

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190468

# 利用电压暂态量的电压时间型馈线自动化反向合闸闭锁策略改进措施

张维<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>1</sup>, 刘健<sup>2</sup>, 常仲学<sup>1</sup>, 张志华<sup>2</sup>, 陈勇<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学陕西省智能电网重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054; 3. 珠海许继电气有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 针对电压时间型馈线自动化中基于残压工频量幅值的反向合闸闭锁判据在相间接地或三相短路低过渡电阻故障下存在失效的问题, 提出了利用线电压暂态量有效值提高反向合闸闭锁判据灵敏度的措施。定义了衡量反向合闸闭锁灵敏度的残压检测系数, 指出了现有判据的盲区。分析并确定了线电压暂态量有效值计算数据窗, 确立了以电压互感器的精工电压作为阈值的实用化策略。PSCAD 仿真和实验验证了所提策略的可行性。改进措施可减少因联络开关转供导致的对侧变电站停电次数且无需加装一次设备, 所以造价低且易于工程实现。

**关键词:** 馈线自动化; 电压时间型; 反向合闸闭锁; 残压检测系数; 线电压暂态量

## Blocking reverse-closed strategy improvement measures with voltage transients for the voltage-time feeder automation

ZHANG Wei<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, CHANG Zhongxue<sup>1</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China;  
3. Zhuhai XJ Electric Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the existing reverse-closing lock criterion based on the amplitude of residual voltage of voltage-time type feeder automation system may lose effectiveness in cases of two or three phase to ground fault with low transition resistance, a novel method based on the root-mean-square value of transient line-to-line voltage is proposed in this paper to improve the sensitivity of the reverse-closing lock criterion. The residual voltage detection coefficient is defined to evaluate the sensitivity of reverse-closing lock criterion and the blind zone of existing criterion is pointed out. The time window to calculate the root-mean-square value of transient line-to-line voltage is analyzed and the practical setting method of threshold based on the minimum voltage that can ensure the PT is illustrated. PSCAD based simulation and experiments in lab validate the effectiveness of the proposed method. The novel criterion can reduce the number of power outages of opposite side substation caused by the misclosing of the loop switch and it needs not the extra primary instruments, thus its cost is low and convenient to be realized in engineering.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5226SX1600U9) and Science and Technology Plan of Guangdong Province (No. 2015B010128006).

**Key words:** feeder automation; voltage-time type; reverse-closing lock; residual voltage detection coefficient; transient component of line voltage

## 0 引言

馈线自动化是配电网故障区段定位与隔离的

主要手段, 经过多年的研究和工程实践, 馈线自动化主要有三类典型的应用模式: 基于通信的集中型、智能分布型以及电压时间型<sup>[1-11]</sup>。因为电压时间型应用模式的工程造价低并且不依赖通信, 所以广泛应用于对供电可靠性要求相对较低的 B、C 区。电压时间型馈线自动化模式隔离故障的主要策略为发

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5226SX1600U9); 广东省科技计划项目资助(2015B010128006)

生故障后站内出线断路器首先速断跳闸,故障点上游开关Y时间(合闸后故障确认时间)内失压(采样电压有效值低于60%额定电压)闭锁正向合闸,故障点下游开关在停电侧检测到残压,反向供电时闭锁合闸。其中残压检测的判断依据为采样电压工频分量有效值不低于30%的额定电压,持续时间不少于50ms。这样,在实际运行中存在以下两个问题:1)考虑到经济性和施工安装简便,工程应用中一般在分段开关两侧各装设单台PT,当接入PT的两相发生接地故障或三相短路故障且过渡电阻较小时,下游开关检测到的残压工频量有效值将低于整定值,分段开关反向合闸闭锁功能失效,联络开关转供时对侧变电站保护会跳闸,对侧线路将出现短时停电;2)当分段开关采用永磁断路器时<sup>[12]</sup>,由于故障切除快,邻近故障点的下游开关感受到的残压持续时间小于40ms,现有残压有效值检测方法也会失效。针对以上问题,如果改造现有分段开关,使其具备可测量三相(线)电压的功能,依然存在三相短路时失效的可能,而且由于电压时间型馈线自动化设备已在全国大量运行,全部进行改造的工程量大、造价高。因此,在不增加一次设备、仅利用线电压信息的基础上,对电压时间型馈线自动化反向合闸闭锁策略进行改进具有重要的意义。

文献[13]提出将联络开关改为断路器,然后采用过流速断保护作为分段开关反向合闸闭锁失效的后备保护,但要求变电站出线断路器速断保护调整为0.2s延时过流保护。文献[14-15]提出利用线路对端断路器动作后电流序分量的变化程度来识别保护区内外故障,该原理需要测量三相电流,而配网设备大多只能测量A、C两相电流和零序电流。

