

# A Fault Locator for Transmission Line Based on Artificial Intelligent Algorithm

Yu Zou

Qinzhou Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Qinzhou Guangxi  
Email: [zou\\_y.qzg@gx.csg.cn](mailto:zou_y.qzg@gx.csg.cn)

Received: Mar. 24<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 8<sup>th</sup>, 2016; published: Apr. 11<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Considering the transmission line with multi-branch, a dynamic fault location algorithm based on intelligent algorithm is presented in this paper. Based on the measured voltage and current at two terminals, a discrimination index is proposed by which the faulted section can be located first. After that the equivalent voltage and current at the branch node is obtained by the equivalent calculation of the healthy branches. It corrects the results of fault location method based on genetic algorithm by the way of neural network algorithm, with the ranging accuracy improved when there are faults at two terminals of transmission line. The proposed algorithm only demands the measured voltage and current on the two terminals, and inherits the advantages of fault location method based on genetic algorithm, which is independent of fault type, fault resistance at fault point, etc., the influence on ranging accuracy by line parameters deviation is greatly reduced. The proposed method is simulated by PSCAD, and the results verified the correctness and high precision of the algorithm.

## Keywords

Transmission Lines with Multi-Branch, The Principle of Superposition, Fault Location, Genetic Algorithm, Artificial Intelligence Algorithm

---

## 线路故障测距的人工智能算法研究

邹宇

广西电网有限责任公司钦州供电局, 广西 钦州  
Email: [zou\\_y.qzg@gx.csg.cn](mailto:zou_y.qzg@gx.csg.cn)

收稿日期：2016年3月24日；录用日期：2016年4月8日；发布日期：2016年4月11日

## 摘要

本文提出了一种基于智能算法的动态故障测距算法，用于带有多支路的输电线路故障测距。该算法通过测量输电线两侧的电流、电压值，得到相对应的判别指标，从而可预先识别出故障对应的区域；然后将非故障分支进行等效，得到合并后的电气量；再对故障处的分支应用基于遗传算法的双端测距法进行初步的测距，并利用神经网络算法对所得到的测距结果进行进一步的调整，提高了线路故障的测距精度。本文所提出的计算方法只需使用变电站故障后状态下所测得的电压和电流值，并继承了基于遗传算法的故障测距方法的优点，不受故障点位置与过渡电阻的影响，且减小了线路参数偏差对最后结果的影响。使用PSCAD对所提出的方法进行验证，结果表明所提出方法的正确性和高精度性。

## 关键词

多支路线路，叠加原理，故障测距，遗传算法，人工智能算法

## 1. 引言

植被生长、雷击、大风等自然现象以及人为的原因如缺乏检修维护、部件老化等等，都有可能增加线路故障的发生，从而导致停电以及系统安全性的降低[1]。电网的安全有赖于输电线路的可靠运行，因此如何更好的开展故障测距对于保证电网的安全稳定运行是十分重要的[2]。

为了减少故障造成的影响，需要快速对故障进行定位，一般使用的故障定位方法有两种。第一种是基于数学模型的方法，通过变电站测得的阻抗函数来确定故障点的距离，也称之为阻抗法；另一种方法是基于知识的分类方法，使用数据挖掘技术从故障数据库中进行学习，以帮助确定线路的故障段。而第一种方法由于其易于理解，方便推广得到了更多的应用。阻抗法通常还包括单端和双端测距算法，单端定位算法[3][4]属于早期的方法，其精度较低，因此更多使用的是双端测距算法[5]-[8]，该方法不受故障点位置与过渡电阻的影响，可达到很好的效果。

随着电力需求的增长，电网建设却无法满足不同需求，出现了很多小型用户直接接入输电线路的情况。因此T接线路的故障测距方法得到了广大科研人员的重视。文献[9]-[11]等提出了适用于T接线路的测距算法，但是都需要假设所测的各条线路的参数可测量。由于这种临时搭接的线路往往是暂时用于输电[12]，在工程应用上是不会增加测量装置的。因而文献[13][14]提出一种仅使用线路两侧的测量数据，开展故障测距的算法，但是依然只考虑了T接的情况。

文献[15]提出了一种使用双端PMU测量数据进行带有多条线路接入的线路的故障测距方法，实现了多条线路均可以计算相应的故障附加分量的正序量，然后根据所提出的判别指标，判断故障区域。通过将非故障分支进行等值变换，将多支路的传输线路故障定位转换成一般性的故障定位问题。

