

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180907

基于缺相耦合电压特性的 同杆双回线路非跨线故障综合重合闸策略

梁路明¹, 李凤婷¹, 解超¹, 张增强², 陈伟伟², 王月林³

(1. 新疆大学, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
3. 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 常规同杆双回线路重合闸策略由于三相抵消原理, 其故障相存在的互感电气量非常小, 容易受到线路干扰造成误判, 重合于永久性故障。提出了一种适用于接地故障的基于缺相耦合电压特性的故障性质判据及综合重合闸策略, 对健全线进行了缺相处理, 增大了故障线耦合电气量幅值, 并增加了非跨线接地故障性质的识别准确度。为使该策略适用于同杆双回线路相间故障和三相故障性质判别, 提出在线路装设接地开关的方案, 实现了对非跨线非接地故障的快速准确识别。在PSCAD/EMTDC平台上构建仿真模型, 验证了该重合闸策略的可行性。

关键词: 同杆双回线路; 综合重合闸策略; 缺相耦合; 接地开关; 瞬时性故障; 永久性故障

Open-phase coupling voltage feature based comprehensive reclosure for double-circuit lines non-line-to-line fault

LIANG Luming¹, LI Fengting¹, XIE Chao¹, ZHANG Zengqiang², CHEN Weiwei², WANG Yuelin³

(1. Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. Economics and Technology Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 3. Bazhou Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Korla 841000, China)

Abstract: Considering three-phase neutralization, electric quantities left in faulty phases after three-phase tripping of one line in a double-circuit transmission line are not big enough, which could cause misjudgments to the conventional adaptive reclosing schemes of double-circuit transmission lines, and make the lines reclose to permanent faults. To solve the problem mentioned above, a fault characteristic identification method for grounding faults and the relevant comprehensive adaptive reclosing scheme are established, which increases the magnitude of the coupled electric quantities by conducting open-phase measure on the sound line, and improves the accuracy of non-line-to-line grounding fault characteristic. In order to make the identification method and reclosing scheme adapt to non-grounding faults, a grounding switch accessing method is proposed to identify the non-line-to-line non-grounding fault characteristic rapidly. A simulation model is built in the software PSCAD/EMTDC, and the feasibility of the proposed adaptive reclosing scheme is verified by the simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877185).

Key words: double-circuit transmission line; comprehensive reclosing scheme; open-phase coupling; grounding switch; transient fault; permanent fault

0 引言

同杆双回输电线路输送容量大、输电走廊占用

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 新疆维吾尔自治区科技支疆项目资助(2017E0277); 国家电网公司科技项目资助(SGGSKY00FJJS170018)

窄, 越来越多地应用于电力输送工程中^[1-6]。然而, 同杆双回输电线路采用的非跨线故障重合闸策略直接照搬单回输电线路重合策略, 监测故障位置和类别^[7-9], 不判别故障性质, 经固定延时重合, 若重合于永久性故障, 将对输电系统和所联设备造成二次冲击。因此, 研究一种能够快速、准确识别瞬时性故障, 适用于同杆双回输电线路非跨线故障的综合

重合闸策略至关重要。

目前, 专家学者针对同杆双回输电线路提出了多种基于电压特性的故障识别判据和重合时序, 该类判据在故障线单相跳闸时判别效果较好^[10], 对于故障线三相跳闸后的故障判别精度较差^[4-6,11-13]。文献[5]基于按相重合闸, 提出了同杆双回线路按相自动重合闸的方案, 通过按相序重合断路器判定故障性质。文献[6]提出了适用于同杆双回线的跳闸方案, 通过对同杆双回线故障切除前后在非全相运行状态下的最大传输容量的分析, 以此判断线路的故障性质。文献[11]提出了一种通过不同回线跳开相端电压差的幅值和相对比, 对不同负载同杆双回线跨线永久性故障进行判断。文献[12]提出基于相位自适应判据、电压自适应判据及按相序重合的组合判据, 结合同杆双回线单相故障和单相跨单相故障时的电气量特征, 对故障性质进行判断。该类判据在故障线单相跳闸时判别效果较好, 对于故障线三相跳闸后的故障判别精度较差。目前多数研究针对跨线故障展开, 对非跨线故障的研究非常少。