实际上,故障点上游开关合于故障后会出现较大的电压暂态量<sup>[16-17]</sup>,据此可以构造基于电压暂态量的反向合闸闭锁判据。本文结合电压时间型馈线自动化模式的自身特点,首先定义了残压检测系数以衡量反向合闸闭锁功能的灵敏度,提出一种利用线电压暂态量的反向合闸闭锁判据,分析并确定了线电压暂态量计算数据窗,确立了以电压互感器的精工电压作为阈值。最后通过PSCAD/EMTDC仿真和搭建实验线路验证了该策略的可行性。

## 1 现有残压反向合闸闭锁判据存在的问题

### 1.1 电压时间型馈线自动化故障隔离逻辑简介

考虑到投资与供电可靠性提升效益关系,一条馈线大多设置为三分段。配电网电压时间型馈线自动化典型应用场景(三分段单环网)如图1所示。分段点S11~S22安装分段开关,联络点L安装联络开

关(常开状态)。

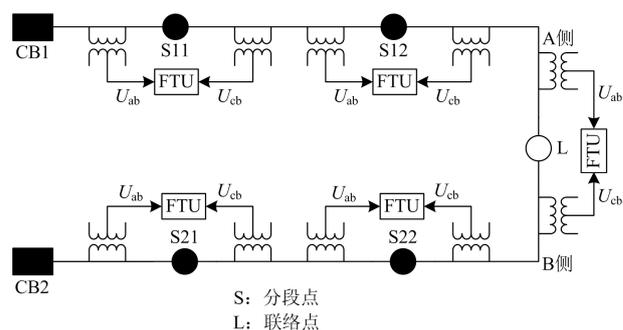


图1 电压时间型馈线自动化实施系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of voltage-time feeder automation implementation system

下面以S11和S12之间发生永久性故障为例来简要说明现有电压时间型馈线自动化的动作过程。假设故障时刻为 $t_0$ ,分段点和联络点开关的电源侧(正向侧)及负荷侧(反向侧)线电压为 $U_{ab}(t)$ 和 $U_{bc}(t)$ 。需要注意的是当开关处于联络转供时,正反向将对调。因此在工程上,分段开关延时自动合闸过程先得电一侧为电源侧(即正向侧)。

(1)故障发生后, CB1保护跳闸, S11、S12失压、分闸;

(2)CB1重合闸, S11得电X时间(默认7s)合闸,合于故障, CB1再次检测到故障后加速保护跳闸, S11在合闸后Y时间内失压,分闸、闭锁正向合闸;

(3)在此期间, S12识别出残压超过定值 $U_{set}$ ,闭锁反向合闸,实现故障区段的隔离;

(4)联络开关L在XL时限内合闸,实现故障点下游区段的负荷转供。

如前文所述,故障点下游开关均需要配置残压反向合闸闭锁模块,该模块功能现有硬件检测和软件检测两种实现方式,下边分别论述它们存在的问题。

### 1.2 硬件残压检测模块

以往配电自动化终端未配置后备电源,残压检测元件采用硬件电路实现,见图2。其中工频变压器将PT采集的线电压220V(该电压由一次侧线电压互感器变换而来,参考前文)转换为25V,再经全桥整流后给残压检测电路提供信号源,同时还给残压检测电路和残压信号输出电路提供驱动电源。残压检测电路主要由RC电路组成,残压信号输出电路主要由自保持继电器和光耦构成。自保持继电器工作电压范围为12~1.5V,考虑到工频变压器的制作工艺、成本以及电路设计的简便性,一般选用

12 V 或 5 V, 下文以工作电压为 12 V 的继电器为例加以说明。

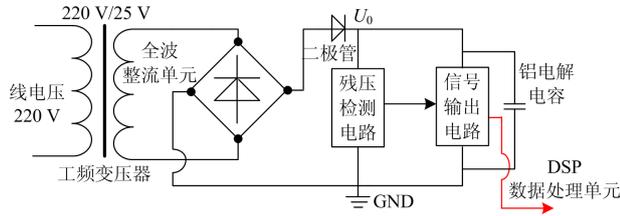


图 2 残压检测模块电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of residual voltage detection module

根据上述电路的转换比例, 定义残压检测的灵敏度系数  $K_{rep}$  衡量该模块的检测能力, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_0 \geq K_{rel} \times K_{ac} \times 12 \\ K_{rep} = \frac{U_e}{U_{set}} = \frac{K_{rec} \times 25}{U_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数, 取 1.1;  $K_{ac}$  为继电器启动电压系数, 典型值为 0.75;  $K_{rec}$  为整流电压系数, 典型值为 1.414。

根据上述公式计算可得  $K_{rep}$  为 3.57。由于一次侧线电压互感器(PT)变比为 10 kV/220 V, 由此可知  $U_{set}$  为 2.8 kV, 也即该电路能可靠检出的线路残压为 2.8 kV。

