

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181078

# 新能源集中接入开闭站经同塔双回线路送出 零序电流事故再现与分析

曹斌<sup>1</sup>, 原帅<sup>1</sup>, 苗丽芳<sup>1</sup>, 栗向鑫<sup>2,3</sup>

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;  
3. 国家电网华北电力调控分中心, 北京 100053)

**摘要:** 随着大规模新能源并入电网, 很多地区采用新能源集中接入开闭站, 再通过同塔双回输电线路送出的电网结构, 然而运行中存在零序保护动作、跳闸事故频发现象。以电网实际故障实例, 基于 PSCAD 软件, 针对大规模新能源集中接入开闭站经 220 kV 同塔双回输电线路送出的网架精确建模, 实现了电磁暂态故障再现仿真。深入分析了跳闸事故原因, 找出了零序电流来源, 并创新性地针对 220 kV 开闭站升压为 500 kV 电站后的电网零序电流进行对比分析, 提出了零序保护定值与升压改造的解决方案。该方案为上述新能源集中送出的电网结构零序电流的来源与防护提供了完好的措施, 为相关电网的设计、运行与保护定值设置提供了切实可行的方案。

**关键词:** 零序电流; 故障再现电磁暂态仿真; 同塔双回输电线路; 新能源汇集; 跳闸事故

## Analysis of zero sequence current accident of double circuit transmission lines on the same tower with large scale new energy integration to switch station

CAO Bin<sup>1</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>, MIAO Lifang<sup>1</sup>, LI Xiangxin<sup>2,3</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. North China Dispatching & Control Center Branch, State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

**Abstract:** As the massive new energy coming into the grid, the large-scale new energy centralized access to switching station in many districts, the structure of double-circuit transmission lines on the same tower is adopted. There are zero sequence protection actions in operation and frequent trip accidents. This paper takes the actual fault of the power grid as an example. Based on the PSCAD software, the network frame sent by 220 kV double-circuit transmission lines on the same tower of large-scale new energy centralized access to switching station is modeled accurately. The electromagnetic transient simulation of fault recurrence is realized. The causes of trip accidents are analyzed in depth. The source of zero-sequence current is found. In addition, it innovatively compares and analyzes the zero sequence current of the power grid after the 220 kV open-close station is boosted to 500 kV power station. The solution of zero sequence protection fixed value and boost transformation is proposed. A good measure is proposed for the source and protection of zero-sequence current in power grid structure sent by new energy, which provides a feasible scheme for the design, operation and protection setting of power grid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900105).

**Key words:** zero sequence current; electromagnetic transient simulation of fault recurrence; double-circuit transmission lines on the same tower; new energy collection; trip accident

## 0 引言

新能源场站接入 220 kV 开闭站再经过同塔双

回送出, 是利用超高压电网送出清洁能源之前典型的电网过渡结构。然而目前该电网结构在运行中存在以下典型问题<sup>[1-2]</sup>: 一方面, 新能源具有间歇性与扰动性<sup>[3-4]</sup>, 直接经过开闭站, 再通过 220 kV 很长线路送出, 系统存在过电压隐患; 另一方面, 同塔双

回线路存在静电、电磁耦合作用，因为结构原因导致三相线路参数不对称，进而使得流过线路零序电流升高，三相电流不平衡严重，线路零序电流越大，其三相电流不平衡度越大。综上，上述电网跳闸事故频发，严重影响电网的安全运行与供电可靠性。

文献[5-6]针对不同区域电网 220 kV 同塔双回线路存在的不平衡问题进行了计算，分析了影响同塔双回线路不平衡度的因素。文献[7-8]对超高压电网同塔双回线路不平衡电流进行了计算，分析了不平衡电流的主要来源。文献[9]对特高压同塔双回线路感应电压、潜供电流等进行了计算，并分析了不同换位方式对线路感应电压、潜供电流的抑制作用。文献[10]分析了架设耦合地线方式、相序、线路潮流等因素对特高压同塔双回线路不平衡度的影响。文献[11-16]等从理论上分析了塔型、线路长度、线路补偿、相序变换、不同输送功率、输送电压等对同塔双回线路不平衡的影响，同时提出了减小同塔双回线路不平衡度的方法。文献[17-22]等研究分析了故障条件下零序电流分布特性和对应零序保护定值设定策略。目前虽然对同塔双回线路不平衡问题的研究较多，但对于新能源接入开闭站再通过同塔双回送出的电网结构的不平衡问题分析却很少。本文结合电网实例，以解决零序电流来源分析与防护难题为创新点，基于 PSCAD/EMTDC 针对新能源接入开闭站再通过同塔双回线路送出的实际电网，

进行电磁暂态精细建模，进行电网故障再现的精准仿真，同时与故障录波数据对比，深入分析零序电流来源，提出整改措施，为电网运行排忧解难，为相关电网与工程的基建改造和调度运行提供可借鉴的经验，规避该类事故发生，具有很好的创新性与实用性。

## 1 同塔双回线路电流不平衡事故简介

### 1.1 新能源经开闭站再通过同塔双回线路送出的系统简介

新能源经开闭站再通过同塔双回线路送出的系统网架结构如图 1 所示。该地区风电场共计 26 个，总容量约为 3 000 MW，其中 13 个风电场直接接入 220 kV 甲开闭站，其余 13 个风电场通过丙、丁和戊三个 220 kV 变电站汇集到甲开闭站。目前 220 kV 甲开闭站通过甲乙双回线与乙站相连，线路采用同塔双回架设方式，全长 78.25 km，全线无换位。

