

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181530

基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法

张维¹, 宋国兵¹, 豆敏娜², 常仲学¹, 张志华², 刘健², 郭上华³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 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: 馈线自动化对提高配电网供电可靠性具有重要意义。为了克服电压-时间型馈线自动化模式存在的故障处理时间长、故障点上游开关经两次短路电流冲击、上游区段需要经历两次短时停电等缺点, 提出了一种基于自适应重合闸的配电网故障快速定位与隔离方法。介绍了实现该策略的三项关键技术, 包括基于永磁操作机构的配电网分相开关、基于暂态电流特征的选相元件、基于工频电压特征的故障性质判别方法。该策略避免了重合于永久性故障时短路电流对上游开关的二次冲击以及上游区段的二次停电, 同时可有效缩短故障处理时间。

关键词: 电压-时间型馈线自动化; 自适应重合闸; 分相开关; 选相元件; 故障处理

A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure

ZHANG Wei¹, SONG Guobing¹, DOU Minna², CHANG Zhongxue¹, ZHANG Zhihua², LIU Jian², GUO Shanghua³

(1. School of Electrical Engineering, 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: Feeder automation is important to improve the reliability of distribution network power supply. To solve the problem existed in the voltage-time feeder automation that the fault processing time is long, the upstream switches of the fault point need to tolerate fault current twice and the upstream sections need to experience two short time power outage, a quick fault location and isolation method for distribution network based on adaptive reclosure is proposed in this paper. Three key technologies of the strategy are introduced, including phase selector based on transient current characteristics, a method for distinguishing the transient fault and permanent fault based on the power frequency voltage characteristics, and a phase segregated switch of the distribution network based on the permanent magnet operating structure. The proposed strategy can avoid the second impact on upstream switches and power-off of the upstream section when the fault is permanent, as well as the fault processing time can be effectively shortened.

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

Key words: voltage-time feeder automation; adaptive reclosure; phase segregated switch; fault phase selector; fault isolation and location

0 引言

馈线自动化技术是提高配电网故障处理水平的重要手段^[1-4]。目前已经形成多种馈线自动化模式, 包括电压-时间型^[5]、合闸速断型^[6]、智能分布式^[7]、集中型^[8-9]等。以上模式都是针对故障后有较大故障电流情况设计的, 对于小电流接地系统中单

相接地故障, 相关学者利用不同的检测原理提出了对应的馈线自动化模式。文献[10]基于模型参数识别原理提出了零序电压-时间型馈线自动化模式; 文献[11-13]利用相邻终端零序电流相关性或频谱峭度提出了智能分布式馈线自动化模式; 文献[14]对不同的具有自举性的单相接地故障诊断方法采用两值化处理实现集中型馈线自动化模式。

由上可知, 电压-时间型馈线自动化已经能够实现相间故障和接地故障的区段定位与隔离, 并且由于无需通信得到了大量的应用。但因电压-时间型馈

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)

线自动化模式依赖自动化开关之间的相互配合, 存在以下问题: 1) 由于故障点前的开关流过了两次故障电流并分合闸两次, 降低了开关使用寿命; 2) 由于故障点上游区段短时停电两次, 降低了供电可靠性; 3) 故障隔离与恢复时间较长。

如果自动化开关依次重合的过程中能够识别前方有故障时开关闭锁不重合, 则可以很好地避免二次停电以及故障电流对开关的二次冲击。要实现这一技术, 终端需要具备永久性故障识别的能力, 目前高压线路的永久性故障识别方法众多^[15-17], 主要通过健全相对故障相感应电压的大小来识别故障是否为永久性故障。但该方法无法直接适用于配电网, 因为配电网仅变电站侧的开关跳闸, 故障相会因为配电变压器高压侧各相绕组的电气连接而感受到不同程度的电压, 不同于高压电网故障相两侧跳闸后其电压仅来自于健全相的耦合。

基于以上分析, 需要 3 项技术才能实现本文的方法, 分别是配电网分相开关技术、故障选相、永久性故障识别方法。本文基于永磁操作机构研制了配电网分相开关, 基于暂态特征提出了配电网的新型选相元件, 基于瞬时性和永久性故障时相电压的分布特征提出了配电网故障性质判别方法, 下面分别论述。