此外, 该残压检测电路中, 时间常数约为  $\frac{1}{25}$ , 其信号检测时间窗口  $T_0$  需要 40 ms 以上。

由此可知, 硬件检测模块由于驱动电压和检测时间的限制, 无法适用于低阻接地故障检测和快速保护系统中。

### 1.3 软件残压检测模块

随着储能元件如超级电容、锂电池的发展<sup>[18-20]</sup>, 新的配电自动化终端都配置后备电源, 采用软件模块实现残压检测功能, 其公式为

$$\begin{cases} U_{ab} \geq U_{set} \\ T_0 \geq T_{set} \end{cases} \quad (2)$$

基于电流三段式保护原理, 采用基波(工频)有效值算法。式中:  $U_{ab}$  为周波有效值;  $U_{set}$  和  $T_{set}$  分别参考 1.2 节硬件残压检测模块的值, 即  $0.28U_e$  和 40 ms;  $T_0$  为检测持续时间。

下边分析该残压检测模块的死区, 采用图 8 所示的仿真模型, 设定 B 区段发生故障, 故障发生时刻为 1.002 s, 过渡电阻为 4  $\Omega$  时, 对接入 PT 的两相(B、C)短路接地故障和三相短路故障进行仿真, S12 开关处电源侧检测到的残压工频有效值经计算分别为 2.65 kV、2.78 kV, 均小于  $0.28U_e$ 。两种故

障处理过程的电压和开关位置状态分别见图 3 和图 4。

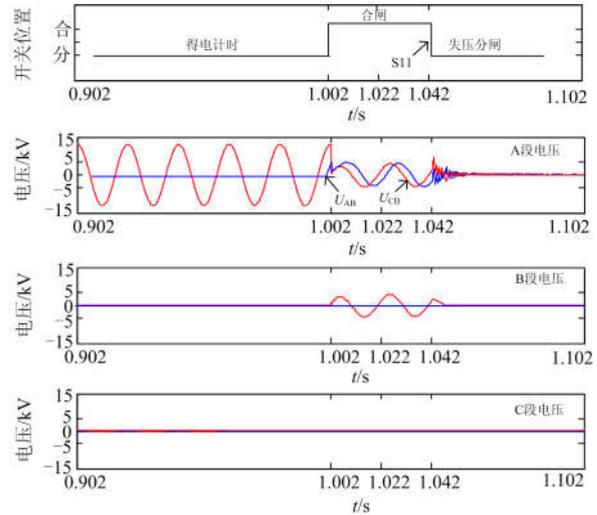


图 3 两相短路接地故障电压波形图

Fig. 3 Voltage waveform of two-phase short circuit ground fault

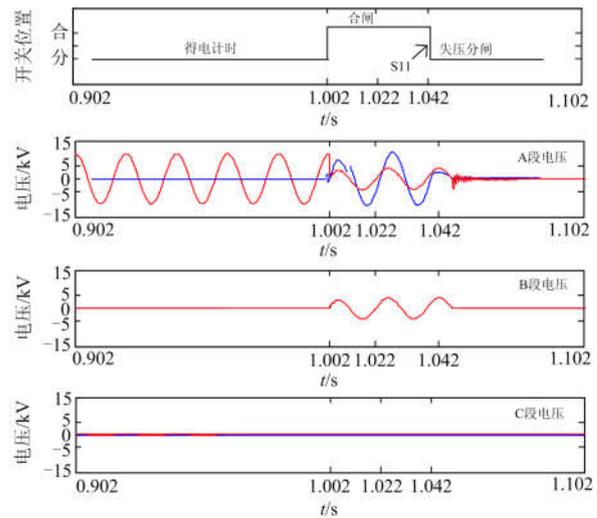


图 4 三相短路接地故障电压波形图

Fig. 4 Voltage waveform of three-phase short circuit ground fault

由此可知: 现有的软件残压检测模块仅实现了硬件残压检测模块的简单替换, 对于低阻接地故障仍然存在死区。

## 2 利用电压暂态量提高灵敏度的措施

### 2.1 电压暂态量分析

根据电压时间型馈线自动化故障处理过程可知, 开关 S11 重合故障时开关后端电路属于一阶电路的零状态响应, 见图 5。图中:  $U_s$  为系统电源;  $u_f$  为电压暂态分量;  $Z_s$  为系统阻抗;  $Z_1$  为故障点前端的线路阻抗;  $R$  和  $L$  为故障点后端的线路电阻和电抗;  $R_f$  为故障点过渡电阻。