2017 年该系统典型跳闸过程如下：甲乙 II 线跳闸前负荷电流为 1 760 A，11 时 19 分甲乙 II 线零序过流 IV 段动作，故障相别为 B 相，故障相电压为 57.92 V，故障零序电压( $3U_0$ )为 0.94 V，故障相电流 0.39 A，零序电流 0.05 A(零序 IV 段经方向闭锁控制字退，定值 0.05 A，时间定值 5 s，CT 变比为 4 000/1，线路对端的零序 IV 段定值 0.06 A)，三跳闭锁重合闸(线路重合闸方式为单相重合闸)。

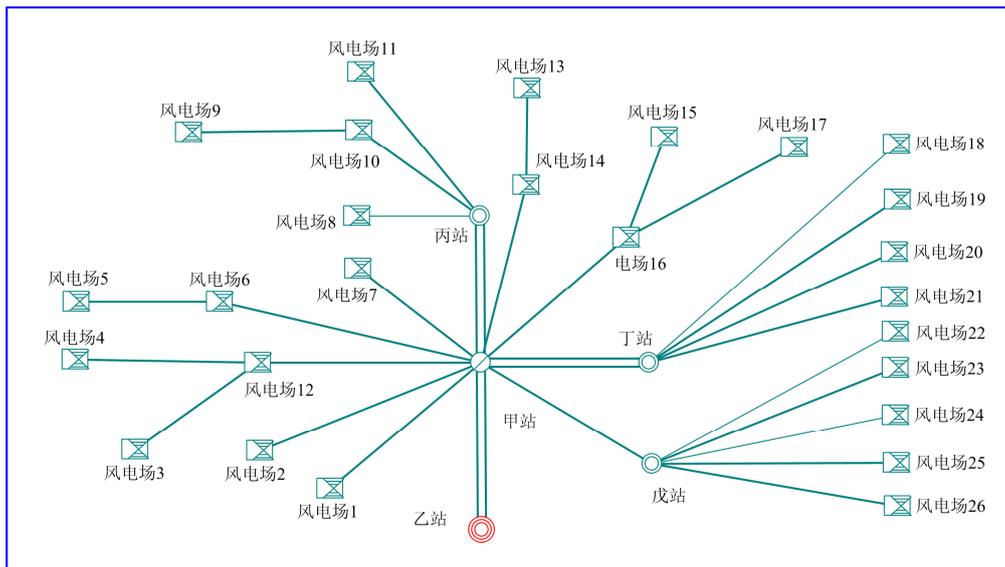


图 1 系统网架结构图

Fig. 1 Power system diagram

### 1.2 同塔双回线路电流不平衡录波数据

甲站和乙站录波数据分别如表 1 所示。此外，由该地区电网运行数据分析可知，甲乙

II 线在重负荷工况下其零序 IV 段保护容易动作，致使甲乙 II 线断路器跳闸。甲乙 II 线跳闸前，甲乙 I 线和甲乙 II 线零序电流分别为 164 A 和 260 A。

表 1 故障前后零序电流数值

Table 1 Zero sequence current values before and after the fault

场站	310	故障前	故障时	故障后
		20 ms/A	最大值/A	20 ms/A
甲站	甲站 I、II 母母联	0.049	0.099	0.021
	甲站—戊站 I 线	0.026	0.028	0.020
	甲站—丁站 I 线	0.032	0.032	0.025
	甲站—丁站 II 线	0.021	0.021	0.016
	甲站—风场 12 线	0.008	0.010	0.005
	甲站—风场 2 线	0.021	0.022	0.015
	甲站—风场 14 线	0.001	0.001	0.001
乙站	乙站 III、IV 母联	0.034	0.104	0.029
	甲乙 II 线	0.065	0.153	0.002
	甲乙 I 线	0.041	0.089	0.052

注: CT 变比为 4 000:1

## 2 系统零序电流分析仿真模型

### 2.1 甲乙同塔双回线路电磁暂态模型

甲乙同塔双回线导线型号为 4×JL/G1A-400/35, 全线无换位, 排列方式为垂直排列, 甲乙 I 回上中下排列依次为 B、A、C, 甲乙 II 回上中下排列依次为 B、C、A, 线路两侧均没有并联线路高抗, 且断路器无合闸电阻, 如图 2 所示。

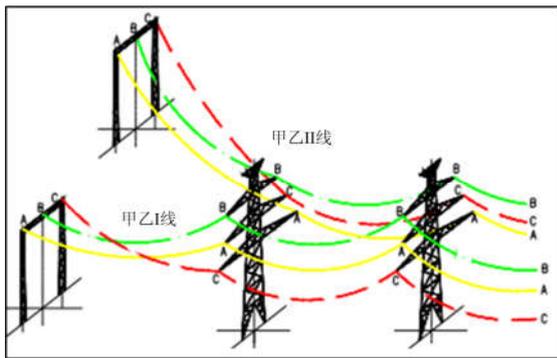


图 2 甲乙双回线相序示意图

Fig. 2 Phase sequence diagram of JiaYi lines

甲乙同塔双回线路代表塔型、导线参数如表 2 所示。导线直径、直流电阻率参数如表 3 所示。

表 2 甲乙 I(II)线导线参数

Table 2 Parameters of JiaYi I(II) line conductor

代表塔型	分裂导线半 径/cm	分裂导线间 距/mm	下相挂 线高 度/m	中相挂 线高 度/m	上相挂 线高 度/m
220SDJ-18	1.34	450	18.00	24.50	33.50
QHISZ1-36	1.34	450	31.64	42.44	54.64
QHISZCK-51	1.34	450	46.64	58.24	70.94
QHISZC2-45	1.34	450	40.64	52.24	64.94
QIVSZC2-36	1.34	450	31.64	43.24	55.94