本文提出一种基于缺相耦合的同杆双回输电线路非跨线故障综合重合闸策略。该策略线路采用综合重合闸, 对健全线进行缺相处理, 通过缺相耦合的方式, 增大故障线耦合电气量幅值, 增加非跨线接地故障(Non-line-to-line Grounding Fault, NLGF)的识别准确度; 通过对故障线两相增设接地开关的方式, 实现对非跨线非接地故障(Non-line-to-line non-grounding Fault, NLNGF)的快速准确识别。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台上建立同杆双回输电线路仿真模型, 验证所提综合重合闸策略的正确性与可行性。

1 单相接地故障时故障相耦合电压分析

1.1 故障消失前故障相耦合电压

本文基于图 1 所示同杆双回线路等效模型, 以 I 回线路发生 A 相接地故障, 线路 A 相跳闸为例, 分析线路故障相的耦合电压特性。

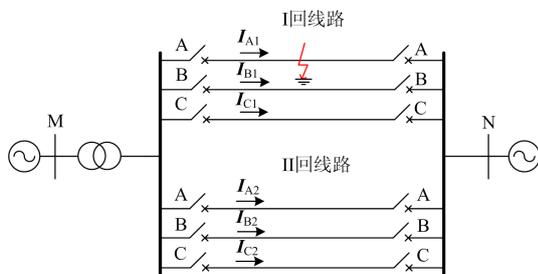


图 1 同杆双回线路模型

Fig. 1 Model of double-circuit transmission line

当故障点在线路末端时可取最大值, 故障消失前, A 相耦合电压的最大值为

$$\dot{U}_{q_max} = \dot{I}_s(R + X) \quad (1)$$

式中: R 为线路 A 相的电阻; X 为单位长度等效电抗; \dot{I}_s 为线路 A 相潜供电流。潜供电流为静电耦合分量 \dot{I}_{sc} 和电磁耦合分量 \dot{I}_{sm} 的综合体现^[20], 使得 A 相耦合电压的最大值亦包括两个分量, 静电耦合分量 \dot{U}_{qc} 和电磁耦合分量 \dot{U}_{qm} , 如式(2)所示。

$$\dot{U}_{q_max} = \dot{U}_{qc} + \dot{U}_{qm} = \dot{I}_{sc}(R + X) + \dot{I}_{sm}(R + X) \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \dot{I}_{sc} = j\omega C_m \dot{U}_{SP} \\ \dot{I}_{sm} = L_m \dot{I}_{SP} / L_1 \end{cases} \quad (3)$$

简便起见, 令各相间等效电容相等, 均为 C_m ; L_m 为线路互感; \dot{U}_{SP} 为健全相电压和; \dot{I}_{SP} 为健全相电流和; ω 为角速度; L_1 为线路的自感。

1.2 故障消失后故障相耦合电压

故障消失后, I 回线路 A 相耦合电压 \dot{U}_h 由电容耦合电压 \dot{U}_{hc} 和电磁耦合电压 \dot{U}_{hm} 组成, 如式(4)所示。

$$\dot{U}_h = \dot{U}_{hc} + \dot{U}_{hm} \quad (4)$$

其中^[15,17-18],

$$\dot{U}_{hc} = \frac{C_m}{nC_m + C_0} \dot{U}_{SP} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{hm} = \dot{I}_{SP} L_m \quad (6)$$

式中: \dot{U}_{SP} 为健全相电压和; C_0 为每相线路对地等效电容; n 为健全相数; \dot{I}_{SP} 为健全相电流和。

线路的等效电阻 R 远小于等效电抗 X , 且线路互容非常小(μF 级), 故当 \dot{U}_{SP} 和 \dot{I}_{SP} 不为零时, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{qc} = j\omega C_m \dot{U}_{SP} \ll \dot{U}_{hc} = \frac{C_m}{nC_m + C_0} \dot{U}_{SP} \\ \dot{U}_{qm} = \frac{L_m \dot{I}_{SP}(R + X)}{L_1} \approx \dot{U}_{hm} = \dot{I}_{SP} L_m \end{cases} \quad (7)$$

由此可得, 当 \dot{U}_{SP} 和 \dot{I}_{SP} 不为零时, 故障消失前 A 相耦合电压的最大值 \dot{U}_{q_max} 小于 A 相耦合电压 \dot{U}_h 。即故障消失后, 相比故障消失前, A 相存在一个明显的恢复电压。

