

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.02.027

## 消除模糊区的同杆双回线自适应重合闸

崔玉<sup>1</sup>, 陆金凤<sup>2</sup>, 谢华<sup>2</sup>, 吴奕<sup>1</sup>, 曹海欧<sup>1</sup>, 赵青春<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**常规单相重合闸方式无法识别线路瞬时故障与永久故障,当重合于永久故障时,将对系统或相关设备增加一次冲击,并有可能导致直流换相失败。文中提出了一种仅需本回线信息的同杆双回线自适应重合闸判据,工程实用性强。该判据采用故障相故障点恢复电压,通过线路电容参数和多种故障类型下电容耦合电压的大小关系实时计算动作门槛,消除由线路电容参数和故障类型造成的故障性质判别模糊区;引入辅助判据,合理设置重合闸时间,消除由异名相跨线不接地故障造成的模糊区。仿真实验表明文中提出的自适应重合闸判据适用于同杆双回线可能出现的多种故障类型。

**关键词:**自适应重合闸;同杆双回线;电容耦合电压;模糊区;动作门槛;辅助判据

**中图分类号:**TM734

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)02-0186-07

### 0 引言

常规的输电线路单相重合闸,在保护动作跳闸后经设定延时将断路器重新合闸,并不判断故障是否为永久性故障<sup>[1-2]</sup>。交流输电线路发生单相永久故障并采取自动重合闸时,可能会引起直流线路换流器连续换相失败<sup>[3-4]</sup>。当直流输送功率较大时,若发生连续换相失败引起直流闭锁,会对交流电网造成较大功率冲击,引起电网潮流大幅波动、机群间暂态功角失稳等<sup>[5-8]</sup>。近年来,电网直流受电比例日益增加,为了降低重合于永久性故障造成直流换相失败的风险,迫切需要进一步开展针对输电线路自适应重合闸技术的优化研究。

国内外专家学者和研究机构已对自适应重合闸展开了较多的研究<sup>[9-13]</sup>。文献[14]通过综合两回线信息将非严重永久故障判据、辅助判据以及按相顺序重合原则结合起来,实现了同杆双回线的自适应重合闸功能。文献[15]提出了一种基于故障点电压特性的同杆双回线自适应重合闸技术。针对接地故障类型,提出利用故障点电压幅值判断故障性质的方法;针对跨线故障,提出利用不同回线跳开相故障点电压差判断故障性质的方法。但是上述文献提出的同杆双回线自适应重合闸判据都需要综合两回线信息,进一步增加了二次回路的复杂性,工程改造难度大;同时,上述文献提出的自适应重合闸未考虑实际线路电容参数和线路故障类

型对判据造成的模糊区。

文中的研究工作建立在对同杆双回线各种故障类型下电容耦合电压分析的基础上,提出一种仅需本回线信息且消除模糊区的同杆双回线自适应重合闸判据。依据该判据开发的PCS-931SA-G-E超高压线路成套保护装置已在苏州220 kV周峰7149线挂网运行。

### 1 同杆双回线自适应重合闸判据

以下针对单相重合闸方式,开展同杆双回线单相故障及单相跨单相故障的故障相恢复电压分析<sup>[16-17]</sup>。

故障相恢复电压由电容耦合电压和电磁耦合电压组成<sup>[18-21]</sup>。电磁耦合电压与线路负荷电流、线路互感成正比,受系统潮流影响。电容耦合电压仅由线路的电容参数决定<sup>[22]</sup>。

假设第I回线的A相发生单相接地故障。A相断路器跳开后,线路在故障点处的等效电路如图1所示。 $\dot{U}_{Af}$ ,  $\dot{U}_{Bf}$ ,  $\dot{U}_{Cf}$ 分别为第I回线故障点处的三相电压; $\dot{U}_{Af'}$ ,  $\dot{U}_{Bf'}$ ,  $\dot{U}_{Cf'}$ 分别为第II回线故障点处的三相电压; $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$ 分别为第I回线三相电流; $\dot{I}_{A'}$ ,  $\dot{I}_{B'}$ ,  $\dot{I}_{C'}$ 分别为第II回线三相电流; $C_0$ 为每相线路对地电容; $C_m$ 为每回线路相间电容; $C'_m$ 为两回线路间电容; $Z_m$ 为每回线路相间互感; $Z'_m$ 为两回线路间互感; $R_f$ 为接地短路过渡电阻。