表 2 续表

Table 2 Continued

弧垂/ m	I 线与 II 线 下相导线间 的水平 距离/m	I 线与 II 线 中相导线间 的水平 距离/m	I 线与 II 线 上相导线间 的水平 距离/m	I 线与 II 线 地线间的水平 距离/m
	3	17.0	15.0	17.0
8	18.4	22.0	17.8	22.6
8	20.6	24.2	19.4	24.2
8	19.4	23.0	18.6	23.0
8	19.4	23.0	18.6	23.0

表 3 甲乙双回线直流电阻率及直径

Table 3 DC resistivity and diameter of JiaYi double-circuit line

线路种类	线路型号	直流电阻/(Ω/km)	直径/ mm
导线	4×JL/G1A-400/35	0.073 9	26.80
	JLB40-150	0.295 2	15.75
架空地线	JLB40-120	0.360 6	14.25
	OPGW	0.325 0	15.50

根据上述甲乙同塔双回线路杆塔几何参数、导线参数及排列方式、地线参数基于 PSCAD/EMTDC 建立甲乙同塔双回线路的频率相关相域模型, 如图 3 和图 4 所示。

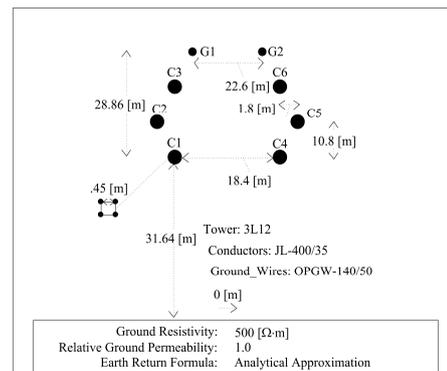


图 3 甲乙同塔双回线频率相关相域模型示意图

Fig. 3 Diagram of frequency dependent phase mode model of JiaYi double-circuit transmission lines on the same tower

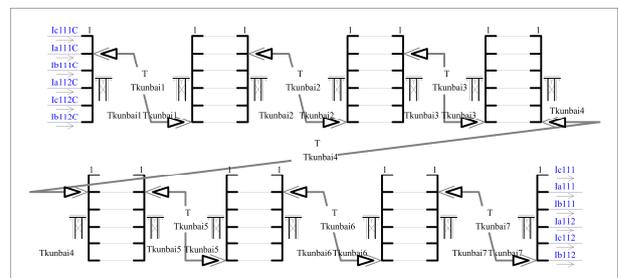


图 4 甲乙同塔双回线电磁暂态模型示意图

Fig. 4 Diagram of electromagnetic transient model of JiaYi double-circuit transmission lines on the same tower

## 2.2 系统等值模型

该地区电网结构等值示意图如图 5 所示, 以甲站和 500 kV 乙站为节点进行等值计算。

分别考虑甲站为 220 kV 开闭站和升压至 500 kV 运行两种情况。甲站为 220 kV 开闭站时站内无主变投运, 当甲开闭站升压为 500 kV 变电站后, 投运 4 台主变, 额定电压为 525/230±8×1.25%/36 kV, 根据该地区电网结构(图 1 所示), 以甲站和乙站为节点进行等值计算, 相应等值网络阻抗数据如表 4 所示。

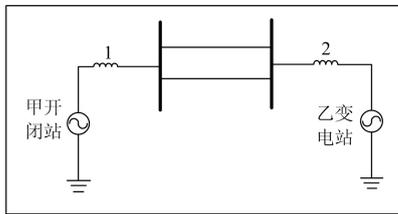


图 5 系统等值网络图

Fig. 5 Diagram of power system network

表 4 系统等值网络阻抗

Table 4 Power system network equivalent impedance

运行方式	等值节点序号	$R_1/\Omega$	$X_1/\Omega$	$R_0/\Omega$	$X_0/\Omega$
		220 kV 运行	1	1.618 2	23.999 7
	2	0.156 6	5.645 5	0.158 2	2.995 7
升压至 500 kV 运行	1	8.660 1	143.664 0	1.289 9	29.657 3
	2	0.647 7	11.353 0	1.656 5	11.915 3

## 3 甲乙同塔双回线电磁暂态仿真分析

基于上述甲乙同塔双回线路电磁暂态模型以及系统等值模型, 分别对甲乙双回线在 220 kV 降压运行以及升压到 500 kV 两种工况进行电磁暂态仿真计算。

### 3.1 甲乙双回 220 kV 降压运行电磁暂态仿真分析

甲乙同塔双回线路全长 78.25 km, 全程无换位, 存在三相不平衡现象, 在不同潮流条件下分别计算甲乙双回线路零序电流, 计算结果如表 5 所示。

表 5 220 kV 甲乙双回线路零序电流计算结果

Table 5 Zero sequence current values of 220 kV JiaYi lines

甲乙双回线路潮流/MW	线路零序电流/A	
	甲乙 I 线	甲乙 II 线
200	24.75	29.70
400	43.14	52.33
600	64.35	79.20
800	85.57	106.08
1 000	111.03	134.37
1 230	141.58	173.23
1 400	160.53	198.72

由表中数据可知, 甲乙双回线在 220 kV 运行条件下, 随着线路潮流的增加, 甲乙 I 线和甲乙 II 线零序电流均逐渐增大, 并且在相同潮流水平下甲乙 II 线零序电流高于甲乙 I 线零序电流。