1 基于永磁机构的配电网分相开关

分相开关主要通过三个独立分合闸机构及其控制单元实现。永磁操作机构的断路器采用固封极柱结构、三相机构独立、机构零部件少(运动部件少于 10 个)、分合闸速度快, 适用作配网分相开关, 其动作原理见文献[18-19], 本文不再赘述。基于单稳态永磁操作机构采用全桥控制策略与相控电路共同实现各相机构的分合闸控制, 其控制原理电路示意图如图 1 所示。永磁断路器的三相线圈均并接于全桥电路的两桥臂之间, 操作电源即储能电容 CAP 正负极分别与全桥两端连接, 各相线圈电路中均有一个选择通断电路(Sel)。

A 相分闸控制过程描述如下: (1)首先由相控电路发出信号, 使得 A 相-Sel 电路导通; (2)IGBT 驱动回路产生 IGBT 驱动信号 2、4 用于驱动全桥电路上分闸 IGBT, 使得电解电容器向永磁断路器的线圈反向供电, 线圈流经反向电流时产生磁场推动铁心分闸。为了保证储能电容器能够具有足够的能量进行分合闸供电, 储能电容器上一般会设置用于检测其两端电压大小的传感器, 此传感器的输出信号送到测控单元内, 进行储能欠压判断。

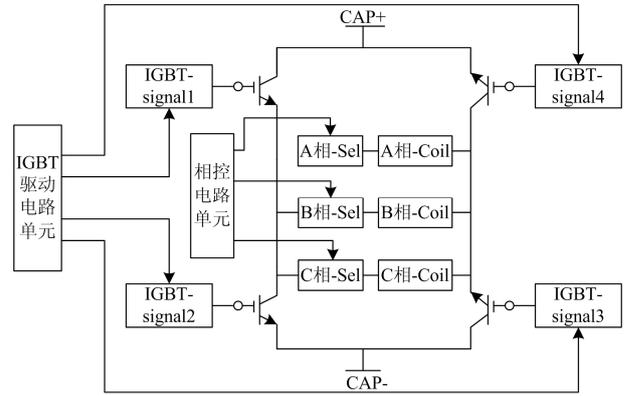


图 1 整体控制原理示意图

Fig. 1 Diagram of overall control

2 适用于配电网的暂态量选相元件

高压电网有相电流差突变量的选相元件^[20], 但并不适用于小电流接地系统的配电网, 比如消弧线圈接地系统发生单相接地故障时故障相的稳态电流因为消弧线圈的补偿作用可能和健全相的对地电容电流幅值差不多。为此, 本文对现有的相电流差突变量选相元件进行改进, 以使其适用于配电网。

为了避免消弧线圈对稳态电流幅值的影响, 采用暂态高频信号进行选相, 信号频带采用 150~1 000 Hz。暂态电流有效值的计算如式(1)所示。

$$I_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{\varphi}^2(k)} \quad (1)$$

式中, φ 表示 A、B、C 三相; N 为所用数据窗内采样点的个数; I_{φ} 为暂态电流有效值。

当发生接地故障时, 系统会出现较大的零序电压, 据此可以区分接地故障和非接地故障。对于单相接地, 小电流接地系统中故障相的暂态电流是其他两健全相的 2 倍以上, 对于小电阻接地系统, 该结论也成立^[21]。对于相间接地和相间故障, 两故障相电流含有较大的暂态分量, 而健全相的暂态高频分量较少, 仅为故障相对其的耦合分量, 配电线路耦合作用较弱, 所以选取故障相暂态量是健全相的 2 倍即可, 而三相短路故障时三相的暂态分量差异不大。

根据以上分析可以看出根据故障发生后各相电流暂态量的含量就可以实现故障类型的识别。定义 I_{\max} 为三相暂态电流有效值的最大值, I_{mid} 为次大值, I_{\min} 为最小值, 则根据以上分析可以得到如图 2 所示的选相流程图, 其中 $U_{0,\text{set}}$ 可取为额定相电压的 0.1 倍^[22]。