2 适用于多相接地故障的缺相耦合跳闸

2.1 多相接地故障时故障相耦合电压分析

当 I 回线路 AB 两相发生瞬时性接地故障, 以线路三相跳闸为例, I 回线路三相跳闸时, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{SP} = \dot{U}_{AII} + \dot{U}_{BII} + \dot{U}_{CII} \approx 0 \\ \dot{I}_{SP} = \dot{I}_{AII} + \dot{I}_{BII} + \dot{I}_{CII} \approx 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入第1节各式, 可得故障消失前后, I回线路A相的耦合电压均几乎为0, 三相电压耦合相互抵消, 其相量示意图如图2所示, B相同理。

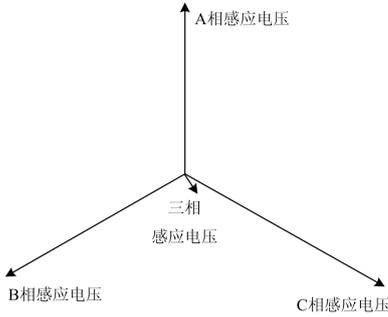


图2 三相电压耦合抵消示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-phase voltage coupling neutralization

由上述分析知, 故障消失前后, I回线路故障相耦合电压均几乎为零, 如图3所示。

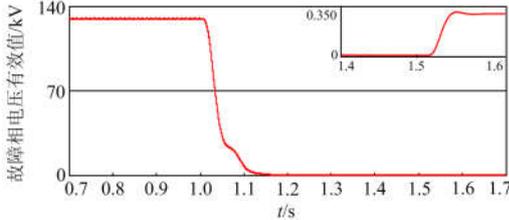


图3 全相运行瞬时性故障

Fig. 3 Full-phase operation transient fault

图3中, $t=1.05\text{ s}$ 时, I回线路故障三相跳闸, $t=1.50\text{ s}$ 时故障消失。然而, 由于II回线路对I回线路A相的耦合对称抵消, A相中几乎测不到恢复电压, 极其微小的外界干扰亦会对其造成显著的影响, 传统基于恢复电压的同杆双回线路故障性质判据将会产生误判。

2.2 缺相耦合跳闸方式

由于线路能够在故障期间暂时缺相运行^[15-16], 针对上述问题, 本文提出一种应用于I回线路非跨线故障三相跳闸情况的缺相耦合跳闸方式: I回线路三相跳闸时, 主动跳开健全线(II回线路)的一个健全相, 打破II回线路的三相耦合对称, 增大了故障相恢复电压的幅值, 保证同杆双回线路非跨线故障时, 故障性质判别的准确性, 提升自适应重合闸的动作成功率。在此以A相为例, 缺相耦合后, 同杆双回线路的等效电路如图4所示。

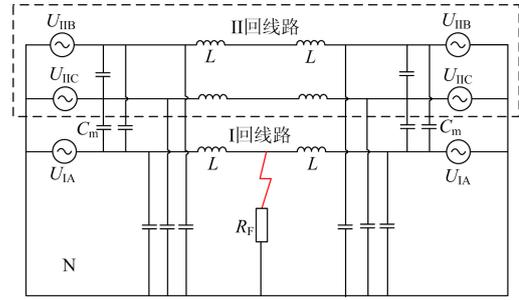


图4 缺相耦合运行方式等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of open-phase coupling operation

据第1节分析, 此时I回线路A相的恢复电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_{Aq} = \dot{I}_s (R + L)l \\ \dot{U}_{Ah} = \frac{C_m}{2C_m + C_0} (\dot{U}_{BII} + \dot{U}_{CII}) + (\dot{I}_{BII} + \dot{I}_{CII})L_m \end{cases} \quad (9)$$

B相的恢复电压计算方法同上。

由图4及式(9)知, 缺相耦合后, 双回线路等效为单回线路单相跳闸时的状态, 解决了I回线路三相跳闸后II回线路对其耦合的对称抵消。

三相接地故障的情况与其类似, 不再赘述。

然而, 该方案仅对NLGF适用, 对NLNGF效果并不明显。

3 适用于多相接地故障的缺相耦合跳闸

由于缺相耦合的运行方式仅对接地故障的性质判断有效, 对两相不接地故障和三相不接地故障的效果并不明显。针对不带并联电抗器的同杆双回线路相间故障和三相故障, 提出一种在线路测量端装设接地开关的方案, 如图5所示。

