

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191032

一种改进的纵联零序方向保护方案

薛明军^{1,2}, 杨黎明^{1,2}, 张祥^{1,2}, 陈福锋^{1,2}, 邹磊^{1,2}, 陈实^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 相较于单回线, 同塔双回和多回输电线路发生故障时零序特征更为复杂多变, 导致传统的纵联零序方向保护误动或拒动频发。首先从灵敏度、弱电强磁和跨线故障三个方面分析了传统纵联零序方向保护的性能, 指出其中存在的问题。然后, 提出了一套新型的纵联零序方向保护方案: 通过零序方向电压补偿算法提升零序方向元件在高阻故障下的灵敏度, 通过零序综合方向元件消除零序互感的影响, 构造了跨线故障识别逻辑。最后, 通过三个现场实例分析, 验证了该算法的有效性。

关键词: 纵联零序保护; 弱电强磁; 同杆并架; 跨线故障; 灵敏度

An improved pilot zero-sequence power directional relay scheme

XUE Mingjun^{1,2}, YANG Liming^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, CHEN Fufeng^{1,2}, ZOU Lei^{1,2}, CHEN Shi^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Nanjing SAC Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: Compared with single-circuit transmission lines, the zero-sequence characteristics of double-circuit and multi-circuit transmission lines on the same tower are more complex and changeable, resulting in frequent maloperation of traditional pilot zero-sequence directional protection. First, the performance of traditional zero sequence directional protection is analyzed from three aspects: sensitivity, weak current and strong magnetism and crossline fault, and the existing problems are pointed out. Then, a novel pilot zero-sequence directional protection scheme is proposed. A zero-sequence directional voltage compensation algorithm is used to enhance the sensitivity of zero-sequence directional elements under high resistance faults, and zero-sequence integrated directional elements are used to eliminate the influence of zero-sequence mutual inductance. Thus a cross-line fault identification logic is constructed. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by three field examples.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51507050) and Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE (No. CSEE-YESS-2017).

Key words: pilot zero-sequence relay; magnetically-strong and electrically-weak; parallel transmission lines; crossline fault; sensitivity

0 引言

高压输电线路发生接地故障时, 线路存在零序分量, 利用两侧的零序分量构建的纵联零序保护, 不受运行方式和系统振荡的影响, 而且针对高阻故障有很高的灵敏度, 超高压线路的纵联保护作为全线速动的主保护, 已在高压电网的线路中获得了广泛的应用^[1-4]。

目前, 电网建设的快速发展和线路走廊紧密程

度的紧迫, 平行双回线路和多回线路将进一步成为电网的重要组成部分, 但是复杂的一次网架会带来新型的故障特性^[5-9], 会对选相元件^[10-11]、距离保护^[12-13]以及纵联零序保护^[14-16]带来新的挑战。弱电强磁已经造成现场发生了多起纵联零序保护误动的情况, 同杆双回线路的跨线故障导致纵联保护不正确动作^[17-19]。

本文总结了影响纵联零序保护可靠性和灵敏性的因素, 旨在帮助读者全面了解纵联零序保护的现状, 指出了现有常规的纵联零序保护元件的不足之处, 并提出了一种新型的纵联零序方向保护方案来解决上述问题。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51507050); 电机工程学会青年人才托举工程项目(CSEE-YESS-2017)

1 影响纵联零序保护的因素

纵联零序方向保护通过判断两侧的零序功率方向及零序电流大小, 在此基础上利用通道信息将继电器对故障方向判别的结果传送到对侧, 每侧保护根据两侧继电器的动作经过逻辑判断区分是区内还是区外故障^[20-21]。一般来说, 零序功率方向的正向动作区域为

$$180^\circ \leq \arg \frac{3U_0}{3I_0} \leq 360^\circ \quad (1)$$

其中: $3U_0$ 为保护安装处零序电压; $3I_0$ 为保护安装处零序电流, 零序电流以母线指向线路为正方向。

反向动作区为

$$0^\circ \leq \arg \frac{3U_0}{3I_0} \leq 180^\circ \quad (2)$$

简单故障下, 该判据能够正确反应故障, 但是对于特殊的复杂故障, 上述零序方向元件不能够甄别区内外故障^[22-23], 因此, 有必要对传统的纵联零序方向保护方案进行改进, 提升纵联零序方向保护的整体性能^[24-25]。

1.1 灵敏度不足

长线路末端经高阻接地故障, 如果线路背侧的零序阻抗很小时, 可能导致保护安装处测量的零序电压会很低。当其小于装置中的零序方向元件的最小动作电压(一般取 0.5 V)时, 就会造成零序功率方向元件不动作, 即使零序电流大于动作值, 纵联零序方向保护仍将拒动, 无法快速切除故障, 因此常规的纵联零序方向元件的电压门槛存在死区。