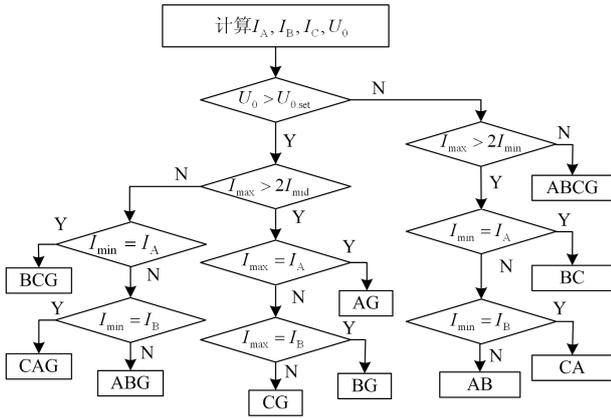


图 2 选相元件流程图

Fig. 2 Flow chart of phase selector

3 基于电压特征的配电网永久性故障识别

3.1 故障特征分析

以图 3 所示的电路来说明不同故障性质下电压特征, 其中, $\dot{U}_{\phi M}$ 表示三相电源电势, $\dot{U}_{\phi N}$ 表示保护安装处的三相电压, Z_{ϕ} 表示配变阻抗, ϕ 为 A、B、C 三相, \dot{U}_M 和 \dot{U}_N 分别表示电源侧和负荷侧中性点电压, Z_L 为中性点等效阻抗, 与中性点接地方式有关。

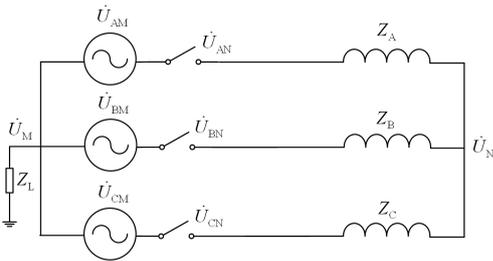


图 3 三相电路示意图

Fig. 3 Diagram of three phase circuit

发生任意故障类型的瞬时性故障时, 忽略线路对地电容电流的影响, 当首先重合一相后(假设为 A 相), 由于无故障点的存在, 合闸相的电压会传递到非合闸相, 三相的电压相等, 为相电压与中性点电压的叠加, 数值较大, 即满足式(2)。

$$\dot{U}_{AN} = \dot{U}_{BN} = \dot{U}_{CN} = \dot{U}_{AM} + \dot{U}_M \quad (2)$$

对于 AG 永久性故障, 先重合图 3 中 B 相开关, 假设过渡电阻为 R_f , 根据电路可得三相电压满足式(3)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{AN} = \frac{R_f}{2Z_{\phi} + R_f} \dot{U}_{BN} \\ \dot{U}_{CN} = \dot{U}_N = \frac{R_f + Z_{\phi}}{2Z_{\phi} + R_f} \dot{U}_{BN} \end{cases} \quad (3)$$

对于 BC 永久性故障, 先重合图 3 中 A 相开关, 由于无接地点, 电流无流通回路, 所以三相电压满足式(2), 为此可以再重合 B 相(不会导致再次过流跳闸), 如果故障点依然存在, 此时 B 相和 C 相电压相等, 当瞬时性故障时, C 相的电压落在 AB 线电压的中点, 具体可参考文献[23]。

对于 BCG 永久性故障, 先重合图 3 中 A 相开关, 根据电路可得三相电压满足式(4)。

$$\dot{U}_{BN} = \dot{U}_{CN} = \frac{R_f}{1.5Z_{\phi} + R_f} \dot{U}_{AN} \quad (4)$$

对于 ABCG 永久性故障, 可以先重合图 3 中 A 相开关(这样做的合理性在于即使重合于永久性故障也不会再次过流跳闸, 但会导致单相接地故障误动作, 因此当选相元件判别为非单相接地故障时闭锁单相接地故障保护即可), 当故障点持续存在时 A 相电压很小, 其余两相电压也仅为幅值很小的耦合电压。

综合以上分析可以看出除了相间故障外, 仅重合一相就可以可靠区分瞬时性故障和永久性故障, 对于相间故障, 重合健全相和任意一故障相后根据故障两相的电压特征就可以区分故障性质。

3.2 永久性故障判别方法

首先根据不同故障类型给出应该首先重合的相别, 具体如表 1 所示, 其中 X/Y 中 X 表示先重合相, Y 表示后重合相。

表 1 故障类型与重合相的关系

故障类型	AG	BG	CG	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG	ABCG
重合相	B	C	A	C/A	A/B	B/C	C	A	B	A

对于式(2) 表示的瞬时性故障特征, 可以用式(5)描述。

$$\begin{cases} \min(U_{\phi}) > 0.6U_e \\ \frac{\max(U_{\phi})}{\min(U_{\phi})} < 1.1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\min(U_{\phi})$ 表示三相电压有效值中的最小值; $\max(U_{\phi})$ 表示三相电压有效值中的最大值。