此外, 由现场录波数据可知甲乙 II 线跳闸前线路负荷电流为 1 760 A, 调整甲乙双回线路潮流, 使得甲乙 II 线电流达到跳闸前的实际值 1 760 A, 此时甲乙双回线路对应有功率约为 1 230 MW。在甲乙双回线路潮流为 1 230 MW 条件下甲乙 II 线零序电流计算值为 173.23 A, 占实际零序电流的 66.63%。

综合考虑该地区最大负荷 1 400 MW 以及零序电流保护定值裕度, 则零序保护定值可设置为 320 A。

### 3.2 甲开闭站升压至 500 kV 后电磁暂态计算

为提高该地区新能源送出, 按照计划将 220 kV 甲开闭站和甲乙同塔双回线升压至 500 kV 运行, 同时 500 kV 甲变电站投入 4 台 750 MVA 主变, 主变高压侧中性点采用直接接地方式。基于 2.1 节中线路电磁暂态模型和 2.2 节中 500 kV 系统等值模型, 对甲开闭站升压至 500 kV 后进行电磁暂态计算分析。

甲乙同塔双回线路全长 78.25 km, 全程无换位, 存在三相不平衡现象, 升压至 500 kV 后在不同潮流条件下甲乙双回线路零序电流计算结果如表 6 所示。

表 6 500 kV 甲乙双回线路零序电流计算结果

Table 6 Zero sequence current values of 500 kV JiaYi lines

甲乙双回线路潮流/MW	线路零序电流/A	
	甲乙 I 线	甲乙 II 线
200	8.82	8.99
400	16.62	18.28
600	24.57	27.78
800	32.90	37.74
1 000	40.61	46.91
1 230	48.64	56.52
1 400	56.82	66.26
1 800	69.63	81.47
2 500	97.96	114.60
2 730	104.98	123.46

对比甲变电站升压前后甲乙双回线路零序电流计算结果可知, 甲乙双回线路在升压前后两种工况下, 随着线路潮流增加, 甲乙 I 线和甲乙 II 线零序电流均逐渐增大, 并且在相同潮流水平下甲乙 II 线零序电流高于甲乙 I 线零序电流。

甲乙双回线在 220 kV 条件下运行时, 甲乙线路零序电流相差约为 18%, 而升压到 500 kV 后, 甲乙线路零序电流相差约为 13%。此外, 甲乙双回线

升至 500 kV 甲乙输变电工程投运后, 同等潮流水平下, 甲乙双回线路零序电流较工程投运前降低约 60%。甲乙双回线升至 500 kV 后, 甲站投运 4 台 750 MVA 主变, 且高压侧中性点直接接地, 有效抑制了零序电流。

综合考虑该地区最大负荷 2 500 MW 和零序电流保护定值裕度, 则零序保护定值可设置为 190 A。

#### 4 甲乙双回线路电流不平衡影响因素分析

##### 4.1 甲乙双回线线路潮流对其零序电流影响分析

根据该地区电网及线路特点进行甲乙双回线电流不平衡影响因素分析, 首先考察甲乙同塔双回线路输送潮流对其零序电流的影响。系统等值参数如表 4 所示, 在系统等值和线路参数不变的条件下计算甲乙同塔双回线零序电流, 结果如图 6 所示, 随着线路潮流增加线路零序电流近似线性增大, 线路潮流在 200 MW 至 1 400 MW 范围内, 甲乙 I 线零序电流随着线路潮流的增加率约为 0.11 A/MW, 甲乙 II 线零序电流变化率约为 0.14 A/MW。

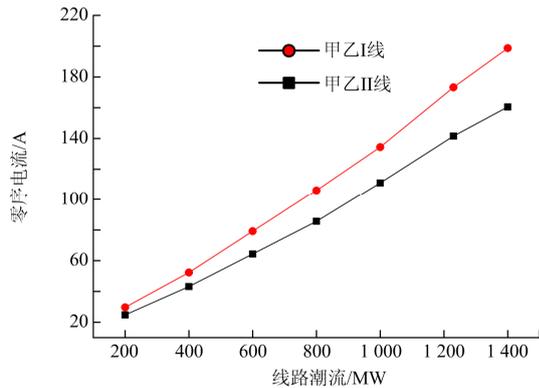


图 6 不同潮流水平下甲乙双回线路零序电流计算结果

Fig. 6 Calculating results of zero sequence current with different power flows of JiaYi lines

##### 4.2 甲乙双回线塔型对甲乙双回线零序电流影响分析

根据表 2 数据甲乙同塔双回线路主力塔型主要包含以下 5 种, 分别为: QIISZ1-36、220SDJ-18、QIVSZC2-36、QIISZC2-45、QIISZCK-51。将甲乙双回线路模型中的杆塔全部分别设置为上述 5 种塔型, 在系统等值数据和线路输送潮流相同的条件下计算甲乙双回线零序电流, 结果如图 7 所示。

由计算结果可知, 在相同条件下同塔双回线路分别使用 QIISZ1-36、220SDJ-18 以及 QIISZCK-51 三种杆塔时三者线路零序电流大小比较接近, 并且高于 QIVSZC2-36、QIISZC2-45 两种杆塔线路零序电流。

