

# 基于电压突变量的同塔双回直流输电线路故障选线方法

王海军<sup>1</sup>, 周全<sup>1</sup>, 梁远升<sup>2</sup>, 李海锋<sup>2</sup>, 王钢<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 同塔双回直流线路极线间复杂的电磁耦合关系, 增加了其故障极线识别的难度。基于平行四线系统解耦理论, 对同塔双回直流线路电压量进行解耦分析, 提取出相互独立的一个同向量与三个环流量电压。在此基础上详细分析了同塔双回直流输电线路在不同故障类型以及不同极线故障情况下的同向与环流电压突变量的极性和幅值大小特征, 进而利用同向与环流电压突变量极性和幅值大小的差异及相互间的关联关系, 提出了一种同塔双回直流输电线路故障选线方法。基于实际同塔双回直流输电系统的 PSCAD/EMTDC 大量仿真结果表明, 该方法准确可靠, 且不受过渡电阻影响。

**关键词:** 同塔双回输电线路; 故障分析; 故障选线; 电压突变量

## Fault line selection of double-circuit HVDC transmission line based on voltage variation

WANG Haijun<sup>1</sup>, ZHOU Quan<sup>1</sup>, LIANG Yuansheng<sup>2</sup>, LI Haifeng<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The complex electromagnetic coupling between polars of double-circuit HVDC transmission line increases the difficulty of fault line selection. According to the decoupling theory of four-parallel transmission lines on the same tower, the voltage variation of double-circuit HVDC transmission line is transformed into four separate voltage components: a ground mode component and three line mode components. Further, the transformation is employed to analyze the characteristics of ground mode component and line mode components of voltage variation under different kinds of fault. Thereby a method for fault line selection of double-circuit HVDC transmission line is proposed based on the amplitude and polarity of ground mode component and line mode components of voltage variation. Finally, the simulation results of a double-circuit HVDC system model based on PSCAD/EMTDC show that the proposed method is effective and immune to the fault resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007024 and No. 51307065) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2013ZZ028).

**Key words:** double-circuit HVDC transmission line; fault analysis; fault line selection; voltage variation

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0023-07

## 0 引言

直流输电相比于交流输电更适于远距离大功率跨区域输电<sup>[1-3]</sup>, 因此在我国得到了越来越广泛的应用。但在土地资源愈发紧张背景下, 为了能够有效利用输电走廊, 提高线路单位走廊的输电容量和土地利用效率, 降低电力建设成本, 高压直流输电工程已开始采用同塔双回输电方式<sup>[4-5]</sup>。

然而直流线路作为直流输电系统的重要元件之一, 故障几率极高, 且双回直流输电方式相比于传统的单回直流输电方式, 其极线间的互感耦合更加复杂, 任一线路发生故障, 均会导致非故障极电压、电流波动, 对直流线路保护的故障极识别造成严重影响。因此开展同塔双回直流线路的故障选线研究具有重要的理论和工程实用意义。

目前, 国内外学者已经对同塔多回线路互感耦合特性及故障选线问题进行了大量研究, 但主要集中在交流线路, 如交流耦合线路感应电压和电流的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51007024, 51307065); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013ZZ028)

计算<sup>[6-8]</sup>,同塔四回交流线路的故障选线方法等<sup>[9-10]</sup>。而在直流线路的研究上则主要集中在单回直流线路故障暂态分析及保护原理<sup>[11-13]</sup>,涉及两回直流线路的还较少。文献[14]对直流与交流线路间的电磁暂态过程进行了仿真研究,文献[15]则针对双回直流线路故障极对健全极的影响进行了仿真计算。

为此,本文在研究平行四线系统解耦理论的基础上,对同塔双回直流线路进行解耦,提取出同向与环流电压突变量,并分析了不同故障形式下同向与环流电压突变量相互间关联的故障特征,以此为基础提出了同塔双回直流线路的故障选线判据与方法;最后利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,建立实际±500 kV 同塔双回直流输电系统仿真模型,验证了所提故障选线方法的正确性。