对于相间永久性故障, 考虑过渡电阻的影响及一定裕度, 可以用式(6)描述。

$$\begin{cases} \frac{\max(U_{\phi f})}{\min(U_{\phi f})} < 2 \\ \rho_{\phi\phi f} > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\min(U_{\phi f})$ 表示两故障相电压有效值中的最小

值; $\max(U_{\varphi f})$ 表示两故障相电压有效值中的最大值; $\rho_{\varphi\varphi f}$ 表示两故障相电压时域相关系数。最终故障性质的判别流程如图 4 所示。

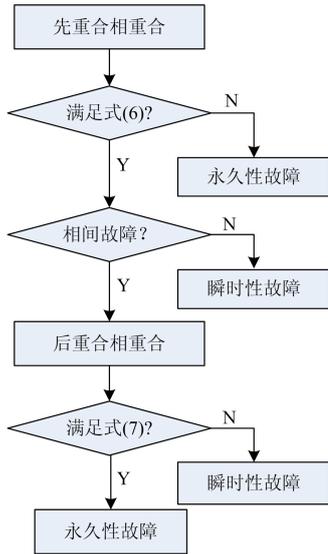


图 4 永久性和瞬时性故障判别流程

Fig. 4 Flow chart of distinguishing the transient fault and permanent fault

4 仿真验证

基于 PSCAD 建立如图 5 所示的仿真模型, 线路采用频变参数模型, 各区段长度分别为: $L_1=5.1$ km, $L_2=4$ km, $L_3=4$ km, $L_4=10$ km, $L_5=0.1$ km, $L_6=3$ km, $L_7=4$ km, 主变参数分别为: $S_N=2$ MVA, $P_k=20.586$ kW, $U_k\%=6.37\%$, $P_0=2.88$ kW, $I_0\%=0.61\%$; $S_N=2$ MVA, $P_k=20.591$ kW, $U_k\%=6.35\%$, $P_0=2.83$ kW, $I_0\%=0.62\%$, 令各配电变压器

与所连接区段编号一致, 则它们的容量分别为: $S_{3N}=50$ kVA, $S_{5N}=500$ kVA, $S_{6N}=200$ kVA, $S_{7N}=1$ MVA, 各配电变压器所带负荷统一为变压器容量的 80%, 功率因数为 0.85。分别验证消弧线圈接地系统、不接地系统、电阻接地系统下基于暂态电流特征的选相方法以及永久性与瞬时性故障识别方法, 故障点设置在区段 1 末端。

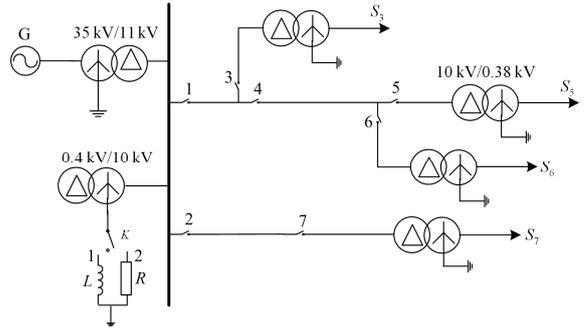


图 5 基于 PSCAD 的仿真模型

Fig. 5 Simulation model based on PSCAD

表 2 给出各种中性点接地方式下发生 AG 故障时不同过渡电阻情况下的选相结果, 表 3 给出电阻接地方式下过渡电阻都为 50 Ω 时不同故障类型下的选相结果, 可以看出选相结果完全正确, 验证了本文所提选相方法的正确性。

在区段 2 末端设置不同故障类型和过渡电阻的故障, 验证不同中性点接地方式下故障性质判别方法的准确性, 假设故障发生在 0.5 s, 1.5 s 按照选相结果和表 1 的重合顺序进行永久性故障识别, 瞬时性故障持续 0.1 s, 永久性故障持续 2 s。图 6 给出消弧线圈接地方式以及电阻接地方式下 AG 金属性故障时的三相电压波形, 图 7 给出不接地系统 BC