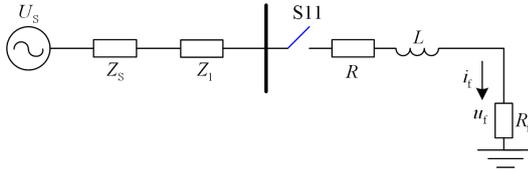


图5 重合故障时电路图

Fig. 5 Circuit of reclosing fault

电压暂态分量可有如式(3)所示表达式。

$$u_f = i_f R_f \quad (3)$$

式中： $u_f$ 为重合于故障时的电压暂态量，也即S12开关可以检测到的电源侧电压； $i_f$ 为包含时间常数 $\tau$ 的电流暂态量。

根据电路分析，一般经过 $3\tau\sim 5\tau$ 的衰减时间，该电路进入稳定状态。外施正弦激励时，通常经过大约半个周期，该电路电流的最大瞬时值的绝对值将接近稳态电流振幅的两倍<sup>[21]</sup>，因此数据计算窗口选取为半个周波。

$$\theta_U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{mg}^2(i)} \geq \theta_{Uset} \quad (4)$$

式中： $\theta_U$ 为重合于故障时的电压暂态量半周波有效值； $U_{mg}(i)$ 为采样瞬时值； $N$ 为半周采样点数； $\theta_{Uset}$ 为阈值。

## 2.2 阈值确定

本文所述应用场景只需要检测出故障电压的有无，因此可以用电压互感器精度作为参考依据，有

$$\theta_{Uset} = K_{rel} \times (1 \pm \alpha) \times (1 \pm \beta) \times U_{ac.min} \quad (5)$$

式中： $K_{rel}$ 为可靠系数，一般取1.1； $U_{ac.min}$ 为电压互感器的最小精工电压； $\alpha$ 为电压互感器的测量误差，典型为10%； $\beta$ 为终端的测量误差，典型为0.5%。下面通过试验测定 $\alpha$ ，工程现场线电压互感器主要分为开口互感器和闭口互感器两种，开口互感器不易饱和但制作成本较高，在此选取两只闭口和两只切口互感器，分别排序为1~4，测试相为 $U_{AB}/U_{ab}$ ，电压比为10 kV/0.22 kV，带载负荷为50 VA，表1为采用直接法的测试数据。

表1 电压互感器直接法测量数据

Table 1 Direct measurement data of voltage transformer

试品	误差	额定电压不同比例下的输出测量数据				
		1%	2%	5%	10%	100%
1	比差	-4.56	-4.59	-4.61	-4.56	-4.70
	角差	-36.9	-38.4	-37.0	-36.0	-37.8
2	比差	-4.62	-4.64	-4.64	-4.59	-4.71
	角差	-38.0	-38.3	-36.5	-36.9	-36.9
3	比差	-1.70	-1.6	-1.65	-1.63	-1.62
	角差	-17.6	-18.1	-19.2	-20.1	-21.9
4	比差	-1.65	-1.63	-1.62	-1.59	-1.62
	角差	-23.1	-23.4	-24.0	-24.3	-26.8

表2和表3分别为闭口互感器和切口互感器的伏安特性测试数据。

表2 闭口电压互感器伏安特性测量数据

Table 2 Measurement data of voltage-ampere characteristics of closed voltage transformer

序号	U/V	I/A	序号	U/V	I/A	序号	U/V	I/A
1	1.213	0	15	113.2	0.022	29	257.5	0.04
2	3.810	0.001	16	119.9	0.023	30	263.9	0.041
3	5.403	0.002	17	134.1	0.025	31	286	0.045
4	9.01	0.003	18	142.1	0.026	32	303.5	0.048
5	11.6	0.004	19	154.3	0.028	33	332.7	0.054
6	17.42	0.005	20	161.2	0.028	34	342.4	0.057
7	32.07	0.009	21	172.5	0.029	35	369.2	0.074
8	36.21	0.01	22	179.1	0.03	36	385.7	0.103
9	50.66	0.013	23	195.3	0.032	37	410.7	0.33
10	57.98	0.014	24	202.4	0.033	38	426.9	0.56
11	72.97	0.016	25	214.3	0.035	39	437.7	0.859
12	80.22	0.018	26	219.2	0.035	40	444.9	1.16
13	94.13	0.02	27	232.6	0.037	41	453.2	1.388
14	100.4	0.021	28	241.8	0.038	42	461.5	1.67

表3 切口电压互感器伏安特性测量数据

Table 3 Measurement data of voltage-ampere characteristics of incision voltage transformer