现场事例 1: 某 500 kV 线路发生 A 相高阻接地故障, 两侧纵联保护未动作, 由配置的另外一套差动保护切除故障, 图 1 为故障时两侧零序波形图。

此次故障, 两侧的零序电流均大于纵联零序电流定值, 两侧的零序电压幅值如图 2 所示。从分析结果来看(零序方向元件的动作电压门槛为 0.5 V): M 侧零序电压为 0.67 V, 满足判断方向元件的条件, 且判断为正方向, 如图 3 所示; N 侧的零序电压为 0.4 V, 虽然也为正方向特性(如图 3 所示), 但是由

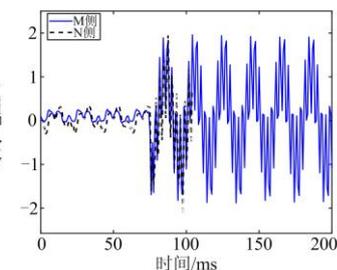
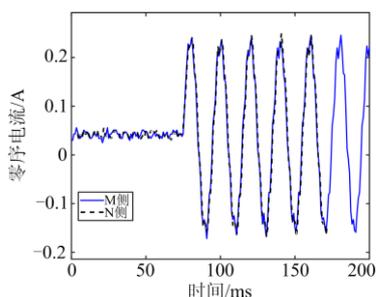


图 1 故障时两侧零序波形图

Fig. 1 Fault waveform of both sides

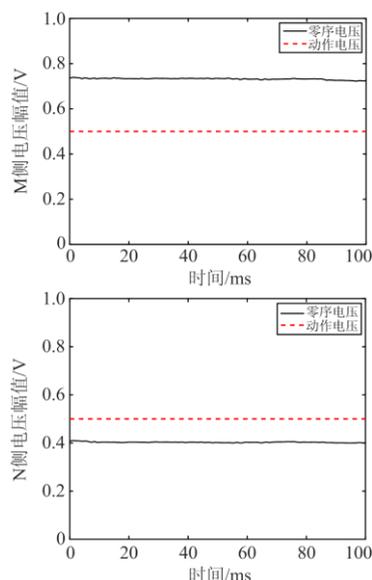


图 2 故障时 M、N 侧的零序电压分析结果

Fig. 2 Analysis of zero-sequence voltage in fault of M side and N side

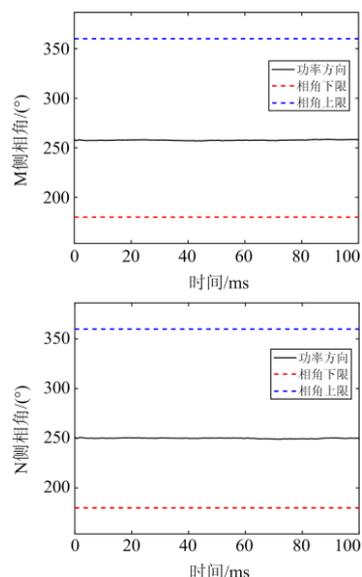


图 3 两侧故障时零序功率方向角度仿真结果

Fig. 3 Simulation results of zero-sequence power direction angle when the fault occurs on both sides

于小于 0.5 V 的动作电压门槛，零序方向元件不动作，从而导致两侧的纵联零序保护未动作。

1.2 弱电强磁

当同一出线走廊上存在着较长距离的同杆架设的平行线路，但是这两回平行的线路经过多个变电站才进行了连接，使得这两条线仅存较弱的电气联系，而两线因同杆平行架设存在较强的零序互感，有着强磁耦合关系，因此这两条线路形成弱电强磁的联系。文献[26-27]详细分析了弱电强磁的情况下导致纵联零序方向保护误动的原因。主要为在邻线发生接地故障后，由于线路互感的影响，导致本线的零序电压发生反向，而零序电流为穿越性电流，从而导致线路两侧的零序电流均超前零序电压，符合零序方向元件的动作条件。

现场事例 2：某 500 kV 线路与某 220 kV 线路处在同一输电走廊，为弱电强磁的关系，500 kV 线路发生单相故障，而 220 kV 线路两侧纵联零序保护动作，图 4 为故障时 220 kV 线路两侧的波形图。

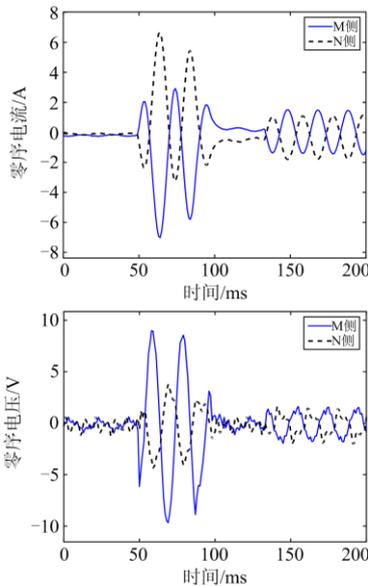


图 4 故障时两侧零序波形图

Fig. 4 Fault waveform of both sides

此次故障两侧的零序电流和零序电压均大于定值门槛，图 5 为故障时两侧的零序功率方向计算结果，从图中我们可以看出两侧的零序功率方向均位于 180°~360°，满足零序正方向的判据公式(1)，两侧均判为零序正方向，两回线路之间的零序互感导致了 220 kV 线路保护两侧纵联零序误动作。