### 1 同塔双回直流线路的解耦方法

同塔双回直流线路可视为不换位平行四线系统,对其进行解耦,可参考同塔四回交流输电线路的解耦方法<sup>[10]</sup>:将同塔双回直流线的布置形式近似为如图 1 所示的长方形布置,则可得平行四线系统的相模变换矩阵,即双回双极线路的解耦方程。

$$\begin{bmatrix} \Delta u_e(t) \\ \Delta u_f(t) \\ \Delta u_g(t) \\ \Delta u_h(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{1P}(t) \\ \Delta u_{1N}(t) \\ \Delta u_{2P}(t) \\ \Delta u_{2N}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\Delta u_x(t) = u_x(t) - u_{x,0}$  表示线路始端或末端的电压突变量,为故障后电压减去故障前的电压值;下标 1P、1N 和 2P、2N 分别表示 I 回线正极、负极和 II 回线正极、负极。

式(1)可将各极线的瞬时电压突变量分解为 4 个独立的模分量,其中一个为四线同向叠加与大地构成回路的地模分量即同向量,称为  $e$  模量;另外三个为四线互为回路的线模分量即环流量,分别称为  $f$ 、 $g$ 、 $h$  模量。



图 1 双回直流极线排布

Fig. 1 Arrangement of double-circuit HVDC lines

## 2 同塔双回直流线路的故障特征分析

### 2.1 单极线故障的电压突变量特征

设直流极线发生接地故障时,其电压突变量为  $\Delta u_k$ ,则若 1P 线故障,由于故障电压从正值减小,则有  $\Delta u_k < 0$ ,可进一步表示为  $\Delta u_k = -\Delta u_F$ ,其中  $\Delta u_F > 0$  表示正的附加电压源;同理若 2P 线故障,有  $\Delta u_k = -\Delta u_F < 0$ ;而对于 1N 和 2N 的负极故障,则有  $\Delta u_k = \Delta u_F > 0$ 。

各故障极线上的突变电压均可在其余非故障极线上耦合出电压突变量,该分量的大小由故障极与非故障极间的耦合系数决定。然而,不同极线间实际的耦合系数并不相等,以实际同塔双回线路为例,不同极线相互间的耦合系数在 0.16~0.26 之间<sup>[16]</sup>。考虑到不同极线间耦合系数的差异不会对本文的故障特征造成影响,为了简化分析,可近似认为非故障极耦合量相等,记为  $k\Delta u_k$  ( $0 < k < 1$ )。

于是,利用式(1)可得单极线故障时各模量的故障特征,列于表 1。

表 1 单极线故障的故障特征

Table 1 Voltage variation characteristics of single line fault

故障极线	$\Delta u_e$	$\Delta u_f$		$\Delta u_g$		$\Delta u_h$		
	大小	极 性	大小	极 性	大小	极 性	大小	极 性
1P	$-(1+3k)\Delta u_F$	-	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$-(1-k)\Delta u_F$	-
1N	$(1+3k)\Delta u_F$	+	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$(1-k)\Delta u_F$	+
2P	$-(1+3k)\Delta u_F$	-	$(1-k)\Delta u_F$	+	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$(1-k)\Delta u_F$	+
2N	$(1+3k)\Delta u_F$	+	$(1-k)\Delta u_F$	+	$-(1-k)\Delta u_F$	-	$-(1-k)\Delta u_F$	-

由表 1 可见,当发生单极线故障时,各环流电压突变量大小相等,  $\Delta u_g$  的极性均为负值不能用于故障极线识别,而  $\Delta u_f$  和  $\Delta u_h$  的极性组合则可区分各种单极线故障类型。