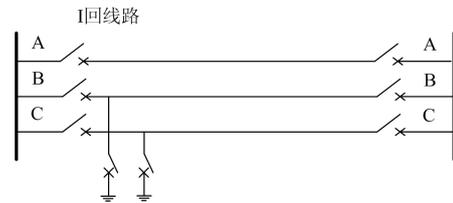


图5 接地开关装设方案

Fig. 5 Accessing method of grounding switch

在线路中的I回线路任意两相测量端增设接地开关, 线路发生 m 相不接地故障时($m=2, 3$), 闭合 $m-1$ 相的接地开关。将不接地故障转换为接地故障, 采用缺相耦合的跳闸方式, 并在非接地相应用恢复电压判据, 逐相确定故障性质。

4 基于“缺相耦合”的故障性质判据

结合单回线路的故障性质判据^[18], 考虑到故障

消失后, 故障相耦合电压主要由电容耦合分量构成, 提出适用于不带并联电抗器同杆双回线路非跨线故障的故障性质判据如下。

$$U_f > U_k \quad (10)$$

其中,

$$\begin{cases} U_k \leq k_1 \frac{RMS(\dot{U}_{sp})C_m}{C_0 + 2C_m} \\ U_k \geq k_2 RMS(\dot{I}_s)(R + L) \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_f 为故障相电压; U_k 为整定值; $RMS(\dot{U}_{sp})$ 为有效值函数; 考虑到不带并联电抗器的输电线路, 常用于中短距离输电以及保护的灵活性, 根据大量的仿真计算, k_1 取 0.6~0.8, k_2 取 1.1~1.3。为避免外部干扰对判据准确度的影响, 设判断延时时长为 0.1 s, 在判断时长内, 对于故障线任一相, 若式(10)持续成立则为瞬时性故障, 反之则为永久性故障。

5 基于“缺相耦合”跳闸方式的综合重合闸策略

由上述分析, 制定适用于不带并联电抗器同杆双回线路非跨线故障的综合重合闸策略如图 6。

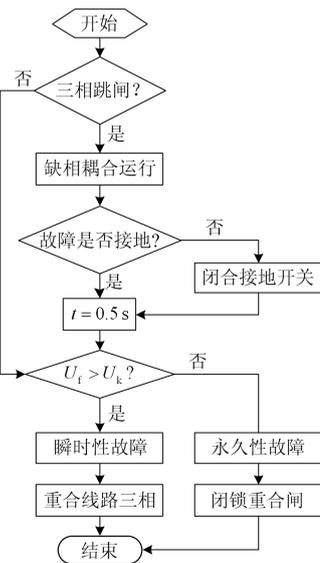


图 6 重合策略流程图

Fig. 6 Flow chart the proposed adaptive reclosing scheme

(1) 线路故障跳闸时, 计时器归零, 即 $t = 0$ 。

(2) 接收线路的故障信息, 根据故障的类型选择相应的跳闸方式。若为单相接地故障且线路单相跳闸, 则进行步骤(3); 若为接地故障线路三相跳闸, 则进行步骤(4); 若为非接地故障线路三相跳闸, 则进入步骤(5)。

(3) $t = 0.5$ s 时, 测量故障线路相电压。基于恢

复电压判据, 若在 0.1 s 内式(10)连续成立, 则判断故障为瞬时性, 判定完成后立即重合线路; 若在当地重合闸动作整定时间内式(10)均无法在 0.1 s 内连续成立, 判断故障为永久性, 闭锁重合闸。

(4) 健全线跳开任一相, 变为缺相耦合运行方式。 $t = 0.5$ s 时, 测量故障线路相电压。若在 0.1 s 内式(10)连续成立, 则判断故障为瞬时性, 判定完成后立即重合线路; 若在当地重合闸动作整定时间内式(10)均无法在 0.1 s 内连续成立, 判断故障为永久性, 闭锁重合闸。

(5) 故障线采用三相跳闸方式, 同时健全线采用缺相耦合运行方式。若线路发生 m 相不接地故障时 ($m = 2, 3$), 闭合 $m - 1$ 相的故障线接地开关。当 $m = 3$ 时, 判定非接地开关所在相故障结束后, 任断开一相接地开关, 对接地开关断开相继续进行故障性质判别, 当所有非接地相均使式(10)在 0.1 s 内连续成立, 判定故障为瞬时性, 判定完成后立即重合线路; 若在当地重合闸动作整定时间内无法满足上述要求, 判断故障为永久性, 闭锁重合闸。