1.3 跨线故障

同杆并架双回或多回线路发生跨线故障时候，对于保护安装点来讲，区内外同时存在一正一反的

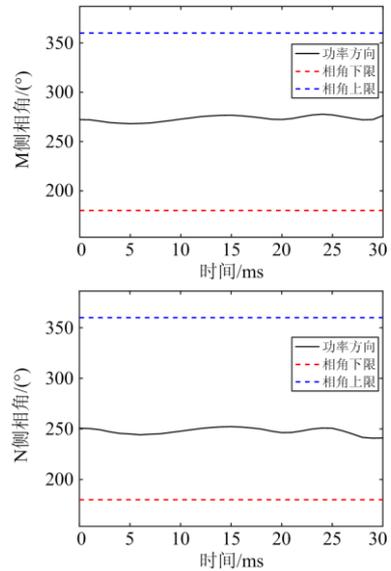


图 5 两侧故障时零序功率方向角度仿真结果

Fig. 5 Simulation results of zero-sequence power direction angle when the fault occurs on both sides

两点故障，此时零序功率方向并不能真正反映故障方向，当区外故障占优时将会导致零序功率方向元件误判为反方向。

文献[28]详细分析了同杆并架双回线路发生跨线故障下零序功率方向继电器的性能，并总结得出在某些跨线故障时，会出现零序功率方向继电器判为反方向而拒动的情况。

现场事例 3：某 220 kV 同杆并架双回线路发生 I BG-II ABG 的跨线故障，I 回线配置的两侧纵联保护拒动作，图 6 为故障时两侧的波形图。

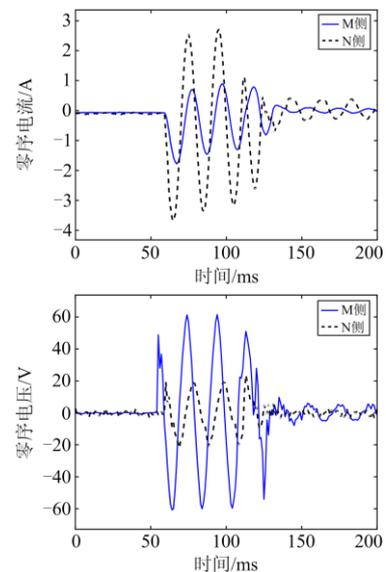


图 6 两侧故障波形图

Fig. 6 Fault waveform of both sides

图7为故障时两侧的零序功率方向分析计算结果。从图中我们可以看出: M侧的零序功率方向在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$; 判断为反方向, 由于纵联保护设置了多个方向元件, 如纵联零序方向元件、纵联距离方向元件, 这些方向元件采用反方向优先的配合原则, 所以M侧的纵联保护方向为反方向; N侧的零序功率方向在 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$; 判断为正方向。此次故障, I回线配置的纵联保护由于M侧的零序功率方向元件判别为反方向从而导致整个纵联保护拒动作。

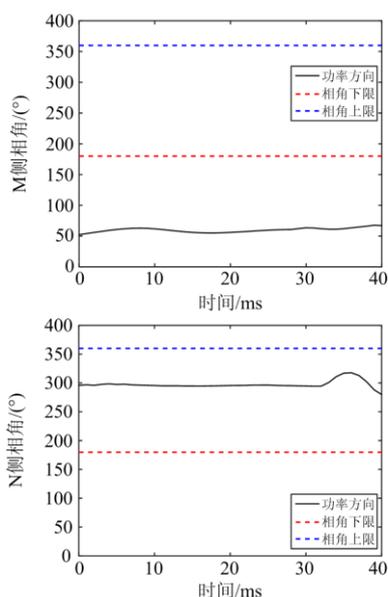


图7 两侧故障时零序功率方向角度仿真结果

Fig. 7 Simulation results of zero-sequence power direction angle when the fault occurs on both sides

2 新型纵联零序方向元件的研究

通过以上分析及现场的实际案例可知, 纵联零序方向元件再不能简单地依靠固有的零序方向元件正反向来决定故障的特性, 需辅以其他判据来综合判断, 新型纵联零序方向元件应具备以下特征。