序号	U/V	I/A	序号	U/V	I/A	序号	U/V	I/A
1	1.201	0	15	111.1	0.102	29	251.3	0.241
2	2.030	0.001	16	124.6	0.114	30	282.2	0.269
3	5.347	0.005	17	130.7	0.12	31	295	0.288
4	7.835	0.008	18	144.1	0.134	32	319.1	0.337
5	11.76	0.013	19	149.7	0.141	33	333.1	0.358
6	22.24	0.024	20	165.4	0.151	34	357.9	0.421
7	26.73	0.028	21	171.6	0.157	35	373.8	0.471
8	41.6	0.042	22	185.6	0.169	36	384.6	0.545
9	48.42	0.048	23	192.1	0.175	37	396.4	0.659
10	62.83	0.061	24	205	0.191	38	407.7	0.826
11	69.71	0.068	25	212.6	0.196	39	422.1	1.048
12	83.48	0.08	26	225.2	0.212	40	428.7	1.316
13	91.13	0.085	27	231	0.218	41	435.2	1.575
14	104.1	0.097	28	245.8	0.232	42	441.1	1.87

由综合直接法和伏安特性法的测试结果可知：

(1) 电压互感器一般只要求测量0.8倍~1.2倍额定电压，但在0.01倍~0.1倍额定电压范围内同样具有良好的线性度，且误差在5%以内。(2) 配电自动化终端最小测量电流为2 mA，闭口互感器在5.406 V(2.5%)时输出电流为2 mA，开口互感器在5.374 V(2.4%)时输出电流为5 mA，见图6。

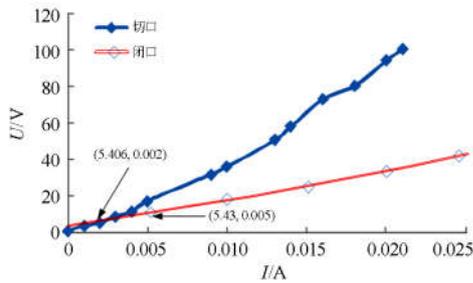


图 6 切口和闭口互感器伏安特性对比曲线图

Fig. 6 Diagram of voltage-ampere characteristics of incisions and closed transformers

考虑到可靠性,在此选定 5%额定电压作为电压互感器最小精工电压  $U_{ac,min}$ 。由此计算可得  $\theta_{Uset}$  为 0.635 kV。采用半周波暂态量算法的残压检测系数  $K_{rep}$  为

$$K_{rep} = \frac{U_e}{\theta_{Uset}} = 15.74 \quad (6)$$

综上,采用本文所述改进措施后,软件检测模块的残压检测系数为 15.74,相比原有基于残压检测模块,灵敏性提升了 4 倍。

### 2.3 可靠性分析及检测流程

如前文所述,上述改进方法提高了残压检测判据的灵敏度,但启动判据采用稳态判据:线路失压开关分闸,所以整体上抗干扰能力没有明显下降。改进后的软件判据如式(7)所示。

$$\begin{cases} \text{启动判据: } YX - HW = 0 \\ \text{出口判据: } \theta_U \geq U_{set} \ \& \ T_o \geq 10 \text{ ms} \end{cases} \quad (7)$$

基于电压暂态量的残压检测流程见图 7。

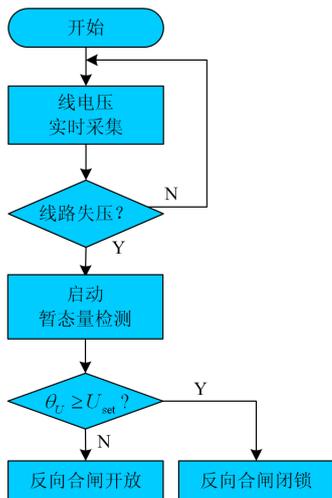


图 7 基于暂态量检测方法的反向合闸闭锁流程图

Fig. 7 Flowchart of reverse closing locking based on transient detection method

针对采用硬件检测模块的配电终端实施策略如下: (1) 增加后备电源,箱式配电终端直接内置一个维持配电终端运行 15 min 的超级电容模组或 24 V/7 AH 蓄电池组,罩式配电终端采用外置电池盒形式,通过电缆航插件连接; (2) 提高采样速度,如果电压采集轮询时间为秒级,则在软件中增加一个 1 ms 定时采样中断; (3) 增加基于暂态量的软件检测模块; (4) 原有硬件检测电路的残压信号与暂态量检测模块信号为“或”关系,二者任意一个或两个同时满足闭锁判据都禁止反向合闸。

针对采用原有基于工频电压周波有效值软件检测模块的配电终端直接修改程序为基于暂态量的软件检测模块,并将门限值调整即可。

### 3 仿真分析

根据配网中各元件参数,建立配电网仿真模型如图 8 所示。该模型中,110 kV 变电站有一回进线,通过一台主变压器配出的 10 kV 系统为单母线形式,母线带有 2 条馈线。依据前文所述线路 1 采用 A、B、C 三分段(S11、S12)以及联络开关 L,该线路三变压器的变送功率总共为 1.2 MVA,其实载负荷有功功率为 0.8 MW,线路参数见表 4。