6 仿真结果及分析

参照新疆某地区一条同杆双回输电线路, 以 PSCAD/EMTDC 为平台, 构建同杆双回输电线路模型。线路输送端线电压为 220 kV, 线路长度为 200 km。设在 $t = 1$ s 时 I 回线路发生故障, 故障时长 0.5 s。 $t = 1.05$ s 时 I 回线路三相跳闸, 当地重合闸动作整定时长为 0.75 s, U_k 取为 3.9 kV。I 回线路单相跳闸原理同单回线路, 简便起见, 此处不针对其做仿真。

6.1 基于“缺相耦合”的故障性质判别仿真

线路 C 相接地故障, 过渡电阻分别设为 0 Ω 及 100 Ω , 故障分别为瞬时性和永久性的仿真结果如图 7—图 10 所示。线路相间接地故障和三相接地故障其故障相电压特性同单相接地故障电压特性相似, 此处不再进行仿真。

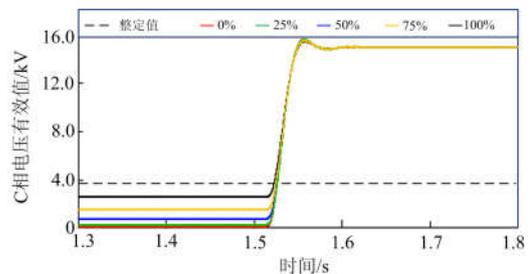


图 7 C 相金属接地瞬时性故障 C 相电压有效值
Fig. 7 RMS voltage of phase C under transient bolted phase C-to-ground fault

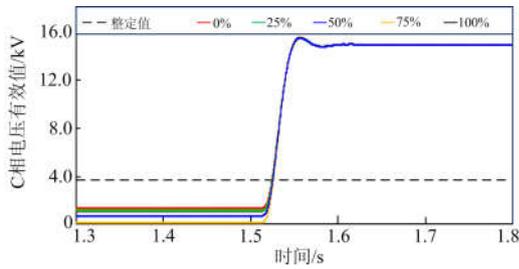


图 8 C 相高阻接地瞬时性故障 C 相电压有效值
Fig. 8 RMS voltage of phase C under transient phase C-to-ground fault with transition resistance

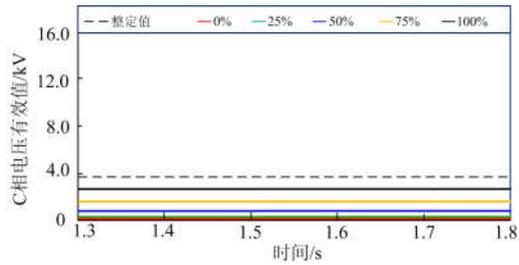


图 9 C 相金属接地永久性故障 C 相电压有效值
Fig. 9 RMS voltage of phase C under permanent bolted phase C-to-ground fault

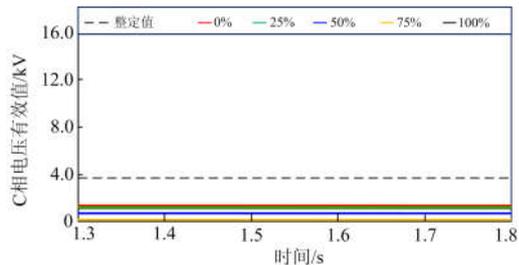


图 10 C 相高阻接地永久性故障 C 相电压有效值
Fig. 10 RMS voltage of phase C under permanent phase C-to-ground fault with transition resistance

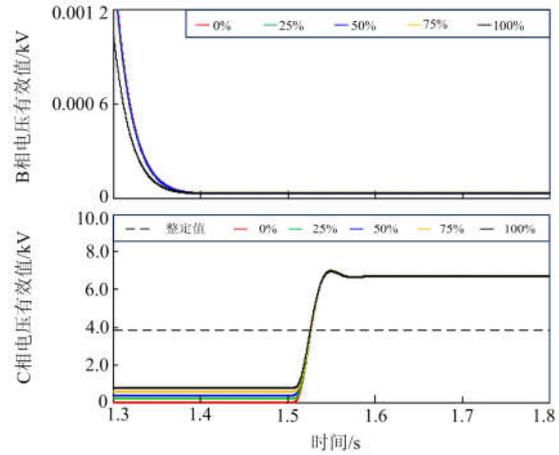


图 11 BC 相间瞬时性故障三相电压有效值
Fig. 11 RMS voltage of phase B and C under transient phase B-to-C fault