假设系统三相完全对称,第II回线故障点处的三相电压相量和为0。因此,永久性故障时,故障相电容耦合电压 $\dot{U}_{P-IAG}$ 为:

收稿日期:2019-09-18;修回日期:2019-10-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“继电保护数据采集和运行分析关键技术研究”

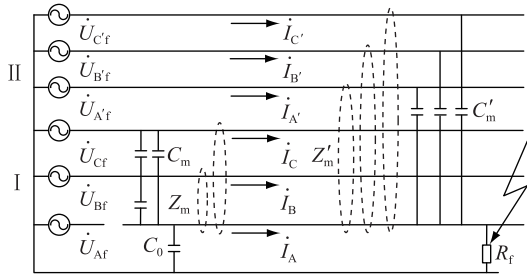


图1 同杆双回线 I AG 故障等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of double-circuit line's I AG fault

$$\dot{U}_{P\_IAG} = \frac{C_m(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})}{2C_m + 3C'_m + C_0 + (1/j\omega R_f)} \quad (1)$$

瞬时性故障时,过渡电阻  $R_f \rightarrow \infty$ ,故障相电容耦合电压  $\dot{U}_{L\_IAG}$  为:

$$\dot{U}_{L\_IAG} = \frac{C_m(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})}{2C_m + 3C'_m + C_0} \quad (2)$$

同杆双回线跨线故障的电容耦合电压同理可推导。

$$\begin{cases} \dot{U}_{L\_IAIAG} = \frac{(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})(C_m + C'_m)}{2C_m + 2C'_m + C_0} \\ \dot{U}_{P\_IAIAG} = \frac{(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})(C_m + C'_m)}{2C_m + 2C'_m + C_0 + (1/j\omega R_f)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{L\_IAIIBG} = \frac{C_m(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf}) + C'_m(\dot{U}_{A'f} + \dot{U}_{C'f})}{2C_m + 2C'_m + C_0} \approx \frac{(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})(C_m + e^{j120^\circ} C'_m)}{2C_m + 2C'_m + C_0} \\ \dot{U}_{P\_IAIIBG} \approx \frac{(\dot{U}_{Bf} + \dot{U}_{Cf})(C_m + e^{j120^\circ} C'_m)}{2C_m + 2C'_m + C_0 + (1/j\omega R_f)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{U}_{L\_IAIIB} = \dot{U}_{P\_IAIIB} = \dot{U}_{L\_IAIIBG} \quad (5)$$

式中:  $\dot{U}_f$  为同杆双回线发生瞬时性故障的电容耦合电压;  $\dot{U}_p$  为同杆双回线发生永久性故障的电容耦合电压; 下标  $\_IAG$ ,  $\_IAIAG$ ,  $\_IAIIBG$ ,  $\_IAIIB$  为故障类型, 分别表示单相接地故障、同名单相跨单相接地故障、异名单相跨单相接地故障和异名单相跨单相不接地故障。

同杆双回线发生瞬时性故障时,故障点位置在线路中点附近时故障点恢复电压最低,等于  $|\dot{U}_f|$ ,在其他位置时都要大于  $|\dot{U}_f|$ 。而同杆双回线发生同类型 ( $\_IAIIB$  除外) 的永久性故障时,故障点电压等于  $|\dot{U}_p|$ ,小于  $|\dot{U}_f|$  [23]。

