611 常商线	0.13	常 618 常花十回	0.22
常 612 常花十六回	1.40	常 619 常美二回	0.58
常 613 常花十八回	0.72	—	—

由表 2 可知，常 610 常花十四回零序电流幅值最大，故而判断常 610 常花十四回发生单相接地故障。断开该线路开关后，接地线现象消失，证明故障线路判断正确。

3.3 中性点经消弧线圈接地系统选线案例

武汉电网营房村变 10 kV5#母线的接线方式如图 9 所示。

2017 年 5 月 11 日，营房村 10 kV5#母线发生单相接地故障，故障时刻 5#母线上消弧线圈已投运，故障时刻各条线路零序电流如表 3 所示。

断开零序电流最大的一条线路(营 512 长源线)后，各条线路零序电流如表 4 所示。

由表 3、表 4 计算各条线路零序电流幅值的变化量，如表 5 所示。

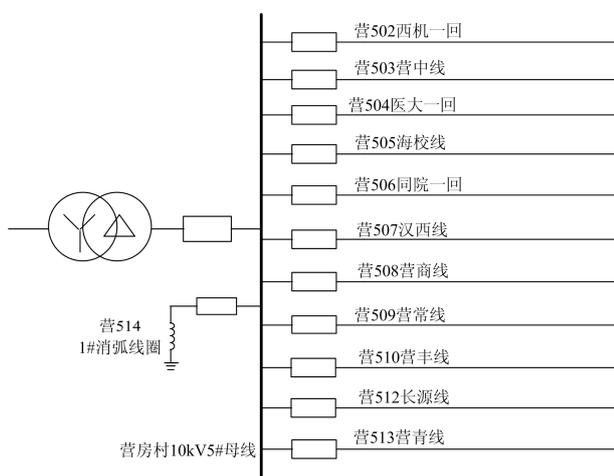


图 9 营房村变接线方式

Fig. 9 Connecting mode of Yingfangcun transformer substation

表 3 各条线路零序电流

Table 3 Zero sequence current in feeder

线路	零序电流/A	线路	零序电流/A
营 502 西机一回	0.98	营 508 营商线	0.84
营 503 营中线	0.47	营 509 营常线	0.96
营 504 医大一回	0.31	营 510 营丰线	1.01
营 505 海校线	0.42	营 512 长源线	1.12
营 506 同院一回	1.08	营 513 营青线	0.58
营 507 汉西线	1.10	—	—

表 4 各条线路零序电流(断开营 512 长源线)

Table 4 Zero sequence current in feeder (break 512 Changyuan line)

线路	零序电流/A	线路	零序电流/A
营 502 西机一回	0.93	营 508 营商线	0.82
营 503 营中线	0.44	营 509 营常线	0.92
营 504 医大一回	0.31	营 510 营丰线	0.98
营 505 海校线	0.47	营 512 长源线	线路断开
营 506 同院一回	1.05	营 513 营青线	0.58
营 507 汉西线	0.50	—	—

表 5 各条线路零序电流变化量

Table 5 Zero sequence current variation in feeder

线路	零序电流/A	线路	零序电流/A
营 502 西机一回	0.05	营 508 营商线	0.02
营 503 营中线	0.03	营 509 营常线	0.04
营 504 医大一回	0.00	营 510 营丰线	0.03
营 505 海校线	0.05	营 512 长源线	线路断开
营 506 同院一回	0.03	营 513 营青线	0.00
营 507 汉西线	0.60	—	—

由表 5 可知, 营 507 汉西线零序电流变化量最大, 而其他线路零序电流基本不变, 故而判断营 507

汉西线发生单相接地故障。断开该线路开关后, 接地线现象消失, 证明故障线路判断正确。

3.4 实际应用情况统计

截至目前, 武汉电网已将稳态零序电流比较选线方法推广应用至 19 座变电站, 在已经发生的 14 次 10 kV 单相接地故障中, 故障线路全部判断正确, 最多拉路 1 次就能判断故障线路, 实际选线案例如表 6 所示。

表 6 选线案例

Table 6 Line selecting cases

时间	变电站	故障线路	选线时间/min
2017年2月28日	常青	常 610 常花十四	2
2017年3月16日	光华	华 511 二零五线	3
2017年5月7日	光华	华 615 华区线	4
2017年5月11日	营房村	营 507 汉西线	4
2017年6月25日	葛店	葛 503 武化二回	2
2017年7月12日	西湖	湖 617 协和线	3
2017年7月12日	营房村	营 512 长源线	4
2017年7月27日	营房村	营 502 西机一回	3
2018年3月1日	西湖	湖 620 喷泉线	3
2018年3月16日	光华	华 615 华区线	4
2018年3月19日	光华	华 517 华丽线	3
2018年4月26日	西湖	湖 616 湖房线	3
2018年5月6日	西湖	湖 613 取水一回	3
2018年5月18日	铁桥村	铁 508 铁客线	2