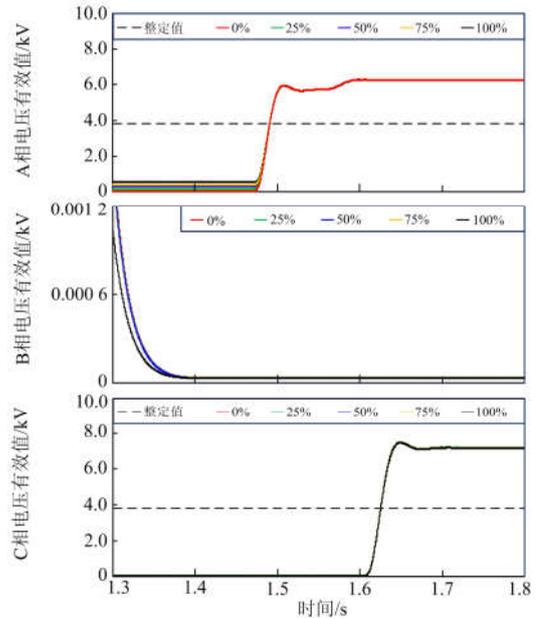
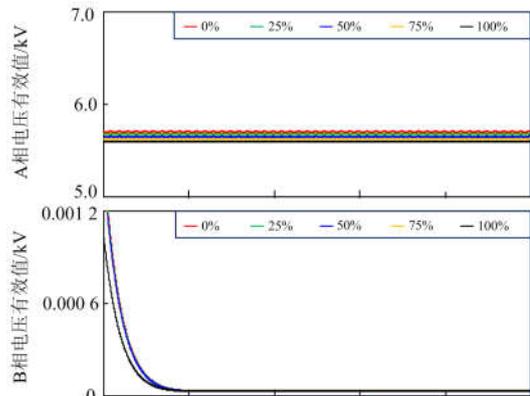
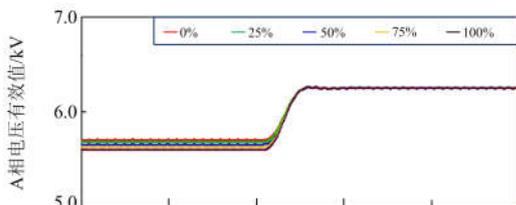


图 12 三相瞬时性故障三相电压有效值
Fig. 12 Three-phase RMS voltage under transient three-phase fault

6.2 对其他非接地故障类型的仿真试验

线路故障类型分别设为 BC 两相不接地故障、三相不接地故障，采用缺相耦合跳闸方式，并在故障线使用接地开关，逐相判断故障性质。故障分别为瞬时性和永久性的仿真结果如图 11—图 14 所示。

由仿真结果知，采用缺相耦合与接地开关，故障相故障消失后，产生了较大幅值的恢复电压，提高了故障性质判别的准确性，且该准确性不受故障位置变化的影响。



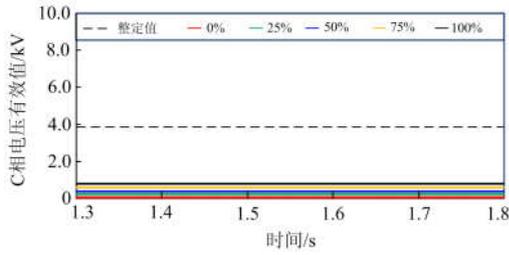


图 13 BC 相间永久性故障三相电压有效值
Fig. 13 RMS voltage of phase B and C under permanent phase B-to-C fault