因此选用故障点恢复电压作为自适应重合闸

判据的电气量。以此构建同杆双回线自适应重合闸判据,如式(6)所示:

$$|\dot{U}_f| > U_z \quad (6)$$

式中:  $|\dot{U}_f|$  为故障相故障点恢复电压幅值;  $U_z$  为自适应重合闸判据动作门槛。

满足本判据,则判断线路发生瞬时性故障,启动重合闸;不满足本判据,则判断线路发生永久性故障,闭锁重合闸。

本判据使用前提之一是保护装置接入线路电压互感器(potential transformer,PT)。输电线路发生故障且断路器跳开后,保护装置获取线路本端三相电压  $\dot{U}_{Am}$ ,  $\dot{U}_{Bm}$ ,  $\dot{U}_{Cm}$ ,经光纤通道获取线路对端三相电压  $\dot{U}_{An}$ ,  $\dot{U}_{Bn}$ ,  $\dot{U}_{Cn}$ 。则故障点处三相电压为:

$$\dot{U}_{\varphi f} = (1 - \alpha) \dot{U}_{\varphi m} + \alpha \dot{U}_{\varphi n} \quad \varphi = A, B, C \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为故障点距离本端长度与线路总长度之比,可通过线路保护装置测距获得或通过行波测距装置获得。

永久性故障时的故障相故障点电压远小于瞬时性故障时的故障相故障点电压,因此判据的准确度很高。在当前已达到的双端数据同步程度及测距精度下,其计算结果误差很小,不会影响判据的有效性。

## 2 自适应重合闸判据的模糊区及消除方法

### 2.1 线路电容参数造成的模糊区

文中在研究过程中对华东电网全部 500 kV 超高压输电线路电容参数进行了分析。受线路电容参数影响,不同线路电容耦合电压差别很大。

如胜苍 5801 线,  $C_0$  为 1.33  $\mu\text{F}$ ,  $C_m$  为 0.022  $\mu\text{F}$ ,若单回线运行且发生单相接地瞬时性故障时电容耦合电压为 0.91 V。阳东 I 线,  $C_0$  为 1.4  $\mu\text{F}$ ,  $C_m$  为 0.640  $\mu\text{F}$ ,若单回线运行且发生单相接地瞬时性故障时电容耦合电压为 13.79 V,若经 300  $\Omega$  过渡电阻单相接地永久性故障时电容耦合电压为 3.38 V。

受线路电容参数的影响,阳东 I 线经 300  $\Omega$  过渡电阻永久性故障时的电容耦合电压明显大于胜苍 5801 线瞬时性故障时的电容耦合电压。

因此,自适应重合闸判据不应直接给出一个固定值作为动作门槛  $U_z$ ,文中提出依据实际线路的电容参数和健全相电压实时计算浮动门槛  $U_z$ 。

理论上,  $U_z$  应小于实际线路的瞬时性故障电容耦合电压  $|\dot{U}_f|$ ,大于实际线路的永久性故障电容耦合电压  $|\dot{U}_p|$ 。

## 2.2 不同故障类型造成的模糊区

由式(1)一式(4)可知,同杆双回线在同一故障类型下,瞬时性故障的电容电压  $|\dot{U}_1|$  大于永久性故障的电容耦合电压  $|\dot{U}_p|$ 。同杆双回线在同一故障性质下(同为瞬时性或永久性故障), I A II AG 的电容耦合电压最大, I AG、I A II BG 的电容耦合电压大小关系与线路电容参数有关。

因此,当同杆双回线发生 I A II AG 永久性接地故障且过渡电阻足够大时,电容耦合电压  $\dot{U}_{P\_IAIIAG}$  有可能大于 I AG 或 I A II BG 瞬时性故障时电容耦合电压  $\dot{U}_{L\_IAG}$  或  $\dot{U}_{L\_IAIIBG}$ ,使得自适应重合闸判据存在模糊区,即不同故障类型下的永久性故障电容耦合电压可能大于瞬时性故障,因此区分永久性和瞬时性故障的浮动门槛选取需要考虑故障类型带来的影响。

同杆双回线故障概率最高的是单回线单相接地故障。因此,文中实时计算自适应重合闸判据门槛的一个基本原则是必须识别出单回线单相接地故障的故障性质,并尽可能识别出跨线故障的故障性质。

基于上述原则,自适应重合闸判据实时计算浮动动作门槛的方法如下:

(1) 根据式(1)一式(4)分别计算线路发生瞬时性接地故障时,电容耦合电压  $|\dot{U}_{L\_IAG}|$ ,  $|\dot{U}_{L\_IAIIBG}|$ ,  $|\dot{U}_{L\_IAIIAG}|$  的理论值。