表 2 不同过渡电阻下的选相结果

Table 2 Phase selection results when transition resistance is different

接地方式	过渡电阻	零序电压/kV	暂态电流有效值/kA			$\frac{I_{max}}{I_{mid}}$	$\frac{I_{max}}{I_{min}}$	判定结果
			A 相	B 相	C 相			
不接地	0	17.41	3.19E-03	9.99E-04	1.04E-03	3.06	3.19	AG
	100	16.92	2.37E-03	7.82E-04	7.78E-04	3.03	3.05	AG
	500	14.77	1.19E-03	5.65E-04	4.42E-04	2.10	2.69	AG
	1 000	12.33	9.82E-04	4.12E-04	3.39E-04	2.38	2.90	AG
经消弧线圈接地	0	16.42	6.14E-03	9.73E-04	1.12E-03	5.48	6.31	AG
	100	15.51	5.40E-03	7.57E-04	9.83E-04	5.49	7.13	AG
	500	10.74	3.20E-03	4.75E-04	8.15E-04	3.93	6.75	AG
	1 000	7.05	2.05E-03	4.38E-04	7.24E-04	2.83	4.67	AG
经电阻接地	0	11.18	4.02E-02	1.03E-03	2.22E-03	18.14	39.09	AG
	100	5.01	1.74E-02	7.73E-04	1.43E-03	12.10	22.44	AG
	200	3.02	1.05E-02	7.39E-04	1.14E-03	9.16	14.19	AG
	300	2.15	7.42E-03	6.92E-04	9.98E-04	7.43	10.71	AG

表 3 不同故障类型下的选相结果

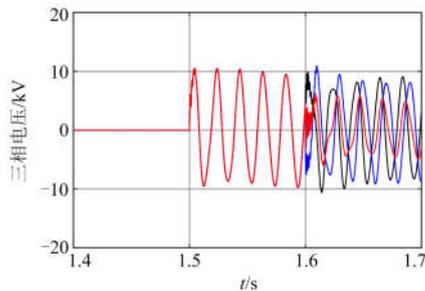
Table 3 Phase selection results when fault type is different

故障类型	零序电压/kV	暂态电流有效值/kA			$\frac{I_{max}}{I_{mid}}$	$\frac{I_{max}}{I_{min}}$	判定结果
		A 相	B 相	C 相			
AG	7.20	2.50E-02	7.78E-04	1.75E-03	14.25	32.09	AG
BG	6.81	1.43E-03	2.62E-02	6.26E-04	18.29	41.95	BG
CG	6.72	5.83E-04	1.37E-03	2.56E-02	18.75	43.96	CG
AB	0.00	6.35E-02	6.46E-02	1.68E-03	1.02	38.44	AB
BC	0.00	1.36E-03	6.26E-02	6.32E-02	1.01	46.44	BC
CA	0.03	2.12E-01	6.96E-02	2.43E-01	1.15	3.49	CA
ABG	4.71	3.48E-02	4.29E-02	1.14E-03	1.23	37.48	ABG
BCG	4.87	9.96E-04	3.28E-02	3.93E-02	1.20	39.48	BCG
CAG	4.75	4.04E-02	9.25E-04	3.31E-02	1.22	43.70	CAG
ABCG	0.00	4.33E-02	4.29E-02	4.00E-02	1.01	1.08	ABCG

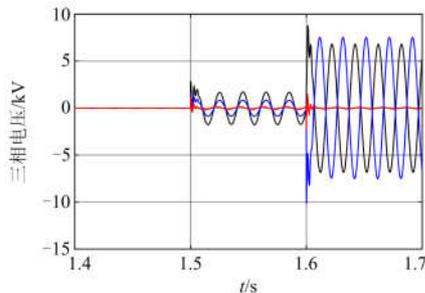
经 50Ω 故障时的三相电压波形。从图 6 中可以明显看出瞬时性故障时三相电压相同且幅值较大，而永久性故障时三相电压不相等且幅值差异较大。从图 7 可以看出永久性故障时 B、C 相电压基本同相位且幅值差异较小，而瞬时性故障时 B、C 相电压差异较大，瞬时性故障时 $\frac{\max(U_{\varphi f})}{\min(U_{\varphi f})}$ 和 $\rho_{\varphi\varphi f}$ 分别为