### 2.2 双极线故障的电压突变量特征

若双极线同时发生接地故障,根据故障极线的不同,可分为异回同极性线故障、同回异极性线故障和异回异极性线故障三种类型。若为异回同极性线故障,两个故障极电压突变量都为  $\Delta u_k$ ,则非故障极耦合电压突变量为  $2k\Delta u_k$ ;若为异极性线路故障,则两个故障极电压突变量分别为  $\Delta u_F$  和  $-\Delta u_F$ ,非故障极耦合电压突变量为 0。由式(1)可得双极线故障的故障特征,列于表 2。

表 2 双极线故障的故障特征

Table 2 Voltage variation characteristics of two-line faults

故障极线	$\Delta u_e$		$\Delta u_f$		$\Delta u_g$		$\Delta u_h$	
	大小	极性	大小	极性	大小	极性	大小	极性
1P2P	$-2(1+2k)\Delta u_f$	-	0	0	$-2(1-2k)\Delta u_f$	-	0	0
1N2N	$2(1+2k)\Delta u_f$	+	0	0	$2(1-2k)\Delta u_f$	-	0	0
1P1N	0	0	$-2\Delta u_f$	-	$-2\Delta u_f$	-	0	0
2P2N	0	0	$2\Delta u_f$	+	$-2\Delta u_f$	-	0	0
1P2N	0	0	0	0	$-2\Delta u_f$	-	$-2\Delta u_f$	-
1N2P	0	0	0	0	$-2\Delta u_f$	-	$2\Delta u_f$	+

### 2.3 多极线故障的电压突变量特征

同理, 由式(1)可得故障极数大于等于 3 时的故障特征, 列于表 3。

表 3 三极线或四极线故障的故障特征

Table 3 Voltage variation characteristics of three-line or four-line faults

故障极线	$\Delta u_e$		$\Delta u_f$		$\Delta u_g$		$\Delta u_h$	
	大小	极性	大小	极性	大小	极性	大小	极性
1N2P2N	$(1+k)\Delta u_f$	+	$(1+k)\Delta u_f$	+	$-(3-k)\Delta u_f$	-	$(1+k)\Delta u_f$	+
1P2P2N	$-(1+k)\Delta u_f$	-	$(1+k)\Delta u_f$	+	$-(3-k)\Delta u_f$	-	$-(1+k)\Delta u_f$	-
1P1N2N	$(1+k)\Delta u_f$	+	$-(1+k)\Delta u_f$	-	$-(3-k)\Delta u_f$	-	$-(1+k)\Delta u_f$	-
1P1N2P	$-(1+k)\Delta u_f$	-	$-(1+k)\Delta u_f$	-	$-(3-k)\Delta u_f$	-	$(1+k)\Delta u_f$	+
N2P2N	0	0	0	0	$-4\Delta u_f$	-	0	0

由表 1~表 3 可发现, 任一种故障发生,  $g$  模量电压突变量极性都为负。而对比表 3 和表 1, 可发现单极线故障与三极线故障具有相同的环流电压突变量极性组合特性, 因此, 仅依靠环流电压突变量极性特征无法区分单极线故障与三极线故障。例如 1P 故障和 1P1N2N 故障时, 各环流电压突变量极性相同。此时, 可以利用三极线故障与单极线故障环流电压突变量的幅值大小特征差异: 单极线故障时, 各环流电压突变量大小相等; 而三极线故障时  $g$  模量要远大于其他模量电压突变量。