(2) 根据式(1)一式(4)分别计算线路发生永久性接地故障时,电容耦合电压  $|\dot{U}_{P\_IAG}|$ ,  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}|$ ,  $|\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$  的理论值。计算时  $R_f$  在继电保护考虑的各电压等级过渡电阻的最大值基础上增加一定裕度。

(3) 比较步骤(1)和步骤(2)中各计算值大小,按照图 2 所示流程实时计算自适应重合闸判据浮动动作门槛  $U_z$ 。

(a) 若  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}| < |\dot{U}_{L\_IAG}|$ , 则:

$$U_z(1) = k |\dot{U}_{L\_IAG}| + (1 - k) |\dot{U}_{P\_IAIIAG}| \quad (8)$$

(b) 若  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}| \geq |\dot{U}_{L\_IAG}|$  且  $|\dot{U}_{L\_IAG}| < |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$  且  $|\dot{U}_{P\_IAIIBG}| < |\dot{U}_{L\_IAG}|$ , 则:

$$U_z(2) = k |\dot{U}_{L\_IAG}| + (1 - k) |\dot{U}_{P\_IAIIBG}| \quad (9)$$

(c) 若  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}| \geq |\dot{U}_{L\_IAG}|$  且  $|\dot{U}_{L\_IAG}| < |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$  且  $|\dot{U}_{P\_IAIIBG}| \geq |\dot{U}_{L\_IAG}|$ , 则:

$$U_z(3) = k |\dot{U}_{L\_IAG}| + (1 - k) |\dot{U}_{P\_IAG}| \quad (10)$$

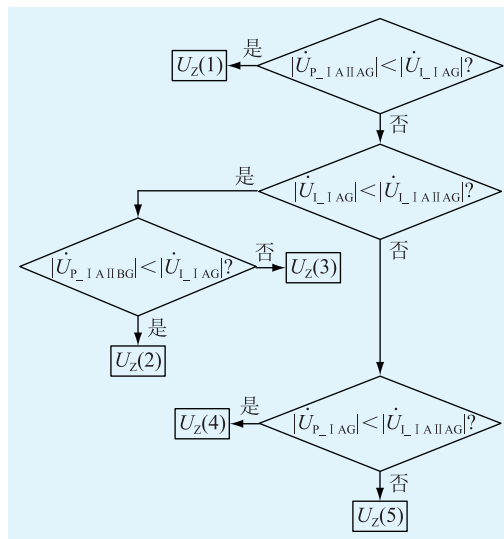


图 2 自适应重合闸判据门槛计算

Fig.2 Setting of adaptive reclosing criterion

(d) 若  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}| \geq |\dot{U}_{L\_IAG}|$  且  $|\dot{U}_{L\_IAG}| \geq |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$  且  $|\dot{U}_{P\_IAG}| < |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$ , 则:

$$U_z(4) = k |\dot{U}_{P\_IAIIBG}| + (1 - k) |\dot{U}_{P\_IAG}| \quad (11)$$

(e) 若  $|\dot{U}_{P\_IAIIAG}| \geq |\dot{U}_{L\_IAG}|$  且  $|\dot{U}_{L\_IAG}| \geq |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$  且  $|\dot{U}_{P\_IAG}| \geq |\dot{U}_{P\_IAIIBG}|$ , 则:

$$U_z(5) = k |\dot{U}_{L\_IAG}| + (1 - k) |\dot{U}_{P\_IAG}| \quad (12)$$

其中,系数  $k$  的取值范围建议为  $0.3 < k < 0.7$ 。 $k$  越大,  $U_z$  越大,自适应重合闸判据越偏向于识别故障性质为永久性故障;  $k$  越小,  $U_z$  越小,自适应重合闸判据越偏向于识别故障性质为瞬时性故障。

## 2.3 I A II B 故障造成的模糊区

由式(5)可知,同杆双回线异名单相跨单相不接地故障类型下,瞬时性故障时和永久性故障时的故障相电容耦合电压相等。因此同杆双回线自适应重合闸判据式(6)不能识别 I A II B 故障性质。