2.42、0.38，永久性故障时为 1.62 和 0.86，根据式 (7) 可有效区分故障性质。

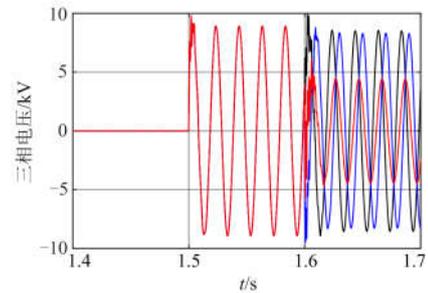
此外，表 4 给出不接地系统其他类型故障以及不同过渡电阻情况下的判别结果，其中 T 表示瞬时性故障，P 表示永久性故障。综合所有仿真可以看出本文提出的故障性质判别方法正确有效。



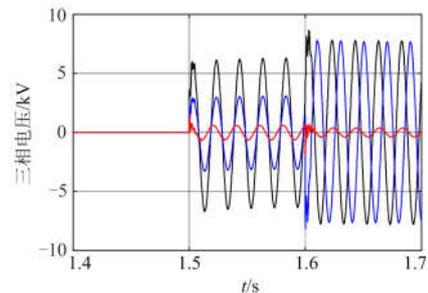
(a) 消弧线圈接地瞬时性故障



(b) 消弧线圈接地永久性故障



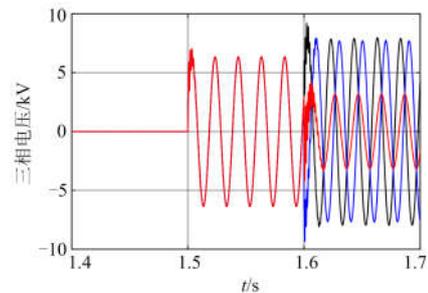
(c) 电阻接地瞬时性故障



(d) 电阻接地永久性故障

图 6 瞬时性故障和永久性 CG 故障时三相电压

Fig. 6 Three phase voltage when fault type is transient and permanent CG fault



(a) 瞬时性故障

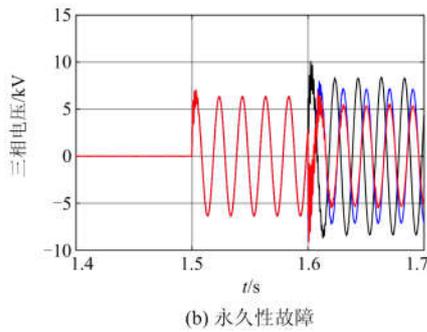


图 7 瞬时性故障和永久性 BC 故障时三相电压

Fig. 7 Three phase voltage when fault type is transient and permanent BC fault

表 4 不同故障类型和过渡电阻下的故障性质判别结果
Table 4 Fault nature discriminant results when fault type and transition resistance is different

故障类型	过渡电阻	故障性质	U_A	U_B	U_C	$\frac{\max(U_\phi)}{\min(U_\phi)}$	判别结果
CG	0	T	4.473	4.492	4.492	1	T
		P	0.298	0.145	0.028	10.71	P
	100	T	4.473	4.492	4.492	1.00	T
		P	0.582	0.441	0.326	1.78	P
	500	T	4.473	4.493	4.492	1.00	T
		P	1.593	1.484	1.390	1.15	P
1 000	T	4.473	4.492	4.492	1.00	T	
	P	2.411	2.330	2.256	1.07	P	
BCG	0	T	3.932	3.891	3.899	1.01	T
		P	0.257	0.027	0.027	9.39	P
	50	T	4.473	4.492	4.491	1.00	T
		P	0.300	0.090	0.091	3.32	P
	0	T	3.828	3.842	3.837	1.00	T
		P	0.057	0.028	0.028	2.05	P
50	T	4.473	4.492	4.492	1.00	T	
	P	0.139	0.039	0.040	3.53	P	