## 3 基于模量电压突变量的故障选线方法

### 3.1 故障类型识别

根据上述同塔双回双极直流输电线路在各种故障类型下的故障特征分析, 可基于同向和环流电压突变量, 构成同塔双回直流输电线路的故障选线判据与逻辑。首先, 为了判定故障类型, 定义以下三个判据:

$$|\Delta u_s| > \Delta u_{act}, \forall S \in f, g, h \quad (2)$$

式中,  $\Delta u_{act}$  为环流电压突变量起动定值, 取正常运行时环流电压突变量的最大值。

$$\begin{cases} |\Delta u_f(t)| > K \Delta u_{Max} \\ |\Delta u_g(t)| > K \Delta u_{Max} \\ |\Delta u_h(t)| > K \Delta u_{Max} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Delta u_{Max} = \max(|\Delta u_f|, |\Delta u_g|, |\Delta u_h|)$ , 为环流电压突变量绝对值的最大值;  $K$  为比率系数, 取  $0.5 < K < 1$ , 本文  $K$  取 0.8。

$$\begin{cases} |\Delta u_f| > \Delta u_{Zero} \\ |\Delta u_g| > \Delta u_{Zero} \\ |\Delta u_h| > \Delta u_{Zero} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\Delta u_{Zero} = 0.1 \Delta u_{Max}$ , 为判断是否存在环流电压突变量的阈值。

上述三个判据中, 式(2)为基于环流电压突变量的起动判据, 若  $f$ 、 $g$  和  $h$  模量任意一个满足则起动选线; 式(3)可用于判断各环流电压突变量  $|\Delta u_f|$ 、 $|\Delta u_g|$  和  $|\Delta u_h|$  大小是否相等, 以体现三极线故障与单极线故障环流电压突变量幅值大小特征的差异, 若满足该式则可判定为单极线故障; 式(4)则用于判断各环流电压突变量是否都非零, 若满足该式则判定为三极线故障, 否则为双极线路或四极线故障。于是, 可得故障类型的判定逻辑如图 2 所示。

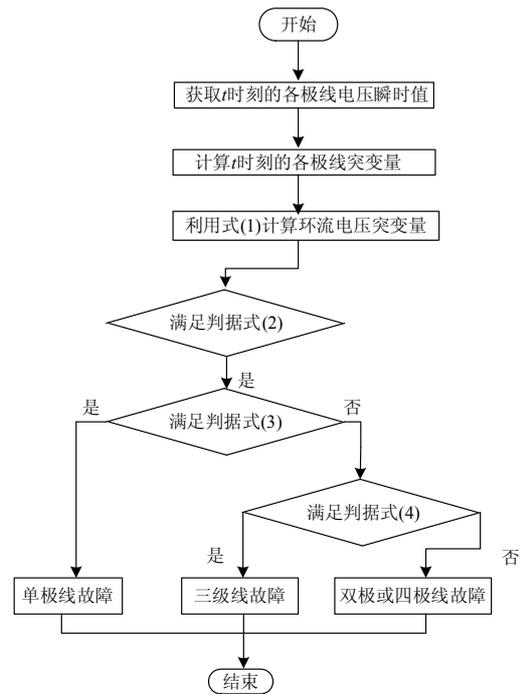


图 2 同塔双回直流输电线路故障类型判定流程图

Fig. 2 Flow chart of fault type determination of double-circuit HVDC transmission lines

### 3.2 故障极线的判别

在判定故障类型后, 根据不同的故障类型, 采用不同故障类型的故障极线判定方法。对于单极线故障类型, 根据表 1 所示的环流电压突变量极性特征, 可根据  $\Delta u_f$  和  $\Delta u_h$  的极性判定故障极线, 其故障选线方法的流程图如图 3 所示。三极线故障的故障选线方法类似于单极线故障情况, 其流程图如图 4 所示。