为了弥补判据式(6)的不足,可以将同杆双回线的两回线设置不同的重合闸时间。I A II B 故障,故障相断路器跳开后,一回线故障相先重合。若确实为 I A II B 瞬时性故障,则另一回线故障相故障点电压仍为电容耦合电压;若实际为 I A II B 永久性故障,则另一回线故障相故障点电压被强制抬高至接近线路额定电压。

因此, I A II B 故障的自适应重合闸辅助判据为:在一回线故障相优先重合后,判断另一回线故障相故障点电压。辅助判据如式(13)所示:

$$|U_f| < U'_z \quad (13)$$

式中:  $|U_f|$  为后合线路故障相故障点电压幅值;  $U'_z$  为自适应重合闸辅助判据门槛。

兼顾考虑其他故障类型,  $U'_z$  的取值范围为  $|\dot{U}_{L I A II AG}| < U'_z < U_N$ , 其中  $U_N$  为线路额定电压。对于重合闸时间先后的判别, 可以在保护装置中增加相应的先合控制字加以识别。

综上所述, 同杆双回线自适应重合闸判据的逻辑框图如图 3 所示。

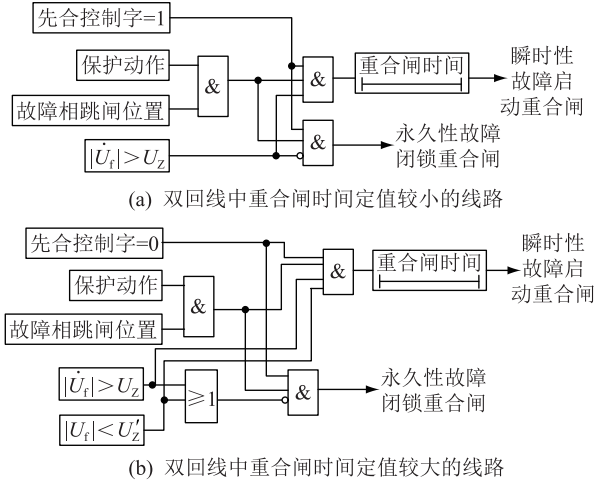


图 3 同杆双回线自适应重合闸判据逻辑  
Fig.3 Logic of adaptive reclosure criterion of double-circuit line

### 3 仿真实验

搭建了基于 EMTDC 的 500 kV 同杆双回线杆塔模型, 线路长度 140 km, 线路传输有功功率 4 000 MW, PT 变比 500 kV/100 V。

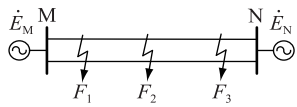


图 4 同杆双回线 EMTDC 仿真模型  
Fig.4 EMTDC simulation model of double-circuit line

同杆双回线计算  $U_z$  时, 系数  $k$  设置为 0.5; 辅助判据式 (13) 的辅助判据门槛  $U'_z$  设置为 30 V。

同杆双回线发生单相故障及单相跨单相故障仿真数据分别如表 1—表 4 所示。

表 2 中, 故障点为故障位置距线路 M 端的距离;  $U_M$  为故障相 M 端电压;  $U_N$  为故障相 N 端电压;  $U_F$  为故障相故障点电压。

同杆双回线发生单相接地故障。瞬时性故障时, 故障相故障点电压在 5.5 V 左右, 自适应重合闸判据浮动门槛在 3.6 V 左右, 准确识别为瞬时性故障。金属接地永久性故障时, 故障相故障点电压几乎为零, 经 300 Ω 过渡电阻永久性故障时, 故障相故障点电压不大于 0.9 V, 而永久性故障时自适应重合

表 1 单相接地故障 | AG 仿真数据  
Table 1 Simulation data of | AG fault

故障类型	故障点 /km	$U_M/V$	$U_N/V$	$U_F/V$	$U_z/V$	判据结果
瞬时故障	0	5.91	5.32	5.91	3.72	瞬时
	35	5.89	5.30	5.62	3.63	瞬时
	70	5.89	5.31	5.43	3.57	瞬时
	105	5.92	5.32	5.34	3.56	瞬时
	140	5.94	5.35	5.35	3.58	瞬时
永久故障金属接地	0	0	2.82	0	3.72	永久
	35	0.70	2.10	0.05	3.63	永久
	70	1.40	1.39	0.07	3.57	永久
	105	2.01	0.69	0.05	3.56	永久
	140	2.80	0	0	3.58	永久
永久故障过渡电阻 300 Ω	0	0.92	1.94	0.90	3.73	永久
	35	1.59	1.24	0.90	3.63	永久
	70	2.26	0.54	0.87	3.57	永久
	105	2.94	0.15	0.85	3.56	永久
	140	3.63	0.84	0.84	3.58	永久