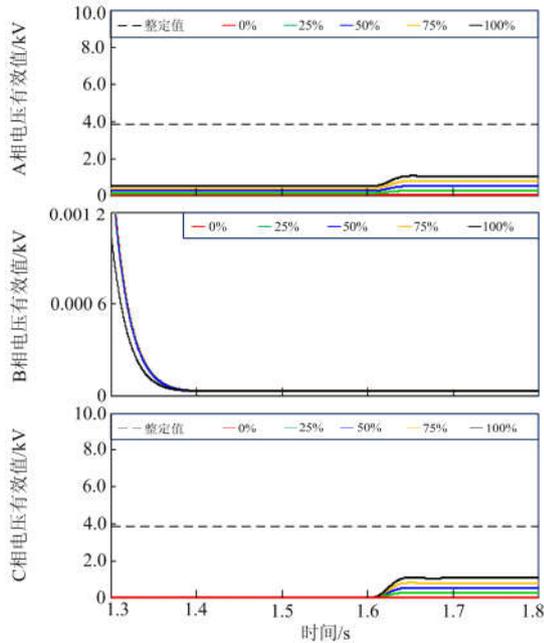


图 14 三相永久性故障三相电压有效值

Fig. 14 Three-phase RMS voltage under permanent three-phase fault

6.3 不装设接地开关的线路非接地故障与接入接地开关线路的对比

在不装设接地开关的同杆双回线路中, 当线路中点发生 BC 相间瞬时性故障和三相瞬时性故障时, 从图 15 中可以看出, 故障线的电压有效值并没有明显的变化, 很难判断出故障消失的时刻。而在线路装设接地开关后, 当线路发生瞬时性故障, 闭合故障相的其中一相接地开关, 在 $t=1.5\text{ s}$ 时故障消失, 故障线的电压发生了明显的变化。可根据 C 相表现的电压特性判断出故障消失。而如果线路发生永久故障, 对于不装设接地开关的线路甚至会误判故障的性质, 如图 16 所示。对于线路发生三相故障亦同理。因此, 装设接地开关的线路能更准确地判断线路发生不接地故障时的故障性质。

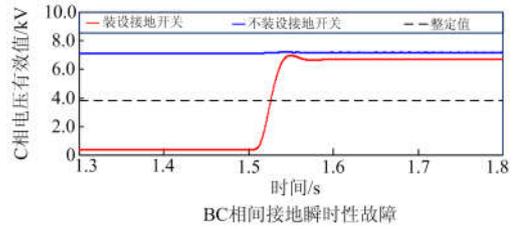


图 15 BC 相间瞬时性故障电压对比

Fig. 15 Voltage comparison under transient phase B-to-C fault

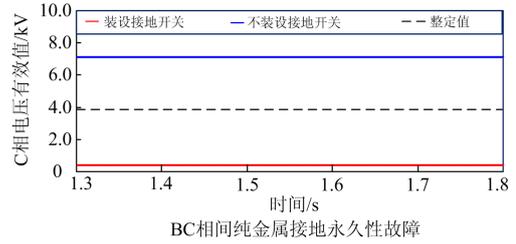


图 16 BC 相间永久性故障电压对比

Fig. 16 Voltage comparison under permanent phase B-to-C fault

7 结论

本文提出了一种适用于的不带并联电抗器同杆双回线路非跨线故障的综合重合闸策略。通过理论分析和仿真结果表明, 所提综合重合闸策略具有以下特点。

(1) 利用在缺相耦合的跳闸方式, 解决了线路互感量太小而导致测量电压受到线路扰动影响的问题。而且健全线采用暂时的缺相耦合运行方式并不会影响系统的稳定性, 具有一定的可行性。

(2) 通过线路在 I 回线路两相测量端装设接地开关的方式, 解决了缺相耦合策略无法适用于非接地故障判别的问题。

(3) 相比于传统的同杆双回综合重合闸, 只需要单端的电气量数据测量, 不需要双端数据通信。

(4) 能够对同杆双回线路各种非跨线故障的故障性质做出快速、准确的判断, 且不受过渡电阻和故障位置变化的影响。

然而, 所提综合重合闸策略仅适用于中短距离输电的不带并联电抗器的同杆双回线路, 针对带并联电抗器的线路还需要继续研究和实验。该方案虽经过了理论分析和仿真验证, 但是仍需进行动模实验, 进一步验证其可行性。

参考文献

- [1] 林达, 王庆庆, 王慧芳, 等. 带并联电抗器同杆双回路自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 101-106.