表 4 线路参数表

Table 4 Parameters of line

线路参数	正序			零序		
	电阻/ (Ω/km)	电抗/ (Ω/km)	电容/ (Ω×km)	电阻/ (Ω/km)	电抗/ (Ω/km)	电容/ (Ω×km)
电缆	0.024 2	0.162 2	10 000	0.196 5	0.306 3	14 600
架空	0.020 8	0.281 3	24 700	0.114 8	0.719 1	60 700

故障点位于 B 区段,分别模拟不同的故障时刻、过渡电阻以及故障类型, B 区段下游开关 S12 仿真计算结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 三相短路时 S12 点暂态量计算值

Table 5 Calculation value of S12 transient at three-phase short circuit

故障时刻/s	三相短路接地 $U_{cb}$			
	过渡电阻			
	3 Ω	2 Ω	1.5 Ω	1 Ω
1.000	3.020	2.099	1.598	1.081
1.002	3.031	2.099	1.594	1.074
1.005	3.055	2.088	1.552	1.039
1.010	3.059	2.203	1.734	1.290
1.015	2.573	1.810	1.363	0.890
1.020	2.900	2.007	1.486	0.956

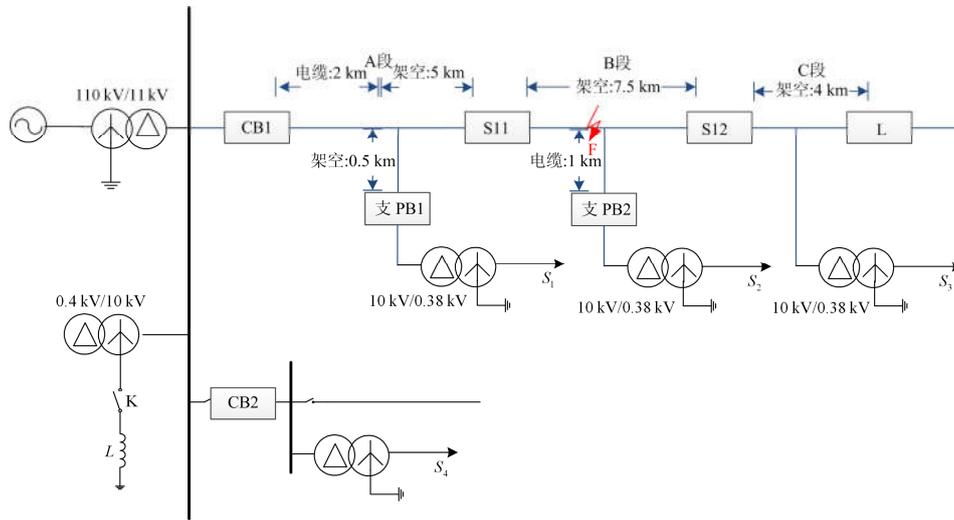


图 8 基于 PSCAD 的配电网仿真模型

Fig. 8 PSCAD based simulation model of distribution network

表 6 两相短路接地时 S12 点暂态量计算值

Table 6 Calculation value of S12 point transient when two-phase short circuit is grounded

故障时刻/s	接入两相短路接地 $U_{cb}$			
	过渡电阻			
	3 $\Omega$	2 $\Omega$	1.5 $\Omega$	1 $\Omega$
1.000	3.055	2.200	1.731	1.230
1.002	3.130	2.289	1.818	1.321
1.005	3.020	2.080	1.562	1.032
1.010	3.054	2.199	1.731	1.230
1.015	3.022	2.070	1.562	1.031
1.020	2.959	2.007	1.485	0.956

可以看出, 接地过渡电阻 1  $\Omega$  及以上的故障, 基于本算法得出的计算值均超过前文所述的阈值, 也间接证明了前文所述该算法的灵敏度是原有软件模块的 4 倍。

#### 4 试验效果对比分析

在某实验室搭建真值物理线路, 并配置自动化设备构建联调测试平台, 该自动化线路示意图 9。模拟 A、B、C 三区的接入相两相短路接地故障, 过渡电阻为 2  $\Omega$ , 分别采用传统残压检测、L 点速断保护、本文所述方法。