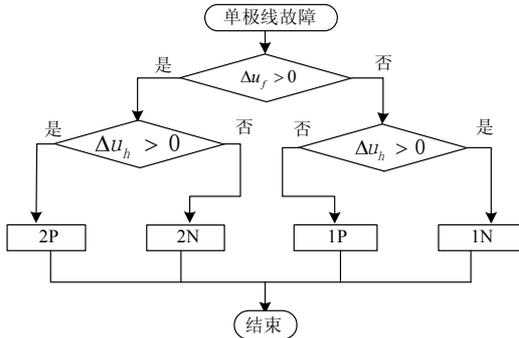


图 3 单极线故障的故障选线流程图

Fig. 3 Flow chart of fault line selection of single line fault

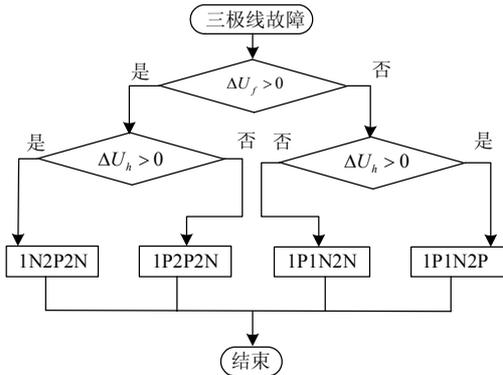


图 4 三极线故障的故障选线流程图

Fig. 4 Flow chart of fault line selection of three-line faults

对于双极线故障或四极线故障的故障极线判定, 就是需要判定异回同极性、同回异极性和异回异极性以及四极线同时故障 4 种情况。由表 2 和表 3 知, 可根据  $|\Delta u_e|$ 、 $|\Delta u_f|$  和  $|\Delta u_h|$  的大小分别判定  $e$ 、 $f$  和  $h$  模量的电压突变量是否存在, 进而来区分上述 4 种故障情况; 然后分别利用  $e$ 、 $f$  和  $h$  模量的电压突变量极性对故障极线进行判定。双极线或四极线故障的故障选线流程图如图 5 所示。

由于同向量的传播波速低于环流量, 即同向电压突变量的检测时刻滞后于环流电压突变量。而本文所提故障选线方法仅在 1P2P、1N2N 和 1P1N2P2N 三种故障情况下需要利用同向  $e$  模量进行判别, 其余故障情况仅需采用环流模量。所以, 在故障选线过程中, 先不计算同向电压突变量, 若可判定故障

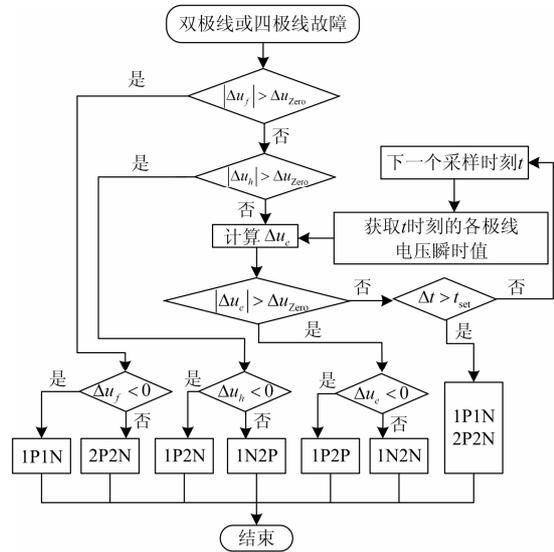


图 5 双极线或四极线故障的故障选线流程图

Fig. 5 Flow chart of fault line selection of two-line or four-line faults

极线, 则可输出故障选线结果; 若判定过程中需要同向分量, 则在设定的延时  $t_{set}$  内, 更新各极线电压并计算同向电压突变量, 如图 5 所示延时  $t_{set} = length / (v_f - v_e)$ ,  $length$  为线路长度。

### 4 仿真分析与验证

采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 参考溪洛渡-广东直流工程的实际参数, 构建  $\pm 500$  kV 同塔双回直流输电系统模型, 如图 6 所示; 同塔双回直流输电线路全长 1 286 km<sup>[17]</sup>, 其结构如图 7 所示, 采用了频变参数模型。仿真中, 分别在线路整流侧始端、逆变侧末端及线路中点处设置接地故障, 故障类型包括单极线、双极线等 15 种情况, 故障过渡电阻考虑了金属性接地和高阻接地故障 (500  $\Omega$ ); 采样频率为 10 kHz。