2.1 零序方向元件电压补偿

为提升零序方向元件在高阻故障下的灵敏度, 构建无死区的纵联零序保护, 通常采用零序方向元件电压补偿方式^[29]。

当保护测量到的零序电压低于门槛(通常设定为 0.5 V)时, 采用经过补偿后的零序电压来判别方向, 补偿的零序电压由公式(3)获得。

$$3U_{\text{OBC}} = 3U_0 - 3I_0 Z_{\text{COM}} \quad (3)$$

其中: I_0 和 U_0 分别为保护测量的零序电流和零序电压; Z_{COM} 是补偿阻抗。此处的补偿阻抗仅用于构造一个补偿零序电压, 并保证补偿后的电压与原零序

电压相角相同, 并且幅值变大, 以提高灵敏度。

当然零序补偿也不能够盲目投入, 当双回线中一回线因为单相故障跳开, 由于负荷转移相邻线路会出现较大的零序电流, 而两侧母线可能均无零序电压, 此时投入零序方向电压补偿将造成无故障线路因为误补偿将两侧纵联零序方向补偿为正方向而误跳闸。为防止误补偿, 只有负序方向元件判断为正方向后, 才投入零序电压补偿, 具体逻辑如图8所示。

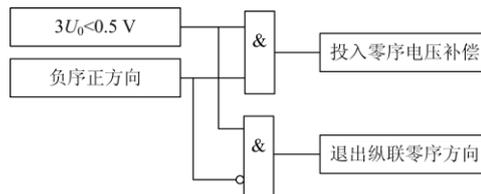


图8 零序电压补偿条件

Fig. 8 Conditions of zero sequence voltage compensation

2.2 零序综合方向元件

弱电强磁环境中主要是零序功率方向保护受零序互感的影响而误动, 此时可以利用负序功率方向元件的结果来构建零序综合方向元件, 零序综合方向元件逻辑如图9所示。

当零序功率和负序功率均判为正方向后才置零序综合正方向; 当零序功率和负序功率方向结果判别不一致时, 则置零序综合方向无结果; 当零序负序任一判为反方向且零序和负序功率正方向均不动作, 则置零序综合反方向。

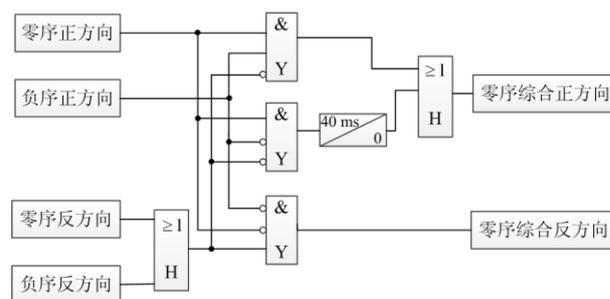


图9 零序综合方向元件逻辑图

Fig. 9 Logic diagram of integrated zero sequence directional element

2.3 跨线故障识别逻辑

跨线故障时, 纵联零序方向元件存在误判的可能, 区内故障可能判为反方向, 区外故障可能判为正方向, 因此对于区内外同时存在故障点的情况下退出纵联零序保护元件, 由选相和按相判别方向的纵联距离保护来判别。

跨线故障后总是伴随着出现两相及以上相电压降低, 若线路出口或则近端故障, 相电压将降得很

低, 本线若是单相故障, 对于近端故障来说, 本线故障相和非故障相(邻线故障相)之间电流幅值相差较大, 且本线非故障相(邻线故障相)相电流方向为反相, 因此, 当双回线发生接地故障时, 可以利用故障相电压和电流幅值以及电流方向判别是否发生了跨线故障。

对于跨线接地故障电气量特征的分析, 可以构建如下故障判据。

$$\begin{cases} |U_{\varphi 1}| < k_3 U_n \\ |U_{\varphi 2}| < k_3 U_n \end{cases} \quad (4)$$

$$|I_{\varphi 1}| > k_4 |I_{\varphi 2}| \text{ 或者 } |I_{\varphi 2}| > k_4 |I_{\varphi 1}| \quad (5)$$

式中: $U_{\varphi 1}$ 和 $U_{\varphi 2}$ 为任意两相电压; $I_{\varphi 1}$ 和 $I_{\varphi 2}$ 为与 $U_{\varphi 1}$ 和 $U_{\varphi 2}$ 对应的相电流; k_3 和 k_4 为可靠系数, k_3 可取 0.4 左右, 发生跨线接地故障时, 对于近故障侧保护, 式(5)总能满足, k_4 可取 1.5 左右, 确保 IABG-IIAG 这样的跨线故障, 式(5)能够满足。