通常，线路参数对环境温度、湿度、地形等因素较为敏感，特别是线路的长度这一关键信息因环境的改变而不同，从而会影响到故障测距结果的精度，但是上述方法都无法计及这一影响，尤其是对需要多次判断的测距过程，这一影响尤为明显。文献[16]提出了基于遗传算法的输电线路故障测距方法，通过遗传算法的特性，在一个大概范围即可实现故障测距。但是在目前测量设备的采样率下，一定的误差是无法避免的，因此结果精度不高。文献[17]进一步对该方法进行了修正，使用混合智能算法修正了所得到的结果，进一步提高了结果的精度。

综上所述, 根据各种方法的利弊, 本文提出一种基于智能算法的动态故障测距算法, 用于带有多支路的输电线路故障测距。该算法通过测量输电线路两侧的电流、电压值, 得到相对应的判别指标, 从而可预先识别出故障对应的区域; 然后将非故障分支进行等效, 得到合并后的电气量; 再对故障处的分支应用基于遗传算法的双端测距法进行初步的测距。

## 2. 基于遗传算法的故障测距算法

遗传算法是一种模拟遗传机制的智能优化算法, 通过一系列的选择进化手段生成比上一代更优的优秀个体。

如图 1 所示的故障后的无支路的传输线路, 线路两端的正序电压、电流分量分别记为  $(V_{S1}, I_{S1})$ 、 $(V_{R1}, I_{R1})$ , 输电线路的故障测距算法判断为由两端测量结果计算得到的电压差最小, 因此可以看成是一种使电压差最小化的优化算法, 建立问题的优化模型, 有:

通过优化计算后可得故障点位置[16], 如式(1)~(3)所示:

$$D = \frac{\ln(N/M)}{2\gamma_1 L} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2} e^{-\gamma_1 L} (V_{S1} + Z_{C1} I_{S1}) - \frac{1}{2} (V_{R1} + Z_{C1} I_{R1}) \quad (2)$$

$$N = \frac{1}{2} (V_{R1} - Z_{C1} I_{R1}) - \frac{1}{2} e^{\gamma_1 L} (V_{S1} + Z_{C1} I_{S1}) \quad (3)$$

其中  $D$  为故障点  $F$  到线路  $R$  端占线路总长  $L$  的百分比;  $\gamma_1$ 、 $Z_{C1}$  为线路的正序传播系数、特征阻抗。

## 3. 多线路接入输电线路的故障测距算法

### 3.1. 输电线路的正序网络

当传输线路带有两条支路时, 如图 2 所示。图 2 中支路用  $B_1 T_1$ 、 $B_2 T_2$  来表示。

根据线性叠加原理和对称分量法, 可将故障电力网络等值为无故障网络与故障后的正序、负序和零序网。点  $F$  发生故障后, 其正序网络如图 3 所示。

其中  $(V_{S,\text{sup}}, I_{S,\text{sup}})$ 、 $(V_{R,\text{sup}}, I_{R,\text{sup}})$  为两侧的测量值的正序电压、电流分量,  $Z_{T_1}$ 、 $Z_{T_2}$  为两线路接入母线端的等效正序阻抗,  $D$ 、 $D_{\text{tap1}}$ 、 $D_{\text{tap2}}$  为故障点  $F$  及分支接点  $B_1$ 、 $B_2$  到  $R$  端的距离与整个输电线的百分比。

### 3.2. 故障区域的判断

根据式(1)可计算得到指标  $D$ , 但是由于分支的存在该结果必然是不正确的; 因此需要进一步进行判断。将输电线路改为集中参数模型, 如图 4 所示。

图 4 中, 有  $D_{\text{tap1}} = L_3/L$ ,  $D_{\text{tap2}} = (L_2 + L_3)/L$ 。

1) 当故障发生在支路  $B_2 R$  或线路接入点  $B_2 T_2$  时, 若  $D_1$  为故障点位置, 则满足  $D_1 \leq D_{\text{tap1}}$ 。

化简方程可得  $V_{S,\text{sup}}$ 、 $V_{R,\text{sup}}$  的表达式:

$$V_{S,\text{sup}} = V_F + L_1 Z_1 I_{S,\text{sup}} + L_2 Z_1 (I_{S,\text{sup}} + I_{T_1,\text{sup}}) + (L_3 - D_1 L) Z_1 (I_{S,\text{sup}} + I_{T_1,\text{sup}} + I_{T_2,\text{sup}}) \quad (4)$$