表 2 同名单相跨单相接地故障 | A || AG 仿真数据  
Table 2 Simulation data of | A || AG fault

故障类型	故障点 /km	$U_M/V$	$U_N/V$	$U_F/V$	$U_z/V$	判据结果
瞬时故障	0	14.38	12.25	14.38	3.83	瞬时
	35	14.38	12.26	12.95	3.64	瞬时
	70	14.40	12.27	12.06	3.54	瞬时
	105	14.41	12.28	11.82	3.52	瞬时
	140	14.44	12.30	12.30	3.59	瞬时
永久故障金属接地	0	0	11.68	0	3.84	永久
	35	2.90	8.71	0.12	3.65	永久
	70	5.81	5.77	0.16	3.54	永久
	105	8.73	2.87	0.12	3.52	永久
	140	11.65	0	0	3.60	永久
永久故障过渡电阻 300 Ω	0	2.03	9.89	2.03	3.84	永久
	35	4.70	6.96	1.87	3.65	永久
	70	7.52	4.07	1.75	3.54	永久
	105	10.38	1.25	1.69	3.52	永久
	140	13.26	1.73	1.73	3.60	永久

闸判据浮动门槛不小于 3.56 V, 准确识别为永久性故障。

同杆双回线发生同名单相跨单相接地故障, 故障相恢复电压较高。瞬时性故障时, 故障相故障点电压最小为 11.82 V; 永久性故障时, 故障相故障点电压最大为 2.03 V; 自适应重合闸判据浮动门槛为 3.52~3.84 V, 准确识别故障性质。

同杆双回线发生异名单相跨单相接地故障, 瞬时性故障时, 故障相故障点电压最小为 5.95 V; 永久性故障时, 故障相故障点电压最大为 0.93 V; 自适

表3 异名单相跨单相接地故障 | A || BG 仿真数据  
Table 3 Simulation data of | A || BG fault

故障类型	故障点 /km	$U_M/V$	$U_N/V$	$U_F/V$	$U_Z/V$	判据结果
瞬时故障	0	6.59	5.95	6.59	3.63	瞬时
	35	6.60	5.96	6.31	3.60	瞬时
	70	6.60	5.96	6.11	3.62	瞬时
	105	6.62	5.96	6.00	3.69	瞬时
	140	6.60	5.95	5.95	3.81	瞬时
永久故障 金属接地	0	0	2.99	0	3.63	永久
	35	0.74	2.23	0.06	3.60	永久
	70	1.49	1.47	0.08	3.62	永久
	105	2.23	0.73	0.06	3.69	永久
	140	2.97	0	0	3.81	永久
永久故障 过渡电阻 300 Ω	0	0.93	2.12	0.93	3.63	永久
	35	1.63	1.36	0.91	3.60	永久
	70	2.36	0.62	0.88	3.62	永久
	105	3.08	0.12	0.86	3.69	永久
	140	3.81	0.84	0.84	3.81	永久

表4 异名单相跨单相不接地故障 | A || B 仿真数据  
Table 4 Simulation data of | A || B fault

故障类型	故障点 /km	先合相 $U_F/V$	后合相 $U_F/V$	后合相 $U'_F/V$	判据结果
瞬时故障	0	6.73	6.73	5.96	瞬时
	35	6.43	6.43	5.73	瞬时
	70	6.13	6.13	5.52	瞬时
	105	6.02	6.02	5.40	瞬时
	140	6.08	6.08	5.41	瞬时
永久故障	0	6.52	6.52	55.28	永久
	35	6.36	6.36	54.15	永久
	70	6.19	6.19	53.24	永久
	105	6.09	6.09	52.58	永久
	140	6.04	6.04	51.18	永久