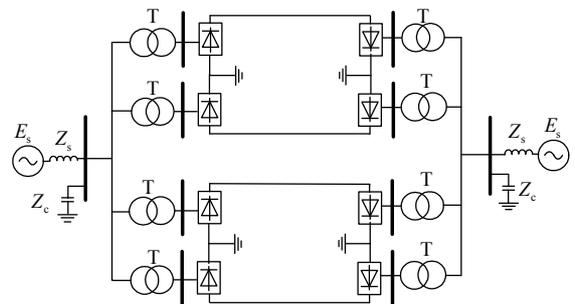


图 6 同塔双回直流输电系统模型

Fig. 6 Double-circuit HVDC transmission system model

表 4 各种情况下的故障选线仿真结果  
Table 4 Results of simulation under different grounding faults

(单位: kV)

故障极	故障位置	金属性故障				结果	高阻接地(500Ω)				
		e	f	g	h		e	f	g	h	结果
1P	始端		-590.7	-573.7	-614.8	1P	-117.7	-97.6	-123.3	1P	
	中点		-464.1	-488.7	-485.7	1P	-116.6	-135.9	-122.2	1P	
	末端		-513.6	-526.7	-560.3	1P	-143.0	-156.8	-155.1	1P	
1N	始端		-590.6	-573.8	615.4	1N	-118.1	-98.2	123.5	1N	
	中点		-465.8	-490.3	489.4	1N	-116.6	-135.9	122.6	1N	
	末端		-518.3	-535.7	567.1	1N	-146.9	-161.6	159.1	1N	
2P	始端		590.7	-574.0	615.1	2P	118.3	-104.0	123.7	2P	
	中点		465.9	-491.8	487.6	2P	116.9	-136.1	122.6	2P	
	末端		515.7	-530.9	562.4	2P	143.0	-157.1	155.2	2P	
2N	始端		591.0	-573.7	-614.9	2N	118.0	-98.1	-123.6	2N	
	中点		467.8	-490.3	-487.5	2N	117.1	-135.2	-121.9	2N	
	末端		520.2	-535.8	-565.2	2N	146.9	-161.7	-159.1	2N	
1N	始端	945.7	-2 309.5	950.4	1N2P2N	127.7	-346.8	130.8	1N2P2N		
2P	中点	736.5	-1 806.0	779.0	1N2P2N	132.9	-377.7	143.4	1N2P2N		
2N	末端	674.9	-1 778.3	705.4	1N2P2N	155.4	-476.3	168.6	1N2P2N		
1P	始端	936.2	-2 283.7	-940.2	1P2P2N	129.1	-352.3	-130.6	1P2P2N		
2P	中点	739.7	-1 808.4	-768.8	1P2P2N	133.2	-384.4	-138.7	1P2P2N		
2N	末端	679.8	-1 763.8	-705.2	1P2P2N	158.0	-466.3	-170.4	1P2P2N		
1P	始端	-995.4	-2 396.5	-1 000.7	1P1N2N	-127.5	-346.2	-131.8	1P1N2N		
1N	中点	-736.3	-1 805.9	-770.2	1P1N2N	-133.2	-377.4	-138.5	1P1N2N		
2N	末端	-670.4	-1 774.6	-702.2	1P1N2N	-154.5	-475.4	-167.7	1P1N2N		
1P	始端	-940.6	-2 299.0	947.1	1P1N2P	-127.0	-345.3	131.5	1P1N2P		
1N	中点	-734.4	-1 804.0	775.9	1P1N2P	-132.1	-374.7	140.5	1P1N2P		
2P	末端	-675.1	-1 770.5	711.0	1P1N2P	-158.7	-473.2	172.6	1P1N2P		
1P 1N	始端	-1799.5	-1 788.9	0.5	1P1N	-245.3	-230.5	0.2	1P1N		
	中点	-1263.9	-1 282.9	4.8	1P1N	-250.8	-263.2	0.4	1P1N		
	末端	-1209.6	-1 238.9	5.2	1P1N	-303.0	-321.1	4.1	1P1N		
2P 2N	始端	1803.0	-1 790.8	0.0	2P2N	246.9	-230.5	0.0	2P2N		
	中点	1267.4	-1 291.3	0.3	2P2N	250.6	-267.7	0.2	2P2N		
	末端	1209.5	-1 238.3	-2.5	2P2N	301.7	-319.6	-3.9	2P2N		
1P 2N	始端	0.4	-1 696.7	-1 762.1	1P2N	0.9	-232.3	-254.4	1P2N		
	中点	2.2	-1 289.7	-1 323.9	1P2N	0.4	-266.8	-262.2	1P2N		
	末端	4.9	-1 214.2	-1 287.1	1P2N	4.4	-320.4	-326.8	1P2N		
1N 2P	始端	0.0	-1 640.8	1 707.0	1N2P	0.2	-229.2	253.5	1N2P		
	中点	0.9	-1 287.7	1 331.8	1N2P	0.8	-262.2	266.1	1N2P		
	末端	-2.0	-1 219.6	1 290.3	1N2P	-3.5	-326.6	330.6	1N2P		
1P 2P	始端	-1 555.6	0.5	-968.5	0.7	1P2P	-397.2	1.3	-215.1	1.3	1P2P
	中点	-923.6	1.7	-778.9	1.6	1P2P	-271.7	0.3	-239.1	0.2	1P2P
	末端	-515.5	2.1	-947.5	2.1	1P2P	-136.9	0.1	-293.7	0.1	1P2P
1N 2N	始端	1 558.4	0.4	-975.5	0.4	1N2N	397.8	-0.2	-216.9	-0.2	1N2N
	中点	925.1	1.8	-776.3	1.7	1N2N	272.0	0.3	-236.5	0.3	1N2N
	末端	517.1	1.9	-959.8	2.0	1N2N	139.6	0.1	-305.5	0.1	1N2N
1P1N 2P2N	始端	-12.9	0.8	-3 396.5	0.3	1P1N2P2N	1.8	1.0	-477.7	0.5	1P1N2P2N
	中点	9.5	1.3	-2 561.5	4.4	1P1N2P2N	2.7	0.5	-509.7	1.9	1P1N2P2N
	末端	-7.9	3.8	-2 307.6	4.3	1P1N2P2N	-2.0	0.7	-643.7	0.6	1P1N2P2N