- LIN Da, WANG Qingqing, WANG Huifang, et al. Adaptive reclosure scheme for parallel lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 101-106.
- [2] 易强, 周浩, 计荣荣, 等. 同塔双回特高压线路潜供电流和恢复电压的限制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 83-88.
- YI Qiang, ZHOU Hao, JI Rongrong, et al. Restriction on secondary arc current on ultra-high voltage AC double circuit transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 83-88.
- [3] 程琳, 王瑞, 程琳, 等. 两端带并联电抗器的同杆双回线路故障性质判别方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 64-68.
- CHENG Lin, WANG Rui, CHENG Lin, et al. Method to identify faults properties for common-tower double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 64-68.
- [4] 沈军, 张哲, 郑玉平, 等. 500 kV 同杆双回线自适应重合闸方案[J]. 电力设备, 2006, 7(1): 20-23.
- SHEN Jun, ZHANG Zhe, ZHENG Yuping, et al. Adaptive reclosing scheme of 500 kV double circuit lines on the same tower[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 20-23.
- [5] 刘家军, 梁振锋, 张欣伟, 等. 同杆平行双回线路按重合闸新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 22-25.
- LIU Jiajun, LIANG Zhenfeng, ZHANG Xinwen, et al. New scheme on reclosing phase by phase for double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 22-25.
- [6] 齐亮, 李永丽, 李博通, 等. 同杆双回线跨线故障最优跳闸方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 62-66.
- QI Liang, LI Yongli, LI Botong, et al. Optimal trip schemes of double-circuit lines on the same tower for crossing-line faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 62-66.
- [7] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J 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.
- [8] 解超, 李凤婷, 王彦鸥, 等. 基于高频信号的输电线路主动式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 6-12.
- XIE Chao, LI Fengting, WANG Yanchi, et al. An active protection of transmission line based on high-frequency signal[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 6-12.
- [9] 费春国, 李春信. 基于电压幅度和支持向量回归机的高压电力输电线故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 27-32.
- FEI Chunguo, LI Chunxin. Fault location in high voltage power transmission based on voltage amplitude and support vector regression[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 27-32.
- [10] 梁振锋, 崔若巍, 杨宁宁, 等. 三相不对称输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 31-36.
- LIANG Zhenfeng, CUI Ruowei, YANG Ningning, et al. Study on single-phase adaptive reclosure of the asymmetrical three-phase transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 31-36.
- [11] 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.
- [12] 宋国兵, 索南加乐, 孙丹丹. 输电线路永久性故障判别方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 75-80.
- SONG Guobing, SUONAN Jiale, SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [13] 李博通, 李永丽. 同杆双回线跨线永久性故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 87-91.
- LI Botong, LI Yongli. Method for identifying permanent cross-line fault of double-circuit transmission line on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 87-91.
- [14] 刘毅, 张哲, 尹项根, 等. 同杆并架双回线自适应重合闸组合判据[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 56-61.
- LIU Yi, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. An combination criterion on adaptive reclosure for double transmission lines[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2011, 35(2): 56-61.
- [15] 王增平, 刘浩芳, 徐岩, 等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.
- WANG Zengping, LIU Haofang, XU Yan, et al. A new criterion for single-phase adaptive automatic reclosure based on improved correlation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 49-55.
- [16] 陈禾, 陈维贤. 超、特高压输电线路中潜供电流的电路分析和计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2368-2373.
- CHEN He, CHEN Weixian. Circuit analysis and computation of secondary current in EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2368-2373.
- [17] 王月林, 李凤婷, 辛超山. 风电场联络线非全相运行时的恢复电压研究[J]. 中国电力, 2016, 49(8): 93-98.
- WANG Yuelin, LI Fengting, XIN Chaoshan. Research on the recovery voltage of wind farm tie line during open-phase operation[J]. Electric Power, 2016, 49(8): 93-98.
- [18] NAGPAL M, MANUEL S H, BELL B E, et al. Field verification of secondary arc extinction logic[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1864-1872.
- [19] 赵庆明, 李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 50-54.
- ZHAO Qingming, LI Bin. A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 50-54.
- [20] 商立群, 施围. 同杆双回输电线路的潜供电流与恢复电压[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 22-23.
- SHANG Liqun, SHI Wei. Study on secondary arc current and recovery voltage on double-circuit lines on the same pole[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 22-23.

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-09-05

作者简介:

梁路明(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2816951076@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护, 可再生能源并网技术及电力系统调度控制; E-mail: xjft2009@sina.com

解超(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及可再生能源并网技术。E-mail: cheesemonster@sina.com

(编辑 许威)