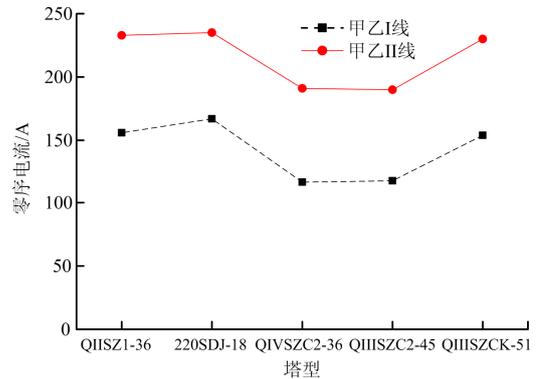


图 7 不同塔型甲乙双回线路零序电流计算结果

Fig. 7 Calculating results of zero sequence current with different tower types of JiaYi lines

##### 4.3 土壤电阻率对甲乙双回线零序电流影响分析

分别设置同塔双回线走廊土壤电阻率为 200  $\Omega\cdot\text{m}$ 、300  $\Omega\cdot\text{m}$ 、400  $\Omega\cdot\text{m}$ 、500  $\Omega\cdot\text{m}$ 、600  $\Omega\cdot\text{m}$ 、700  $\Omega\cdot\text{m}$ 、800  $\Omega\cdot\text{m}$ 、900  $\Omega\cdot\text{m}$ , 同时保证其他条件相同情况下, 计算甲乙双回线零序电流, 结果如表 7 所示。

表 7 不同土壤电阻率条件下同塔双回线路零序电流结果

Table 7 Calculating results of zero sequence current

with different soil resistivity		
土壤电阻率/( $\Omega\cdot\text{m}$ )	甲乙 I 线零序电流/A	甲乙 II 线零序电流/A
200	119.0	189.0
300	118.6	190.1
400	118.1	190.6
500	117.7	190.9
600	117.5	191.1
700	117.3	191.3
800	117.1	191.4

由计算结果可知, 土壤电阻率对同塔双回线路零序电流影响很小, 基本可以忽略。

##### 4.4 甲乙同塔双回线相序对其零序电流影响分析

按照排列组合原理, 同塔双回线路相序包含以下 6 种, 同相序 1 种, 逆相序 1 种, 异相序 4 种, 对应序号如表 8 所示。在其余条件保持不变条件下, 分别计算 6 种相序情况下同塔双回线路零序电流, 结果如图 8 所示。

表 8 同塔双回线路相序排列方式

Table 8 Phase arrangements of double-circuit transmission lines on the same tower

序号	相序名称	甲乙 I 线相序	甲乙 II 线相序
1	同相序	BAC	BAC
2	异相序	BAC	BCA
3	异相序	BAC	ABC
4	异相序	BAC	ACB
5	异相序	BAC	CBA
6	逆相序	BAC	CAB

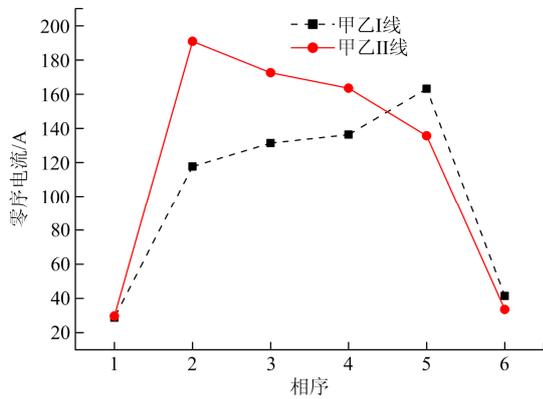


图 8 不同相序条件下甲乙双回线路零序电流计算结果  
Fig. 8 Calculating results of zero sequence current of JiaYi lines with different phase sequences

由计算结果可知，甲乙同塔双回线路采用异相序时其线路零序电流比同相序或逆相序两种情况严重，甲乙双回线采用异相序时其线路零序电流大约是同相序或逆相序线路零序电流的 4 倍。此外，甲乙同塔双回线路采用同相序时其零序电流最小。

#### 4.5 甲乙同塔双回线不同换位方式对其零序电流影响分析

由 4.4 节计算结果可知，甲乙同塔双回线路采用同相序时其线路零序电流最小，因此接下来在考察甲乙双回线路不同换位方式对其零序电流影响的过程中，保证换位前后甲乙双回线为同相序或者逆相序。首先考察甲乙双回线进行一次换位的情况，换位方式包含以下 3 种：TT1 换位方式表示换位前后甲乙双回线两段均为同相序；NN1 换位方式表示换位前后甲乙双回线两段均为逆相序；NY1 换位方式表示换位前甲乙双回线为逆相序，换位后为异相序。3 种换位方式如图 9 所示。

不同换位方式下甲乙双回线零序电流计算结果如图 10 所示。由计算结果可知，甲乙同塔双回线采用 TT1 换位方式时其线路零序电流最小，甲乙 I 线和甲乙 II 线零序电流分别为 14.67 A 和 15.04 A；而甲乙双回线路不换位时(见 4.4 节第一种情况)甲乙 I 线和甲乙 II 线零序电流分别为 28.75 A 和 29.63 A，显然甲乙同塔双回线进行一次换位后其线路零序电流明显下降。另外甲乙同塔双回线为 NY1 换位方式时其零序电流最大，分别为 53.8 A 和 90.4 A。由于 NY1 换位方式在换位前甲乙双回线为逆相序，换位后为异相序，而由 4.4 节中计算结果可知异相序条件下线路零序电流较大，因此 NY1 换位方式下甲乙线路零序电流比其余两种换位方式大。