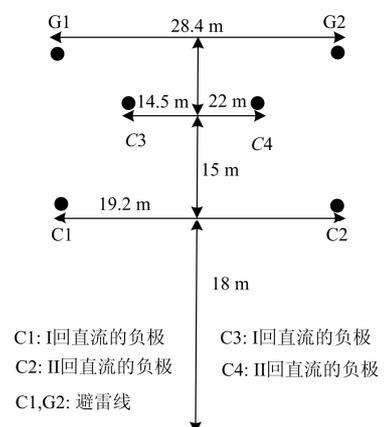


图 7 同塔双回直流输电线路模型

Fig. 7 Double-circuit HVDC transmission line model

通过获取整流侧 1P、1N、2P、2N 的电压瞬时值，计算各极线电压突变量并转换为同向与环流电压突变量，然后采用本文所提的故障选线方法判定故障极线。其中电压突变量幅值取为行波到达后 3 ms 内的电压变化量最大值。

表 4 给出了金属性接地故障和高阻接地故障时的选线结果。由表 1 可见，在各种故障情况下，各电压突变量所呈现出的极性和幅值大小特征与前面的理论分析基本一致。虽然由于实际耦合系数的不完全相等，造成实际计算的各电压突变量大小与理论分析有一点误差，但并不会对故障极线的判别造成任何影响；而对于高阻接地情况，尽管各电压突变量幅值变小了，但其相互间的特征关系依然不变。由此可见，本文所提故障选线方法准确可靠，且不受高阻接地故障的影响。