$$V_{R,\text{sup}} = V_F - D_1 L Z_1 I_{R,\text{sup}} \quad (5)$$

其中  $Z_1$  为线路单位正序阻抗。

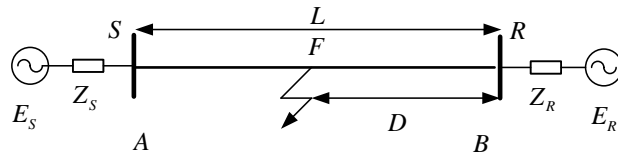


Figure 1. Transmission line without branch  
图 1. 无线路接入的传输线路

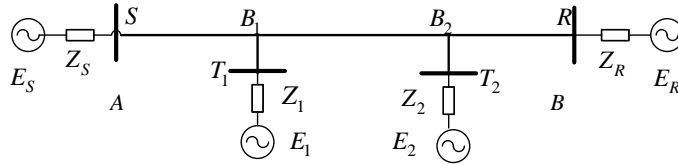


Figure 2. Transmission line with two branches  
图 2. 两支路传输线路

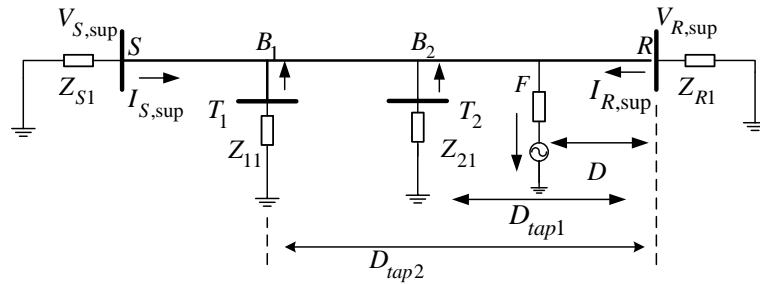


Figure 3. Positive sequence network after fault  
图 3. 故障后的正序网络

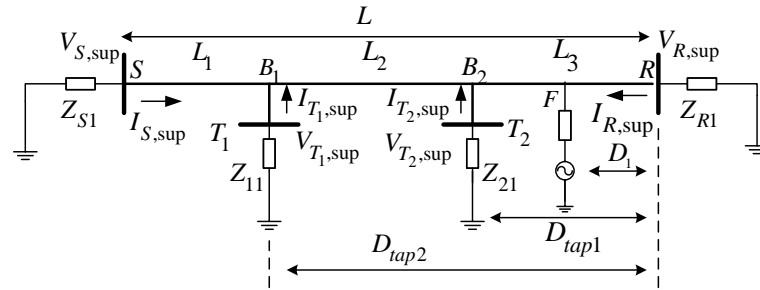


Figure 4. Lumped parameter model of positive sequence network after fault  
图 4. 故障后正序网络的集中参数模型

通过整理，我们可得：

$$\begin{aligned} &(D - D_1)I_{S,sup} + (D - D_1)I_{R,sup} \\ &+ (L_2 + L_3 - D_1L)I_{T_1,sup} + (L_3 - D_1L)I_{T_2,sup} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)两边均取实部，可得：

$$\text{Re}(D_1) - \text{Re}(D) = \text{Re}\left(\frac{k_1 I_{T_1,sup} + k_2 I_{T_2,sup}}{I_{S,sup} + I_{R,sup}}\right) \quad (7)$$

其中  $k_1 = (L_2 + L_3 - D_1L)/L > 0$ ， $k_2 = (L_3 - D_1L)/L \geq 0$ 。

假设系统阻抗  $Z_{S1}$ 、 $Z_{R1}$ 、 $Z_{T1}$ 、 $Z_{T2}$  及传输线路均是高感抗的(即  $R \ll X$ )，则  $I_{T1,\text{sup}}$ 、 $I_{T2,\text{sup}}$  与  $I_{S,\text{sup}}$ 、 $I_{R,\text{sup}}$  之间的相角度数差均小于  $90^\circ$ ，由此可得[15]：

$$\text{Re}(D) < \text{Re}(D_1) \leq \text{Re}(D_{\text{tap}1}) \quad (8)$$

2) 当故障发生在支路  $B_1B_2$  时，实际故障点  $D_1$  满足， $D_{\text{tap}1} < D_1 < D_{\text{tap}2}$   
同理上述方法可得到下式：

$$\text{Re}(D_1) - \text{Re}(D) = \text{Re}\left(\frac{k_1 I_{T1,\text{sup}} + k_2 I_{T2,\text{sup}}}{I_{S,\text{sup}} + I_{R,\text{sup}}}\right) \quad (9)$$

此时  $k_1 = L_2 + L_3 - D_1 L > 0$ ， $k_2 = L_3 - D_1 L < 0$ 。

因此  $\text{Re}\left(\frac{k_1 I_{T1,\text{sup}} + k_2 I_{T2,\text{sup}}}{I_{S,\text{sup}} + I_{R,\text{sup}}}\right)$  正负无法判断，即无法确定  $\text{Re}(D)$  与  $\text{Re}(D_{\text{tap}1})$ 、 $\text{Re}(D_{\text{tap}2})$  是什么顺序。