若式(4)满足, 且式(5)满足或者相电流 $I_{\varphi 1}$ 和 $I_{\varphi 2}$ 其中之一为反方向时, 判断为发生了跨线故障。

综上形成如图 10 所示的跨线故障识别逻辑。

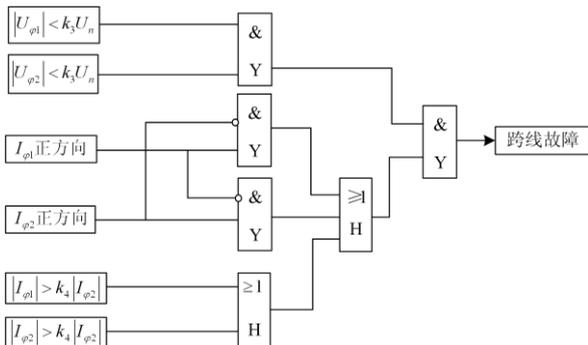


图 10 跨线故障识别逻辑

Fig. 10 Logic diagram of cross-line fault identification

当保护识别为跨线故障时, 则退出纵联零序方向保护, 此时靠纵联距离保护来可靠动作。

2.4 纵续动作

当发生接地故障, 两侧的零序阻抗差别较大的情况下, 可能会出现一侧零序电流满足动作定值, 一侧零序不满足动作定值但大于零序启动电流定值。新型纵联零序方向元件将零序功率方向元件定值和纵联零序保护动作定值分开: 零序功率方向元件采用较低的零序电流启动定值, 纵联零序保护动作元件采用较高的纵联零序电流定值。零序功率方向元件采用高灵敏的零序电流启动定值, 判断出方向之后允许对侧动作, 待对侧跳闸之后, 本侧的故障电流受到助增达到了高门槛的纵联零序电流定值

而跳闸, 纵联保护的纵续动作逻辑可以大幅提升纵联零序保护的灵敏度。

2.5 小结

总的来说, 新型纵联零序方向元件应遵循以下原则:

- (1) 利用负序方向元件, 构建综合零序功率方向元件, 保证零序方向元件有足够的安全性。
- (2) 限制性地投入零序方向电压补偿, 防止特殊工况下的误补偿。
- (3) 跨线故障下退出纵联零序方向元件, 此时依靠纵联距离方向元件来可靠动作。
- (4) 将纵联零序保护的方向和动作定值分开, 按照低定值判别方向, 高定值完成动作判断, 赋予纵联零序保护的纵续动作特征, 提高纵联零序保护的灵敏度。

3 现场数据及仿真验证

3.1 现场数据

第1章中提到的3个现场纵联零序保护不正确的动作事例, 如采用第2章提出的新型纵联零序方向元件, 保护的具体动作行为如下述分析。

事例1: N侧不满足纵联零序方向元件0.5 V的零序电压门槛, 采用新型纵联零序方向元件后, 会按照图8的逻辑先判断该侧的负序方向元件, 负序方向元件的方向计算结果如图11, 判断为正方向, 因此满足零序方向元件用电压补偿, 补偿之后的零序电压约为1.1 V, 补偿后的方向元件的计算结果如图12所示, 为正方向, 两侧均可靠动作, 由此可见, 新型纵联零序方向元件大大提升了零序方向元件的灵敏度。

事例2: 图13为故障时两侧的负序方向元件分析图, 从图中我们可以看出两侧的负序功率方向一侧在0~180°, 判为反方向; 一侧在180~360°, 判为正方向。采用新型纵联零序方向元件后, 按照图8进行零序综合方向元件的判断, 负序方向元件为反方向这一侧的综合零序方向元件的结果为无方向, 因此纵联零序保护不会误动作。

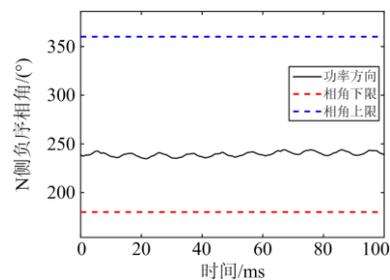


图 11 N 侧负序方向元件

Fig. 11 Negative-sequence directional element of N side

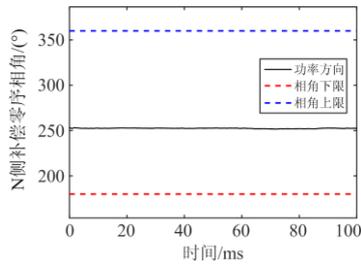


图 12 补偿后的零序方向元件

Fig. 12 Zero-sequence directional element with compensation

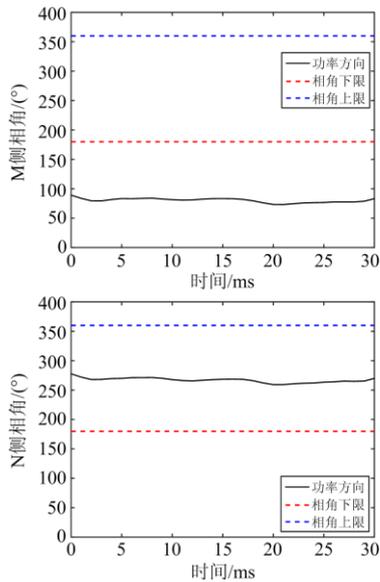


图 13 两侧故障时负序方向角度仿真结果

Fig. 13 Simulation results of zero-sequence directional angle when the fault occurs on both sides