## 5 结论

本文基于平行四线系统解耦理论，分析了不同故障情况下同向和环流电压突变量特征，进而提出一种基于同向与环流电压突变量极性及幅值大小特征的同塔双回直流输电线路故障选线方法。应用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件对实际同塔双回直流输电系统模型进行大量仿真，结果表明该方法准确、有效且不受过渡电阻影响。

## 参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 李立程. 直流输电技术的发展及其在我国电网中的作用[J]. 电力设备, 2004, 5(11): 1-3.

LI Licheng. Development of HVDC transmission technology and its role in power network in China[J].

Electrical Equipment, 2004, 5(11): 1-3.

- [3] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [4] 朱韬析, 王超. 线路同杆并架技术在直流输电系统中应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 42-46.
- ZHU Taoxi, WANG Chao. Discussion on the double circuit lines used in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 42-46.
- [5] 张爱玲. 溪洛渡送广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
- ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.
- [6] 胡丹晖, 涂彩琪, 蒋伟, 等. 500 kV 同杆并架线路感应电压和电流的计算分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1927-1931.
- HU Danhui, TU Caiqi, JIANG Wei, et al. Calculation of inductive voltage and current for 500 kV double circuits transmission lines on single tower[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1927-1931.
- [7] 孙秋芹, 王冠, 李庆民, 等. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- SUN Qiuqin, WANG Guan, LI Qingmin, et al. Calculation and analysis of the coupling effects of the UHV double-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 737-742.
- [8] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生. 同杆双回线路感应电压和感应电流测量与计算[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 140-142.
- HAN Yanhua, HUANG Xiaomin, DU Qinsheng. Induced voltage and current on double circuits with same tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 140-142.
- [9] 邓孟华, 范春菊, 舒巧俊, 等. 同杆 4 回线故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 57-60.
- DENG Menghua, FAN Chunju, SHU Qiaojun, et al. Method for fault line selection of four jointed parallel lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 57-60.
- [10] 徐鹏, 王钢, 李海锋, 等. 基于环流量的同杆四回输电

- 线路故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 78-83, 118.
- XU Peng, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault line selection for four-parallel lines on same tower based on circulation currents[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 78-83, 118.
- [11] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 基于多重分形谱的高压直流输电线路区内外故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 251-258.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Recognition method of HVDC transmission line fault based on multifractal spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 251-258.
- [12] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
- YANG Fenyan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [13] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
- XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [14] 朱艺颖, 冯虎, 孙栩, 等. 单回 800 kV 直流线路与双回 500 kV 交流线路同塔架设的电磁暂态仿真研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 217-221.
- HU Yiyang, GUO Hu, SUN Xu, et al. Simulation study on electromagnetic transient of single circuit  $\pm 800$  kV DC Transmission line and double circuit of 500 kV AC transmission lines erected on same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 217-221.
- [15] 张民, 石岩. 同杆并架 $\pm 500$  kV 直流系统间相互影响的实时仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 44-49.
- ZHANG Min, SHI Yan. Real-time digital simulation analysis on interaction between two 1500 kV HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 44-49.
- [16] 武霁阳. 高压直流输电线路电磁耦合特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [17] 马文超, 吴新桥, 廖民传.  $\pm 500$  kV 同塔双回直流线路的极性布置[J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 58-60.
- MA Wenchao, WU Xinqiao, LIAO Minchuan. The polarity arrangement of  $\pm 500$  kV DC lines with double circuits on the same tower[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 58-60.

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-07-14

作者简介:

王海军(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压直流输电系统的运行、研究和管理;

周全(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压直流输电的运行、研究和管理; E-mail: zhouquan236@163.com

梁远升(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护。

(编辑 姜新丽)