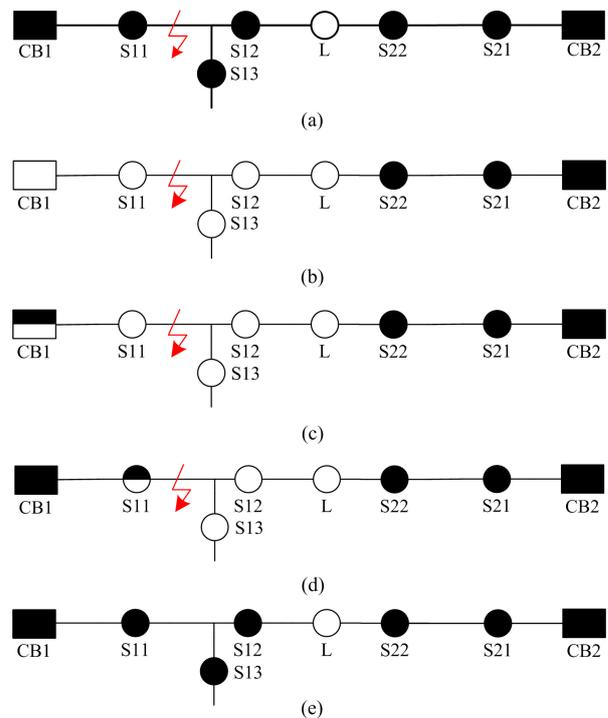
5 故障定位与隔离示例

要实现本文所述故障定位与隔离方法, 所有出线开关和分段开关均须采用分相开关, 联络开关可以为三相开关。出线首台终端配置选相元件和故障性质识别元件, 其他分段开关和联络开关配置故障性质识别元件, “得电合闸”逻辑改为“先得电相先合闸”: 比如上级开关合闸的次序是 A、B、C 相, 则本级开关的合闸次序也是 A、B、C 相。对于分段开关处的终端, X 和 Y 时限依然设置为 7 s 和 5 s, 由于线路一般为 3 分段, 在考虑一定裕度的情况下联络开关的 X 和 Y 时限设置为 28 s 和 5 s, 需要说明的是分段开关处终端的 X 和 Y 时限以及联络开关的 Y 时限都是以任意一相来电时刻起计算。永磁断

路器整组分闸时间一般为 55~65 ms, 为了使得分段开关和联络开关处的终端识别是相间故障还是其他故障, 各相开关依次重合的时间间隔可差异化整定, 非相间故障时各相时间间隔整定为 0.2 s, 相间故障时先重合相和后重合相的时间间隔整定为 0.1 s, 最后重合相与后重合相的时间间隔整定为 0.2 s。出线断路器的一次重合闸时间依然整定为 1 s。

下面以图 8(a)中 S11、S12、S13 之间发生 BC 相间故障为例来说明故障定位与隔离过程, 其中实心表示合闸, 空心表示分闸, 半空心表示部分相合闸。

假设 0 s 故障发生, 出线开关 CB1 跳闸, 分段开关失压分闸, 如图 8(b)所示; 1 s 后, CB1 根据选相结果先重合 A 相, 隔 0.1 s 再重合 B 相, 如图 8(c)所示, 然后进行故障性质判别; 确定前方无故障后 1.3 s 重合 C 相, S11 通过来电时间间隔确定是 BC 故障, 8 s 和 8.1 s 依次重合先来电的 A 相和 B 相后进行故障性质判别, 如图 8(d)所示; 如果是瞬时性故障, S11 在 8.3 s 重合 C 相, S12 和 S13 在 15 s、15.1 s、15.3 s 之后依次重合 A、C、B 相开关, 联络开关 L 检测到一侧来电超过 5 s, 闭锁于分闸状态, 最终实现恢复供电, 如图 8(e)所示; 如果当 S11 的 A 相和 B 相合闸后检测到是永久性故障, 则 A 相和 B 相分闸, 同时由于 S12 和 S13 检测到 A 相和 B 相电压持续时间不够 5 s 而闭锁, 最终实现故障区段的隔离, 如图 8(f)所示; 当联络开关 L 的 X 延时到 22 s 后直接重合 3 相开关即可, 最终实现非故障区段的转供, 如图 8(g)所示。



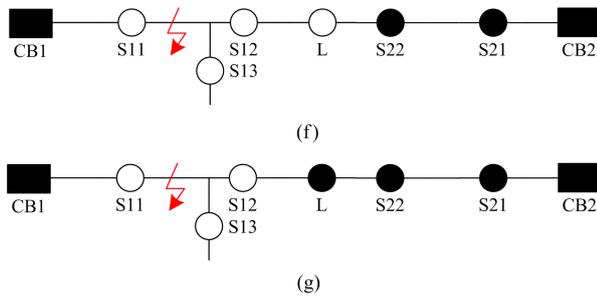


图 8 故障定位与隔离过程

Fig. 8 Fault location and isolation process

综合上述分析可以看出，由于避免了出线开关的二次跳闸，永久性故障的隔离时间明显缩短，联络开关的 X 时限可以大幅减小，从而加快了非故障区段的恢复供电速度。表 5 给出对不同故障位置下故障隔离时间和非故障区段的转供时间。综合可以看出本文提出的方法具有良好的效果，可明显缩短故障隔离时间和非故障区段的停电时间。