下面以 B 区发生故障为例, 阐述区段隔离与复电过程。

##### 4.1 传统残压检测区段隔离与复电

区段隔离与复电情况见图 10, 由于故障点下游开关无法闭锁反向合闸, 导致对侧变电站出线开关跳闸, 具体处理过程如下。

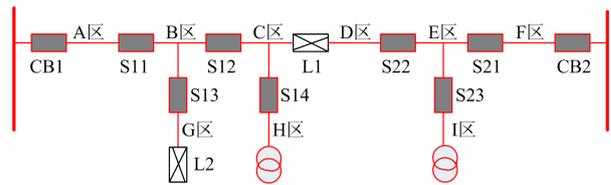


图 9 自动化测试线路图

Fig. 9 Diagram of automatic feeder line

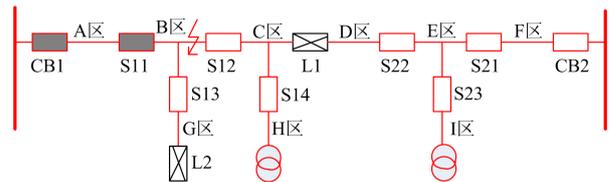


图 10 传统残压检测方法故障隔离与复电结果

Fig. 10 Fault isolation and recovery results of conventional residual pressure detection method

(1) 故障发生后, CB1 保护跳闸, S11、S12 失压且分闸。

(2) CB1 重合闸, S11 得电 X 时间(默认 7 s)合闸, 合于故障, CB1 再次检测到故障后加速保护跳闸, S11 在合闸后 Y 时间内失压, 分闸、闭锁正向合闸。

(3) 在此期间, S12 和 S13 的残压检测模块未识别出残压, 无法闭锁反向合闸。

(4) 联络开关 L1 和 L2 在 XL 时限内合闸; S12 和 S13 得电后延时合闸, 合于故障导致对侧变电站出线开关保护跳闸。

##### 4.2 L 点速断保护区段隔离与复电

区段隔离与复电情况见图 11, 该方法需要调整 CB1 和 CB2 的速断保护为延时 0.2 s 过流保护, L1

和 L2 配置 0 s 速断保护。虽然故障点下游开关无法闭锁反向合闸，但 L 配置有速断保护，可避免对侧出线开关保护跳闸。

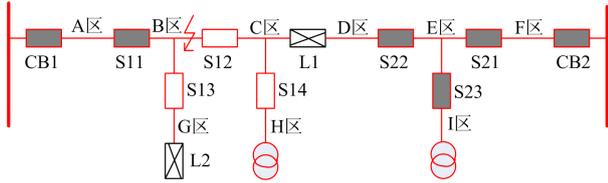


图 11 L 点速断保护方法故障隔离与复电结果

Fig. 11 Fault isolation and recovery results of L-point quick-break protection method

故障处理过程如下：

(1) 故障发生后，CB1 延时 0.2 s 保护跳闸，S11、S12 失压、分闸。

(2) CB1 重合闸，S11 得电 X 时间(默认 7 s)合闸，合于故障，CB1 再次检测到故障后加速保护跳闸，S11 在合闸后 Y 时间内失压，分闸、闭锁正向合闸。

(3) 在此期间，S12 和 S13 的残压检测模块未识别出残压，无法闭锁反向合闸。

(4) 联络开关 L1 和 L2 在 XL 时限内合闸；S12 和 S13 得电后延时合闸，合于故障，L1 和 L2 速断保护跳闸，并闭锁合闸。

### 4.3 本文所述方法区段隔离与复电

区段隔离与复电情况见图 12。

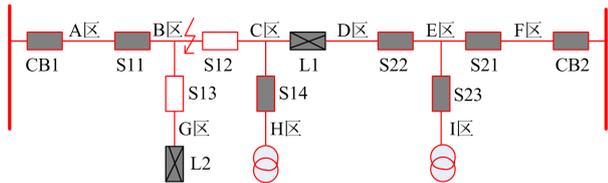


图 12 电压暂态量检测方法故障隔离与复电结果

Fig. 12 Fault isolation and recovery results of voltage transients detection method

故障处理过程如下：

(1) 故障发生后，CB1 保护跳闸，S11、S12 失压、分闸。

(2) CB1 重合闸，S11 得电 X 时间(默认 7 s)合闸，合于故障，CB1 再次检测到故障后加速保护跳闸，S11 在合闸后 Y 时间内失压，分闸、闭锁正向合闸。

(3) 在此期间，S12 和 S13 的残压检测模块识别出残压，闭锁反向合闸。

(4) 联络开关 L1 和 L2 在 XL 时限内合闸；S14 得电后延时合闸。

其余区段隔离与复电情况本文不再赘述，实验结果如表 7 所示。由此可知本方法相比其他两种方

法具有明显的优越性。

表 7 实验效果

Table 7 Experimental results

方法	故障区段		
	A	B	C
残压检测	B、C 区停电 对侧跳闸	C 区停电 对侧跳闸	对侧跳闸
L 速断保护	B、C 区停电	C 区停电	隔离成功
本方法	隔离后复电	隔离后复电	隔离成功