应重合闸判据浮动门槛为 3.60~3.81 V, 准确识别故障性质。

表4中, 先合相  $U_F$  为断路器跳开后重合闸时间定值较小线路的故障相故障点电压; 后合相  $U_F$  为断路器跳开后重合闸时间定值较大线路的故障相故障点电压; 后合相  $U'_F$  为先合相断路器重合后未重合线路的故障相故障点电压。

同杆双回线发生异名单相跨单相不接地故障, 故障发生后断路器跳开, 瞬时性故障和永久性故障时, 两回线的故障相故障点恢复电压均为 6.5 V 左右, 认为是瞬时性故障。重合闸时间定值较小的线路重合闸后, 瞬时性故障时未重合线路的故障相故障点电压最大为 5.96 V, 永久性故障时未重合闸线路的故障相故障点电压最小为 51.18 V。自适应重

合闸辅助判据定值整定为 30 V, 可以准确识别异名单相跨单相不接地故障的故障性质。

## 4 结论

文中提出了一种适用于同杆双回线的自适应重合闸判别方法, 以保护安装处恢复电压结合测距结果推算的故障点电容耦合电压作为动作量, 通过装置设定的线路参数依据一定的计算选择流程形成比较门槛, 有效提高了各种复杂工况下的故障性质识别准确度。主要工作和结论如下:

(1) 分析了同杆双回线单相故障及单相跨单相故障的电容耦合电压, 并在此基础上提出了基于故障相故障点恢复电压的同杆双回线自适应重合闸判据;

(2) 同杆双回线自适应重合闸判据根据实际线路的电容参数整定动作门槛, 消除线路电容参数造成的模糊区;

(3) 同杆双回线自适应重合闸判据根据多种故障类型下电容耦合电压的大小关系整定动作门槛, 消除不同故障类型造成的模糊区;

(4) 同杆双回线自适应重合闸判据将两回线设置不同的重合闸时间, 并引入辅助判据, 消除异名相跨线不接地故障造成的模糊区;

(5) 同杆双回线自适应重合闸判据无须依赖双回线信息, 不涉及装置外部回路的变化, 工程改造易实现;

(6) 仿真实验表明, 文中提出的同杆双回线自适应重合闸判据能准确可靠地识别同杆双回线各种故障类型下的故障性质, 从而有效降低重合于永久性故障对于系统带来的影响。

### 参考文献:

- [1] 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: 160-177.  
ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 160-177.
- [2] 宋亮亮, 汪洋, 袁宇波, 等. 双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 18-21.  
SONG Liangliang, WANG Ping, YUAN Yubo, et al. Analysis on reclosing function operation of double configured line protection devices[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1): 18-21.
- [3] 李猛, 夏成军, 杜兆斌. 混合直流双桥换相失败机理及抑制研究措施研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 47-53.  
LI Meng, XIA Chengjun, DU Zhaobin. Research on the mechanism and suppression method of double bridge discontinuous commutation failure in hybrid HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 47-53.