事例3: 图14为故障时零序功率方向判为反方向的I线M侧A、B两相电压幅值, 图15为故障时I线M侧A、B相电流的方向。从图中我们可以看出A、B两相的幅值均小于跨线电压门槛, 相电流方向的结果为, 区外故障相A相为负, 区内故障相B相为正, 满足图9跨线故障的条件, M侧退出纵联零序方向元件, 靠纵联距离保护可靠动作。

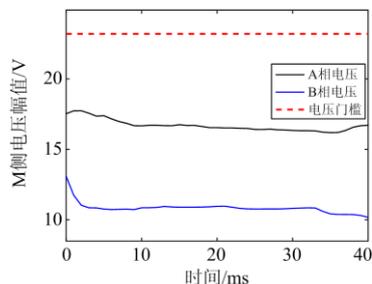


图 14 A、B 两相电压幅值

Fig. 14 Voltage amplitude of phase A and B

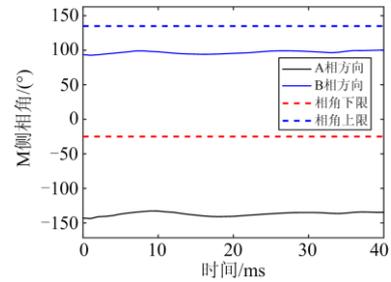


图 15 A、B 两相电流方向

Fig. 15 Current direction of phase A and B

通过对现场纵联零序保护拒动和误动的 3 个事例的分析, 我们可以得出新型的纵联零序功率方向保护大大提升了普通纵联零序保护的灵敏度和可靠性。

3.2 仿真验证

上文给出了 3 个实例的分析。为考察本文提出的方案的普适性, 在 PSCAD 仿真平台中建立如图 16 所示的 500 kV 双回线仿真模型, 验证各种情况下的零序功率方向动作情况。

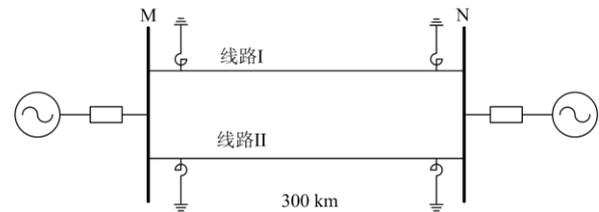


图 16 500 kV 双回线仿真模型

Fig. 16 Simulation model of 500 kV double circuit line

其中, 线路两端的系统等效为一个电压源与阻抗的串联。线路长度为 300 km, 线路参数采用 500 kV 线路典型参数。

分别在线路的不同位置进行仿真实验, 考察不同过渡电阻不同故障类型下本文提出的纵联零序方向保护方案的情况。

首先考察线路发生单相高阻故障时的情况。不失一般性, 在线路 I 上试验各种故障位置的 A 相故障。其中, 故障位置为故障点距 M 侧的距离, 仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可以看到, 在线路发生单相故障时, 在各种故障位置下, 对于金属性故障和高阻故障, 本文的方案都能得到正确的功率方向, 进而可以正确地判别区内外故障。

试验各种类型的跨线故障, 考察本文的方案对于跨线故障的适应性, 不失一般性, 考察回线 I 的情况, 典型的仿真结果如表 2 所示。

表 1 单相高阻故障仿真结果

Table 1 Simulation results of single phase high resistance fault

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	M 侧功率方向/ $^\circ$	N 侧功率方向/ $^\circ$	判别结果
10	0	261	269	区内
	100	258	262	区内
	300	247	251	区内
150	0	252	260	区内
	100	257	253	区内
	300	249	251	区内
290	0	264	259	区内
	100	261	261	区内
	300	251	255	区内
M 侧背侧	0	84	265	区外
	100	79	271	区外
	300	87	264	区外
N 侧背侧	0	271	82	区外
	100	258	81	区外
	300	263	76	区外

表 2 跨线故障仿真结果

Table 2 Simulation results of cross line fault

故障类型	A 相方向/ $^\circ$	B 相方向/ $^\circ$	C 相方向/ $^\circ$	判别结果
IA-IIB	83	-112	—	跨线故障
IA-IIBC	79	-127	-142	跨线故障
IAB-IIC	84	81	-112	跨线故障
IAG-IIBG	81	-109	—	跨线故障
IAG-IIBCG	86	-118	-108	跨线故障
IABG-IICG	77	-107	-113	跨线故障