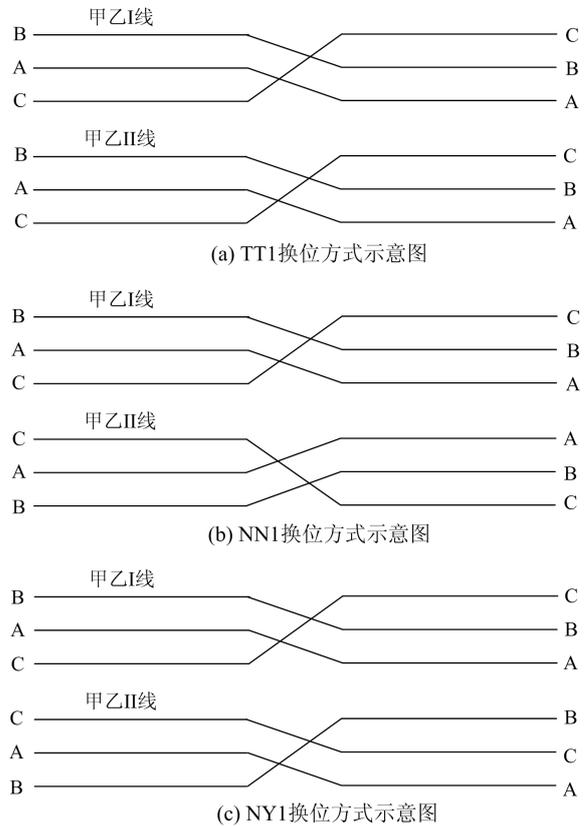


图 9 不同换位方式示意图(一次换位)

Fig. 9 Diagram of different transpositions (one transposition)

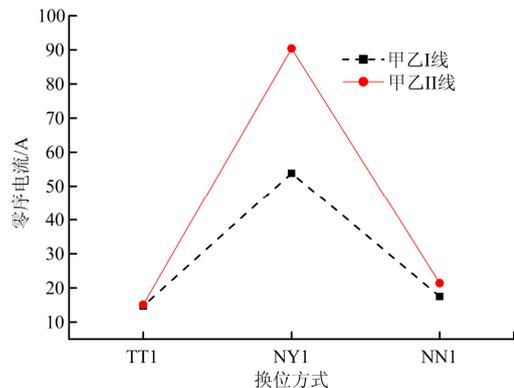


图 10 不同换位方式下甲乙双回线路零序电流计算结果(一次换位)

Fig. 10 Calculating results of zero sequence current of JiaYi lines with different transpositions (one transposition)

下面考察甲乙双回线进行两次换位对其线路零序电流的影响。考察甲乙双回线路两次换位方式对其零序电流影响的过程中，保证换位前后甲乙双回线各段均为同相序。甲乙双回线进行两次换位包含以下两种换位方式：TT2 表示换位前后甲乙双回线

三段均为同相序; NN2 表示换位前后甲乙双回线三段均为逆相序。两种换位方式如图 11 所示。

不同换位方式下甲乙双回线零序电流计算结果如图 12 所示。由计算结果可知, 甲乙双回线为同相序或者逆相序换位两次后线路零序电流降到 1 A 左右, 基本消除了甲乙双回线路参数不平衡。因此对于甲乙同塔双回线路, 采用同相序且换位两次时其线路零序电流最小。

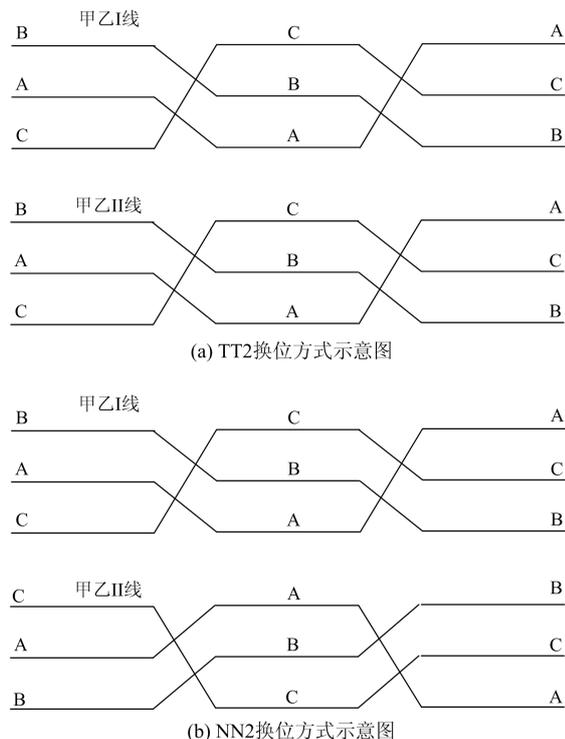


图 11 不同换位方式示意图(两次换位)

Fig. 11 Diagram of different transpositions (two transpositions)

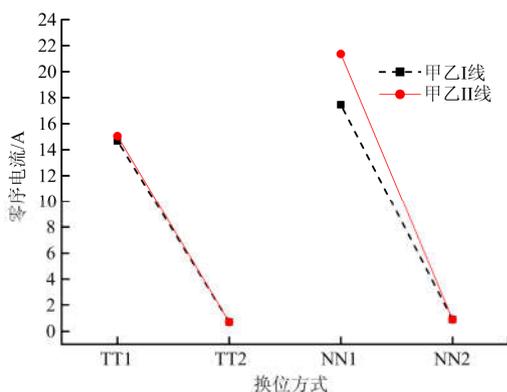


图 12 不同换位方式下甲乙双回线路零序电流计算结果(两次换位)