基于 SCADA 系统的选线方法有效减少拉路选线次数, 选线平均时间由原来的 30 min 缩短至 3.07 min, 效率提升了 89.76%。

3.5 应用场合分析

提出的选线方法虽然只是比较零序电流的相对大小, 但由于零序电流本身的幅值较小, 特别是过渡电阻较大时, 零序电流幅值就更小, 从目前的实际应用情况来看, 0.01 A 的零序电流差别就可以完成选线, 按照 CT 变比的取值(600/5~100/5), 变电站遥测量采集装置宜采用 14 位以上 AD, 以满足 0.01 A 的测量精度要求。

4 结论

提出了基于 SCADA 系统的稳态零序电流比较选线方法, 利用各条线路的零序电流幅值和零序电流幅值变化量进行选线, 主要结论如下。

(1) 对于中性点不接地系统, 选择零序电流幅值最大的线路为故障线路; 对于中性点经消弧线圈接地的系统, 在断开零序电流幅值最大的线路后, 选择零序电流幅值变化量最大的线路为故障线路。

(2) 稳态零序电流比较选线方法是一种定性判别故障线路的方法, 只与线路零序电流幅值以及幅

值变化量的相对大小有关,而与零序电流的绝对大小无关,选线策略无需设定专门的判断阈值。

(3) 稳态零序比较选线方法与暂态分量法、注入信号法、中电阻法等先进选线方法相比仅增多了 1 次“拉路”操作,但无需新增专门的选线装置或对变电站中性点进行改造,只需将线路零序电流接入 SCADA 系统就可在调度端完成选线,简单易用、适用性强,能够大范围推广。

参考文献

- [1] 石一辉. 小电流接地系统智能故障选线装置的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
SHI Yihui. Research on small current grounding system of intelligent fault line selection device[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007.
- [2] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 季媛媛. 小电流接地系统单相接地故障选线方法的研究[M]. 南京: 东南大学, 2017.
- [4] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.
SU Zhantao, LÜ Yanping. A new wavelet packet analysis based method to detect faulty line for single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33.
- [5] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yaonan, HUO Bailin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [6] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.
- [7] 徐铭铭, 高淑萍, 常仲学, 等. 基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 73-78.
XU Mingming, GAO Shuping, CHANG Zhongxue, et al. Model recognition based single-phase earthed faulty line selection method of Petersen coil grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 73-78.
- [8] GONG Jing, LUAN Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison[C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, November 15-18, 2009, Tokyo, Japan: 1 -5.
- [9] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [10] CUI Tao, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Modelling study for high impedance fault detection in MV distribution system[C] // 43rd International University Power Engineering Conference, September 1-4, 2008, Padova, Italy: 1- 5.
- [11] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [12] 孙桂花, 王敬华, 张璇, 等. 分布式智能的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 72-78.
SUN Guihua, WANG Jinghua, ZHANG Xuan, et al. Small current grounding fault location method of distributed intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 72-78.
- [13] SHI Shenxing, JIANG Bo, DONG Xinzhou, et al. Protection of microgrid[C] // 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change, March 29 - April 1, 2010, Manchester, UK: IET, 2010: 1-4.
- [14] 薛永端, 张秋凤, 颜廷纯, 等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 80-85.
XUE Yongduan, ZHANG Qiufeng, YAN Tingchun, et al. Faulty feeder identification based on combined transient and power-frequency components in resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 80-85.

- [15] 王建元, 张峥. 基于注入信号与小波能量的小电流接地故障选线研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 28-32.
WANG Jianyuan, ZHANG Zheng. Research of fault line selection in small current grounding system based on injected signal and wavelet energy[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(5): 28-32.
- [16] 朱珂, 王怡轩, 倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 189-196.
ZHU Ke, WANG Yixuan, NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 189-196.
- [17] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [18] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-134.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-134.
- [19] 王俊杰, 江智军, 周江源. 中电阻法小电流选线的 RTDS 测试可行性分析[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(8): 135-142.
WANG Junjie, JIANG Zhijun, ZHOU Jiangyuan. Feasibility analysis using RTDS for small current line selection based on medium resistance method[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(8): 135-142.
- [20] 明志强, 许虎. 经消弧线圈接地系统的中电阻快速选线方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 112-114.
MING Zhiqiang, XU Hu. Method of fast grounding fault line selection with arc-suppression coil and median resistor[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 112-114.
- [21] 马发勇, 厉启鹏, 马志斌, 等. 电力调度 SCADA 系统中历史数据压缩及存储策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1109-1114.
MA Fayong, LI Qipeng, MA Zhibin, et al. The research of historical data compression and storage strategy in power dispatch SCADA system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1109-1114.
- [22] 叶飞, 王恒, 厉启鹏, 等. 电力调度 SCADA 系统画面数据刷新方法优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 69-74.
YE Fei, WANG Heng, LI Qipeng, et al. Optimization of interface data refresh method in power dispatch SCADA system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 69-74.
- [23] 牛瑞, 张望妮. SCADA 系统异常数据分析及治理建议[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 68-71.
NIU Rui, ZHANG Wangni. Abnormal data analysis and treatment recommendations for SCADA system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 68-71.

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-09-03

作者简介:

朱涛(1974—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事继电保护、电网运行以及电力系统自动化相关工作。E-mail: 94028752@qq.com

(编辑 许威)