由表 2 可以看到，利用本文给出的方案，在线路发生跨线故障时，可以正确识别出跨线故障的情况，此时应依靠纵联距离方向元件进行保护判别。

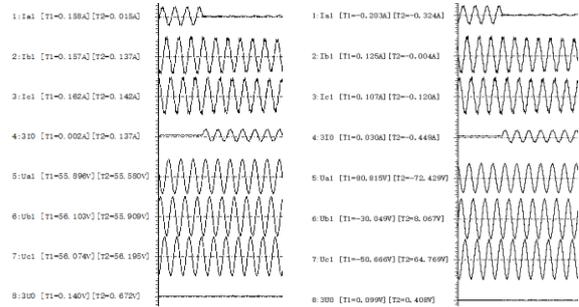
4 结论

随着电网建设的快速发展和线路走廊紧密程度的紧迫，新型电网下的新故障特征对纵联零序保护的影响也势必成为继电保护和故障分析研究中的主要问题。文章总结了现有纵联零序保护存在的一些问题，并针对这些问题，提出了一种新型的纵联零序方向元件，通过理论分析以及现场数据的验证，可以证明该方向元件可以有效地提升纵联保护的可靠性和灵敏度。

附录

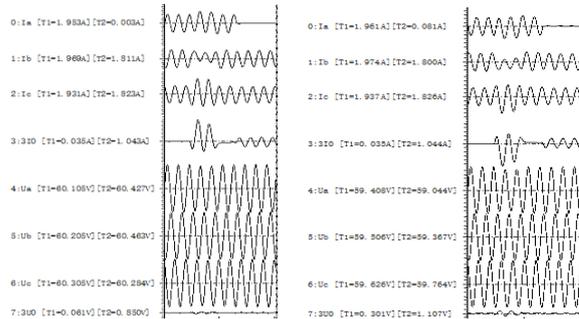
文中所述 3 个事例的原始波形图如附图 1—附

图 3 所示。



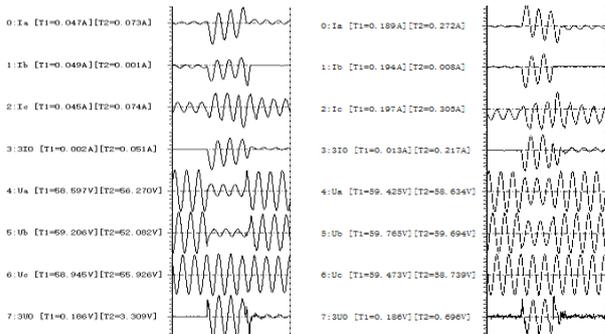
附图 1 事例 1 两侧故障波形图

Attached Fig. 1 Fault waveform on both sides of case 1



附图 2 事例 2 两侧故障波形图

Attached Fig. 2 Fault waveform on both sides of case 2



附图 3 事例 3 两侧故障波形图

Attached Fig. 3 Fault waveform on both sides of case 3

参考文献

- [1] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26. CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [2] HOSSAIN M, LEEVONGWAT I, RASTGOUFARD P. Partial operating current characteristics to discriminate internal and external faults of differential protection zones during CT saturation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 379-387.

- [3] WANG Qingping, BO Zhiqian, MA Xiaowei, et al. Integrated protection based on multi-frequency domain information for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 陈少华, 梁志雄, 孙何洪. 电力网超高压平行双回线路弱电强磁现象仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 1-7.
CHEN Shaohua, LIANG Zhixiong, SUN Hehong. Simulation and research of weak current and strong magnetic phenomenon in EHV parallel double lines[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 1-7.
- [6] 索南, 葛耀中, 陶惠良. 六序故障分量及其在同杆双回线中的故障特征[J]. 电力系统自动化, 1989(4): 44-51.
SUO Nan, GE Yaozhong, TAO Huiliang. Six-sequence fault components and its characteristics on double circuit line on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 1989(4): 44-51.
- [7] MAKWANA V H, BHALJA B R. A new digital distance relaying scheme for series-compensated double-circuit line during open conductor and ground fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 910-917.
- [8] 葛小宁, 庞福滨, 嵇建飞, 等. 采用六相输电技术优化双回高压输电线路电磁环境的研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 1-5.
GE Xiaoning, PANG Fubin, JI Jianfei, et al. Study on electromagnetic environment optimization of double circuit high voltage transmission lines by using six phase transmission technology[J]. Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 1-5.
- [9] 郭履星, 李海锋, 王钢, 等. 局部同塔双回直流输电线路的行波特性研究[J]. 广东电力, 2018, 31(5): 94-100.
GUO Lüxing, LI Haifeng, WANG Gang, et al. Study on traveling wave characteristics of local double circuit HVDC transmission lines on the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 94-100.
- [10] 陈桥平, 蔡泽祥, 刘为雄, 等. 同杆线路跨线故障对选相元件的影响机理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 95-98.
CHEN Qiaoping, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Influence of inter-line fault on phase selection element for parallel lines on same pole[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 95-98.
- [11] 叶睿恺, 吴浩, 董星星. 基于初始行波相位差的同杆双回输电线路故障识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 124-134.
YE Ruikai, WU Hao, DONG Xingxing. Fault identification of double-circuit transmission lines on the same tower based on initial traveling wave phase difference[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 124-134.
- [12] 蔡乾, 吴建云, 罗美玲, 等. 混压同塔四回线跨电压不接地故障下的距离保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 31-38.
CAI Qian, WU Jianyun, LUO Meiling, et al. Adaptability analysis of distance protection under cross-voltage ungrounded fault of mixed-voltage four-circuit line with tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 31-38.
- [13] 杜婉琳, 唐旭, 黄泽杰. 交-直流碰线故障对交流线路距离保护的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 58-64.
DU Wanlin, TANG Xu, HUANG Zejie. Influence of AC-DC line collision fault on AC line distance protection[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 58-64.
- [14] JENA P, PRADHAN A K. An integrated approach for directional relaying of the double-circuit line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1783-1792.
- [15] 姜宪国, 周泽昕, 杜丁香, 等. 基于断线识别的同塔双回线零序纵联保护防误动方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 36-42.
JIANG Xianguo, ZHOU Zexin, DU Dingxiang, et al. Anti-maloperation scheme of zero-sequence pilot protection for double-circuit lines on the same tower based on line break identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(11): 36-42.
- [16] 王兴国, 周泽昕, 杜丁香. 不同电压等级同塔多回输电线路零序功率方向元件动作行为分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 235-242.
WANG Xingguo, ZHOU Zexin, DU Dingxiang. Behavior analysis of zero-sequence power direction component for multi-circuit transmission lines in different voltage classes on same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 235-242.
- [17] 鲍有理, 徐刚. 同杆双回线跨线故障保护动作分析[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(3): 12-14.
BAO Youli, XU Gang. Analysis of protection action for overline failure of two parallel transmission lines on the same tower[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2009, 28(3): 12-14.
- [18] ZHANG Zijin, CONG Wei, GAI Wuyang, et al. Operational analysis of zero-sequence inverse-time overcurrent protection in parallel double-circuit transmission lines[C] // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy

- Engineering Conference (APPEEC), October 25-28, 2016, Xi'an, China: 491-495.
- [19] 刘云. 同塔并架高压直流输电线路故障及保护特性研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 163-169.
LIU Yun. Study on fault and protection characteristics of HVDC transmission lines on the same tower[J]. Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 163-169.
- [20] 申志成, 张慧媛, 龚仁敏, 等. 反应全类型故障的改进零序方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 102-106.
SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, GONG Renmin, et al. An improved zero-sequence directional component to response all kinds of fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 102-106.
- [21] 王成章, 李红霞. 零序功率方向继电器接线正确性判定和校验[J]. 电气技术, 2011(2): 37-40.
WANG Chengzhang, LI Hongxia. Zero-sequence power direction relay connection to determine and verify the correctness[J]. Electrical Engineering, 2011(2): 37-40.
- [22] 李振兴, 王玲, 王欣, 等. 一种基于电流自构参考量的电流方向纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 28-34.
LI Zhenxing, WANG Ling, WANG Xin, et al. A current directional longitudinal protection based on current self-configuring reference[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 28-34.
- [23] CHEN T P. Zero-sequence circulating current reduction method for parallel HEPWM inverters between AC bus and DC bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(1): 290-300.
- [24] DARWISH H A, TAALAB A M I, AHMED E S. Investigation of power differential concept for line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 617-624.
- [25] AZIZ M M A, ZOBAA A F, IBRAHIM D K, et al. Transmission lines differential protection based on the energy conservation law[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1865-1872.
- [26] 赖庆辉, 陈福锋, 许庆强, 等. 纵联零序方向元件的特殊问题分析及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 88-91.
LAI Qinghui, CHEN Fufeng, XU Qingqiang, et al. Analysis of pilot zero-sequence directional protection special problems and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 88-91.
- [27] 樊占峰, 叶东印, 李瑞生, 等. 平行线弱电强磁模型下零序方向元件改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 100-103.
FAN Zhanfeng, YE Dongyin, LI Ruisheng, et al. Improvement of zero-sequence directional relay for the parallel line with magnetically strong and electrically weak connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 100-103.
- [28] 孔伟彬, 朱晓彤, 张俊洪, 等. 同杆双回线上零序功率方向继电器的误判问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 45-48.
KONG Weibin, ZHU Xiaotong, ZHANG Junhong, et al. Wrong judgement of zero sequence directional relay on double-circuit line on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 45-48.
- [29] 习伟, 李天华. 基于无死区零序功率方向的纵联零序保护[J]. 四川电力技术, 2011, 34(6): 17-20.
XI Wei, LI Tianhua. Pilot zero-sequence relay based on zero-sequence power direction without dead-zone[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2011, 34(6): 17-20.

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-11-18

作者简介:

薛明军(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: mingjun-xue@sac-china.com

杨黎明(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护;

张祥(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为从事电力系统继电保护控制技术。

(编辑 葛艳娜)