Fig. 12 Calculating results of zero sequence current of JiaYi lines with different transpositions (two transpositions)

#### 4.6 甲站主变投运后对甲乙双回线零序电流影响分析

考察甲站主变投运后对甲乙同塔双回线路零序电流的影响。甲站主变不投运系统等值参数按照表 4 设置, 调整甲乙双回线潮流为 1 200 MW, 线路电流为 1 700 A; 甲站主变投运后系统等值如表 4 所示, 调整甲乙双回线路潮流使得甲乙线路电流为 1 700 A, 该条件下线路潮流为 2 730 MW。两种情况下线路零序电流计算结果如图 13 所示, 由计算结果可知, 甲站主变投运后甲乙双回线零序电流降低约 20%。

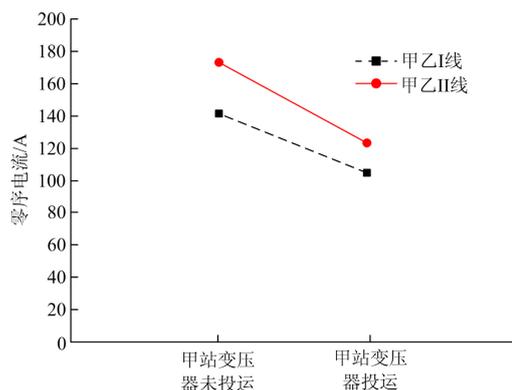


图 13 甲站主变投运对甲乙同塔双回线路零序电流计算结果

Fig. 13 Calculating results of zero sequence current with influence of transformers running of Jia substation

## 5 结论

本文以内蒙古电网新能源集中接入开闭站再通过同塔双回输电线路送出的典型电网结构为基础, 建立了某地区甲乙同塔双回线路电磁暂态模型。进行了故障复现仿真, 在此基础上分析了跳闸事故原因, 同时研究分析了杆塔塔型、相序、换位方式、线路潮流、主变投运以及土壤电阻率等因素对甲乙线路零序电流的影响, 主要得出以下结论:

1) 通过仿真分析, 甲乙同塔双回线路不换位、长距离输送、潮流大以及甲站为 220 kV 开闭站, 目前无主变中性点接地等因素造成甲乙双回线路电流不平衡, 产生较大的零序电流。

2) 甲乙双回线路潮流为 1 230 MW 时, 计算可得甲乙 II 线零序电流为 173 A, 占保护实测的零序电流的 67%。建议甲乙双回线 220 kV 降压运行时, 零序 IV 段定值不低于 320 A; 甲乙双回线升压到 500 kV 后, 零序 IV 段定值不低于 190 A。

3) 220 kV 甲乙双回线升压到 500 kV 运行, 500 kV 甲变电站 4 台主变全部投运后, 同等潮流水平下, 甲乙双回线路零序电流较工程投运前降低约 60%, 同等电流水平下, 甲乙双回线路零序电流较工程投

运前降低约 20%，甲乙双回线路升压至 500 kV 后不平衡电流明显改善。

4) 对比分析了甲乙同塔双回线路零序电流影响因素: a. 甲站在 220 kV 运行条件下, 线路潮流在 200 MW 至 1 400 MW 范围内, 随着潮流的变化甲乙 I 线零序电流的增加率约为 0.11 A/MW, 甲乙 II 线零序电流变化率约为 0.14/MW; b. 在甲乙双回线所有类型主力杆塔中, 由 QIVSZC2-36 和 QIIISZC2-45 两种型号杆塔引起的线路参数不平衡程度最小; c. 对于当前甲乙双回线杆塔塔型, 当甲乙双回线采用异相序时线路零序电流最大, 约为同相序或逆相序条件下零序电流的 4 倍, 且甲乙双回线采用同相序时其零序电流最小; d. 在同相序条件下, 甲乙双回线进行一次换位后线路零序电流下降约 50%, 甲乙双回线进行两次换位后线路零序电流几乎为零, 线路参数不平衡基本消除; e. 土壤电阻率对甲乙同塔双回线路零序电流影响很小。

参考文献

[1] 蓝磊, 艾绍贵, 黄永宁, 等. 宁夏北部 220 kV 电网不平衡电流的计算与分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 488-494.

LAN Lei, AI Shaogui, HUANG Yongning, et al. Calculation and analysis of unbalanced currents in Ningxia Northern 220 kV Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 488-494.

[2] 王海军, 周全, 梁远升, 等. 基于电压突变量的同塔双回直流输电线路故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 23-29.

WANG Haijun, ZHOU Quan, LIANG Yuansheng, et al. Fault line selection of double-circuit HVDC transmission line based on voltage variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 23-29.

[3] 徐海洋, 黄兴华, 王婷, 等. 同塔双回线零序电压补偿分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 86-92.

XU Haiyang, HUANG Xinghua, WANG Ting, et al. Analysis of zero-sequence voltage compensation in double-circuit transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 86-92.

[4] 王思明, 牛玉刚, 方磊, 等. 考虑新能源出力不确定性的微网社区双阶段调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 89-98.

WANG Siming, NIU Yugang, FANG Lei, et al. Dual stage scheduling strategy for microgrid community considering uncertainty of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 89-98.

[5] 李现宝, 何信林. 区域 220 kV 同塔双回线路不对称问

题的研究分析[J]. 电气技术, 2017(4): 75-83.

LI Xianbao, HE Xinlin. Research and solution making of the asymmetry problem of double circuit lines on the same tower in the regional 220 kV power grid[J]. Electrical Technology, 2017(4): 75-83.