## 5 结语

本文给出了线电压暂态量作为反向合闸闭锁策略。理论分析和仿真验证表明，采用半周波线电压暂态量的残压检测方法能够进一步提升反向合闸闭锁的灵敏性，为反向合闸判据提供了新的改进思路：

(1) 针对已有硬件检测电路的配电终端，增加基于暂态量的软件检测方法，并通过增加 1 ms 定时中断提高采集数据轮询速度；(2) 针对基于周波有效值软件检测的配电终端，直接改为基于暂态量的软件检测方法。

## 参考文献

- [1] 肖小兵, 黄亮亮, 王宇, 等. 分层备用保护型馈线自动化技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 164-170.  
XIAO Xiaobing, HUANG Liangliang, WANG Yu, et al. Research of distributed feeder automation with level and protective backup[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 164-170.
- [2] 朱国防, 沈培锋, 王勇, 等. 基于拓扑片的智能分布式馈线拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 152-157.  
ZHU Guofang, SHEN Peifeng, WANG Yong, et al. Dynamic identification method of feeder topology for distributed feeder automation based on topological slices[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 152-157.
- [3] LING W S, LIU D, YANG D X, et al. The situation and trends of feeder automation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 1138-1147.
- [4] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于 GOOSE 的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 183-190.  
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.
- [5] 陈勇, 海涛. 电压型馈线自动化系统[J]. 电网技术,

- 1999, 23(7): 31-33.
- CHEN Yong, HAI Tao. Voltage type feeder automation system[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 31-33.
- [6] 程红丽, 张伟, 刘健. 合闸速断方式馈线自动化的改进与整定[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 35-39.
- CHENG Hongli, ZHANG Wei, LIU Jian. Improvement of reclosing and instantaneous protection based feeder automation and its setting approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 35-39.
- [7] 葛亮, 谭志海, 赵凤青, 等. 一种改进型馈线自愈控制方案及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 61-67.
- GE Liang, TAN Zhihai, ZHAO Fengqing, et al. An improved feeder self-healing control scheme and its realization[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 61-67.
- [8] 凌万水, 刘东, 陆一鸣, 等. 基于 IEC 61850 的智能分布式馈线自动化模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 90-92.
- LING Wanshui, LIU Dong, LU Yiming, et al. Model of intelligent distributed feeder automation based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 90-92.
- [9] 刘健, 负保记, 崔琪, 等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 62-66.
- LIU Jian, YUN Baoji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent feeder automation system with fast self-healing performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 62-66.
- [10] 张维, 张喜平, 郭上华, 等. 一种新型的电缆网就地馈线自动化方案及应用式[J]. 供用电, 2015, 32(4): 26-28.
- ZHANG Wei, ZHANG Xiping, GUO Shanghua, et al. A new pattern of local cable feeder automation solution and its application[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(4): 26-28.
- [11] 配电网技术导则: Q-GDW10370—2016[S]. 2017.
- [12] 刘合金, 邵志敏, 李修建, 等. 基于永磁开关的配电网多级保护配置策略研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(23): 23-25.
- LIU Hejin, SHAO Zhimin, LI Xiujian, et al. Research on multistage protection configuration strategy of electrical distribution network based on permanent magnet switch[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(23): 23-25.
- [13] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57, 113.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57, 113.
- [14] 施慎行, 董新洲, 刘建政, 等. 配电线路无通道保护研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 31-34.
- SHI Shenxing, DONG Xinzhou, LIU Jianzheng, et al. non-communication protection for power lines in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 31-34.
- [15] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [16] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 204-209.
- [17] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 111-113.
- [18] 韩利群, 张维, 郭上华. 配电终端应用超级电容探析[J]. 供用电, 2016, 33(6): 68-71.
- HAN Liqun, ZHANG Wei, GUO Shanghua. Discussion and analysis on the application of super-capacitors for the distribution units[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(6): 68-71.
- [19] 邵显清, 刘飞, 张杰, 等. 基于超级电容器的直流电源装置研制[J]. 电源技术, 2018, 42(3): 419-421.
- SHAO Xianqing, LIU Fei, ZHANG Jie, et al. Development of DC power supply device based on super-capacitors[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(3): 419-421.
- [20] 刘树林, 马一博, 刘健. 基于超级电容器储能的配电自动化终端直流电源设计及应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 177-179.
- LIU Shulin, MA Yibo, LIU Jian. Design and application of super-capacitor-based DC power-supply for power distribution automation terminal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 177-179.
- [21] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 
- 收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-06-24
- 作者简介:
- 张维(1984—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护和配电自动化等方面的研究工作; E-mail: jonefei@163.com
- 宋国兵(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护方面的研究与教学工作; E-mail: song.gb@163.com
- 刘健(1967—), 男, 博士, 总工程师, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网及其自动化技术。E-mail: powersys@263.net
- (编辑 魏小丽)