表 5 故障位置和故障处理时间的关系

Table 5 Relationship between the fault position and fault processing time

故障位置	故障隔离与非故障区段恢复供电时间/s	
	传统方法	新方法
CB1 和 S11 之间	56	36
S11 和 S12 之间	35	22
S13 下游	37	15
S12 和 L 之间	37	15

6 结论

本文提出了一种基于自适应重合闸的配电网故障快速定位与隔离方法，研制了基于永磁操作机构的配电网分相开关，提出了基于暂态电流特征的配电网选相方法，并提出了适用于配电网的故障性质判别方法。理论分析和仿真验证表明：基于暂态电流特征的选相方法能够准确识别各种故障类型，基于电压特征的故障性质方法可以有效区分各种故障类型下的永久性和瞬时性故障。最后通过故障定位与隔离示例表明，所提方法具有开关动作次数少、可有效避免故障点上游区段二次停电、故障隔离与恢复供电时间快的优点。

参考文献

[1] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-4.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017,

45(20): 1-4.
[2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, 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.
[3] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
[4] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M T B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
[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 Sysem 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] EPRI technical report 1010915: technical and system requirements for advanced distribution automation[R]. 2004.
[8] 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): 62-65.
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): 62-65.
[9] 张志华, 刘健, 张小庆, 等. 配电自动化系统中相间短路故障处理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 144-148.
ZHANG Zhihua, LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, et al. Programming of inter-phase short circuit fault processing for distribution automation systems[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 144-148.
[10] 郭上华, 宋国兵, 张维, 等. 一种无信道配电网单相接地故障自愈方案[J]. 供用电, 2015, 32(8): 64-70.
GUO Shanghua, SONG Guobing, ZHANG Wei, et al. A self-healing solution of single-phase ground fault for

- distribution network without communication[J]. *Distribution & Utilization*, 2015, 32(8): 64-70.
- [11] 宋伊宁, 李天友, 薛永端, 等. 基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(4): 102-109.
SONG Yining, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(4): 102-109.
- [12] 许冲冲, 罗勋华, 张维, 等. 基于频谱序列峭度分析的小电流接地故障区段定位研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 53-56.
XU Chongchong, LUO Xunhua, ZHANG Wei, et al. Study on the small-current grounding fault location based on the kurtosis analysis of spectrum sequence[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 53-56.
- [13] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 102-107.
PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 102-107.
- [14] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(1): 145-149.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1): 145-149.
- [15] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(6): 140-147.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(6): 140-147.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 381-386.
- [17] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法[J]. *西安交通大学学报*, 1984, 18(2): 23-32.
GE Yaozhong. A method of distinguishing instantaneous faults and permanent faults in the single-phase automatic reclosing process[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1984, 18(2): 23-32.
- [18] 张维, 王焕文, 郭上华. 基于数字信号处理芯片和复杂可编程逻辑器件的永磁重合器的研究与设计[J]. *广东电力*, 2011, 24(12): 62-66.
ZHANG Wei, WANG Huanwen, GUO Shanghua. Research and design of permanent IC recloser based on DSPC and CPLD[J]. *Guangdong Electric Power*, 2011, 24(12): 62-66.
- [19] 张庆杰, 袁海文. 配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(3): 98-102.
ZHANG Qingjie, YUAN Haiwen. Design and implementation of synchronous switching control system for vacuum breaker with permanent magnetism actuator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(3): 98-102.
- [20] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 104-105.
- [21] 赵慧梅, 张保会, 段建东, 等. 一种自适应捕捉特征频带的配电网单相接地故障选线新方案[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(2): 41-46.
ZHAO Huimei, ZHANG Baohui, DUAN Jiandong, et al. New scheme of faulty line selection with adaptively capturing the feature band for power distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(2): 41-46.
- [22] 常仲学, 宋国兵, 黄炜, 等. 基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2363-2370.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2363-2370.
- [23] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Identification and isolation of line breakage fault in distribution network based on zero sequence voltage amplitude differential principle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 135-139.

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-23

作者简介:

张 维(1984—), 男, 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网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

豆敏娜(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网自动化技术. E-mail: 752373872@qq.com

(编辑 张爱琴)