[6] 徐敏, 吴成, 罗燎, 等. 江西 220 kV 同塔双回不换位线路不平衡度研究[J]. 科学技术与程, 2017, 17(3): 231-235.

XU Min, WU Cheng, LUO Liao, et al. Research for un-transposed 220 kV double-circuit lines on the same tower in Jiangxi[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 231-235.

[7] 郭志红, 程慈源, 苏建军, 等. 山东电网部分 500 kV 线路不平衡电流偏大的原因分析及改善措施[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 32-36.

GUO Zhihong, CHENG Ciyuan, SU Jianjun, et al. Analysis on oversize unbalance currents in part of 500 kV transmission lines of Shandong Power Grid and corresponding improvement measures[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 32-36.

[8] 李健, 谢帮华, 文武, 等. 750 kV 同塔双回输电线路电气不平衡度及换位研究[J]. 电力建设, 2007, 28(6): 27-29.

LI Jian, XIE Banghua, WEN Wu, et al. Study on electric imbalance and transposition of 750 kV tower double-circuit transmission line[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(6): 27-29.

[9] 王晓彤, 班连庚, 项祖涛, 等. 换位形式对 1 000 kV 同塔双回线路感应电压和电流的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 37-44.

WANG Xiaotong, BAN Liangeng, XIANG Zutao, et al. Influence of transposing form on induced voltage and current in 1 000 kV double-circuit transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 37-44.

[10] 张龙伟, 吴广宁, 朱军, 等. 耦合因素对特高压交流同塔双回线路不平衡度的影响分析及相序优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 124-128.

ZHANG Longwei, WU Guangning, ZHU Jun, et al. Influences of coupling factors on imbalance of dual UHVAC transmission lines installed on same tower and optimization of phase sequence arrangement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 124-128.

[11] 丁洪发, 段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 24-28.

DING Hongfa, DUAN Xianzhong. Unbalance issue caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 24-28.

[12] 朱军, 吴广宁, 张龙伟, 等. 非全线并行架设的共用走

- 廊高压输电线路电气不平衡度及其影响因素分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3942-3952.
- ZHU Jun, WU Guangning, ZHANG Longwei, et al. Analysis of electrical unbalance degree and its influence factors of multi-circuit transmission lines with partially parallel erection in right-of-way[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3942-3952.
- [13] 邹林, 林福昌, 龙兆芝, 等. 输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 283-286.
- ZOU Lin, LIN Fuchang, LONG Zhaozhi, et al. Influence factors analysis of unbalance parameter for overhead lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 283-286.
- [14] 唐明, 张纯, 丁理杰, 等. 同塔双回输电线路电流不平衡机理分析[J]. 四川电力技术, 2015, 38(5): 29-32.
- TANG Ming, ZHANG Chun, DING Lijie, et al. Analysis on current unbalance mechanism of double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2015, 38(5): 29-32.
- [15] 张斌, 陈水明, 庄池杰, 等. 同塔双回输电线路电气不平衡度的改善措施[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3484-3489.
- ZHANG Bin, CHEN Shuiming, ZHUANG Chijie, et al. Improvement measures for electric unbalance of double-circuit transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3484-3489.
- [16] 陈兆雁, 徐昊亮, 田云飞, 等. 同塔双回线路不平衡电流及相序优化布置的研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 45-48.
- CHEN Zhaoyan, XU Haoliang, TIAN Yunfei, et al. Study on unbalanced current and optimization of phase sequence for double-circuit line on same tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 45-48.
- [17] LI Bin, GUO Fengrui, LI Xuebin, et al. Circulating unbalanced currents of EHV/UHV untransposed double-circuit lines and their influence on pilot protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(12): 825-833.
- [18] 姜宪国, 刘宇, 周泽昕, 等. 同塔双回线接地距离保护零序电流补偿系数分析及整定方法改进[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 9-14.
- JIANG Xianguo, LIU Yu, ZHOU Zexin, et al. Analysis of zero-sequence current compensation coefficient and improvement of setting method for grounding distance protection of dual-loop lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 9-14.
- [19] 曾耿晖, 蔡泽祥, 陈桥平, 等. 同塔双回线路接地故障零序电流分布特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 212-217.
- ZENG Genghui, CAI Zexiang, CHEN Qiaoping, et al. Analysis on zero sequence current distribution characteristic of grounding faults occurred in double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 212-217.
- [20] 陈文哲, 郝治国, 张保会, 等. 同塔双回线纵向故障特征分析及零序方向保护改进[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 133-139.
- CHEN Wenzhe, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Characteristic analysis on longitudinal fault of dual-circuit transmission line and improvement of zero-sequence directional protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 133-139.
- [21] 杨伟涛, 曾德辉, 汪隆君, 等. 逆变型分布式电源接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 162-168.
- YANG Weitao, ZENG Dehui, WANG Longjun, et al. Influence of inverter interfaced distributed generators on zero-sequence current protection for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 162-168.
- [22] 李爽, 田庆阳, 李鹏里, 等. 220 kV 变压器中性点接地方式对零序电压的影响[J]. 东北电力技术, 2014, 35(3): 31-33.
- LI Shuang, TIAN Qingyang, LI Pengli, et al. Impact of 220 kV transformer neutral point grounding modes on zero sequence voltage[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(3): 31-33.

收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2018-12-19

作者简介:

曹 斌(1981—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统过电压与绝缘配合以及新能源电力系统研究工作。E-mail: caobinbd@163.com

(编辑 葛艳娜)