- [4] 王少辉,唐飞,向农,等. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(12):16-21.  
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong, et al. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12):16-21.
- [5] 胡晓飞,陈得治,张垠,等. 多直流换相失败对弱交流断面的冲击特性及应对措施[J]. 中国电力,2017,50(5):26-32.  
HU Xiaofei, CHEN Dezhi, ZHANG Yin, et al. Impact of multi-HVDC commutation failure on weak AC section and its countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(5):26-32.
- [6] 周前,张潮,张宁宇,等. 2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J]. 电力工程技术,2018,37(1):51-57.  
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ningyu, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC system in planning power grid of Jiangsu in 2018[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):51-57.
- [7] 付俊波,余江,俞秋阳,等. 多回直流换相失败对系统稳定性的影响研究[C]//2016 输变电年会,2016:294-297.  
FU Junbo, YU Jiang, YU Qiuyang, et al. Study on the influence of multi circuit DC commutation failure on system stability [C]//2016 Annual Meeting of Power Transmission and Transformation, 2016:294-297.
- [8] 屠竞哲,杨莉,黄涌,等. 直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):12-17.  
TU Jingzhe, YANG Li, HUANG Yong, et al. Mechanism and peak value calculation of AC tie-line power swing caused by DC blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):12-17.
- [9] 张维,宋国兵,豆敏娜,等. 基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(18):60-67.  
ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18):60-67.
- [10] 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.
- [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] 王海蓉,袁兆强,鲁明芳,等. 电力系统自适应重合闸技术[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):81-84.  
WANG Hairong, YUAN Zhaoqiang, LU Mingfang, et al. Self-adaptive reclosure of power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(3):81-84.
- [13] 沈军,舒治淮,陈军,等. 自适应重合闸在电力系统中的应用实践[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):152-156.  
SHEN Jun, SHU Zhihui, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6):152-156.
- [14] 罗勋华,黄纯,江亚群,等. 基于电压内积的带并联电抗器输电线路单相自适应重合闸[J]. 电工技术学报,2017,32(11):17-25.  
LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A voltage inner product based approach for single-phase adaptive reclosure on transmission line with shunt reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11):17-25.
- [15] 林达,王庆庆,王慧芳,等. 带并联电抗器同杆双回线自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化,2015(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(6):101-106.
- [16] 黄越,李凤婷,易鹏,等. 应用附加电容的柔性直流输电线路自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(23):30-36.  
HUANG Yue, LI Fengting, YI Peng, et al. Adaptive reclosure scheme of MMC-HVDC transmission lines using additional capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23):30-36.
- [17] 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.
- [18] 何柏娜,赵云伟,林鹤云,等. 带并联电抗器的交流特高压输电线路单相自适应重合闸故障识别方法[J]. 高压电器,2013,49(12):13-18,25.  
HE Baina, ZHAO Yunwei, LIN Heyun, et al. Fault identification method for single-phase adaptive reclosure on UHV AC transmission lines with shunt reactors [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12):13-18, 25.
- [19] 贾晶晶,龚庆武,李勋,等. 融合轨迹预测技术的输电线路新型自适应重合闸[J]. 电网技术,2012,36(9):209-215.  
JIA Jingjing, GONG Qingwu, LI Xun, et al. A new type of adaptive reclosing merged with trajectory prediction for transmission lines [J]. Power System Technology, 2012, 36(9):209-215.
- [20] 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.
- [21] 李博通,李永丽. 基于故障点电压特性的同杆双回线自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(11):46-54.  
LI Botong, LI Yongli. An adaptive autoreclosure technique for

double-circuit transmission line based on voltage characteristics at fault point[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11):46-54.

[22] 赵一. 500 kV 同杆双回线路重合闸方案的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

ZHAO Yi. Research on the reclosing scheme of 500 kV double-circuit lines on the same pole[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[23] 李博通. 单相自适应重合闸新原理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

LI Botong. Research on the new principle of single-pole adap-

tive reclosure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

作者简介:



崔玉

崔玉(1978),女,硕士,高级工程师,从事电力系统调度运行及继电保护管理相关工作(E-mail:ellen\_cy@hotmail.com);

陆金凤(1987),女,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作;

谢华(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究工作。

### Adaptive reclosure of double-circuit line without fuzzy zone

CUI Yu<sup>1</sup>, LU Jinfeng<sup>2</sup>, XIE Hua<sup>2</sup>, WU Yi<sup>1</sup>, CAO Haiou<sup>1</sup>, ZHAO Qingchun<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Conventional single-phase reclosing mode cannot identify instantaneous fault and permanent fault, when reclosing permanent fault, will increase an impact related to system or equipment, and is likely to lead to DC commutation failure. An adaptive reclosure criterion of double-circuit line is proposed, which only require single line information and have engineering practicability. The criterion uses the voltage of fault point, calculates the action threshold in real time through the capacitance parameters and the relationship between capacitance coupled voltages under various fault types to eliminate the fuzzy zone caused by the line capacitance parameter and fault type, introduces an auxiliary criterion and sets the reset time reasonably to eliminate the fuzzy zone caused by the cross-line non-earth fault. The simulation results show that the adaptive reclosing criterion is applicable to various types of failures that may occur on double-circuit line.

**Keywords:** adaptive reclose; double-circuit line; capacitive coupling voltage; fuzzy zone; action threshold; auxiliary criterion

(编辑 钱悦)