3) 当故障在支路  $SB_1$  或分支  $B_1T_1$  中时，与(1)同样，可得： $\text{Re}(D) > \text{Re}(D_1) \geq \text{Re}(D_{\text{tap}2})$ 。  
综合 1)、2)、3)所述，虽然不能直接得到最终的故障位置，但是缩小了故障判定区域。

### 3.3. 故障分支的判断

假设故障在  $B_1R$  上发生，则支路  $SB_1$  和  $B_1T_1$  上是非故障线路，可以将其进行合并[15]，得到新分支点  $S'$  及  $(V_{S',\text{sup}}, I_{S',\text{sup}})$ ，如图 5 所示，原模型被划为了一个 T 接线路。

再次根据 3.2 节的原则进行判断，可得：

- 1)  $\text{Re}(D_1) < D_{\text{tap}}$  故障位于  $B_2R$
- 2)  $\text{Re}(D_1) = D_{\text{tap}}$  故障位于  $B_2T_2$
- 3)  $\text{Re}(D_1) > D_{\text{tap}}$  故障位于  $S'B_2$

同理若故障位于区域  $SB_2$  时的支路判断指标  $D_2$  与界限  $D_{2\text{tap}}$ 。如果排除了上述两种情况，则故障一定位于支路  $B_1B_2$ 。

### 3.4. 多线路接入输电线路的故障测距算法的流程

在确知故障所在范围后，我们就可以进一步将原线路模型化简，并进行测距。假设故障在支路  $B_2R$  上，首先将非故障支路  $SB_1$ 、分支  $B_1T_1$  进行合并，可得新端点  $S'$  的电压、电流  $(V_{S',\text{sup}}, I_{S',\text{sup}})$  如图 5；再次将非故障支路  $S'B_2$ 、分支  $B_2T_2$  进行合并，可得新端点  $S''$  的电压、电流  $(V_{S'',\text{sup}}, I_{S'',\text{sup}})$ ，由此问题转变为如图 6 所示的支路  $S''R$  的双端故障测距问题。

然后，使用第 1 节中介绍的故障测距方法，就可以进一步进行定位。当故障发生在支路  $SB_1$ 、 $B_1B_2$  上时，与上述的过程并无二致。

因此，完整的推导过程可以归纳为：首先排除不可能的故障区域，缩小范围，然后确定具体的范围，最后进行测距。依据以下的流程，如图 7 所示。

并且，容易推知，该结论可以进一步推广到传输线路出现多个线路接入时的情形。例如，如图 8 所示的  $n \geq 3$  的情况。

将节点  $B_1$ 、 $B_n$  间的线路进行合并后，由两侧所测得的数据可得  $D$ 。则有：

1) 故障位于支路  $B_nR$ 、分支  $B_nT_n$  时，若  $D_1$  为真实的故障点位置，则应有  $D_1 \leq D_{\text{tap}1}$ ； $D$  为计算的故障指标值。与前述过程一样可推导得：

$$\text{Re}(D_1) - \text{Re}(D) = \text{Re}\left(\frac{k_1 I_{T1,\text{sup}} + k_2 I_{T2,\text{sup}} + \cdots + k_n I_{Tn,\text{sup}}}{I_{S,\text{sup}} + I_{R,\text{sup}}}\right) \quad (10)$$

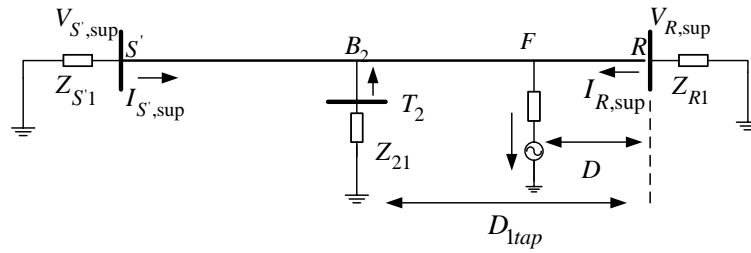


Figure 5. Transmission lines after merger  
图 5. 合并后的传输线路

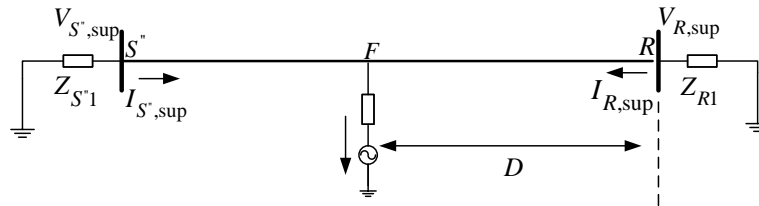


Figure 6. Fault location for two-terminal Transmission lines  
图 6. 双端测距问题

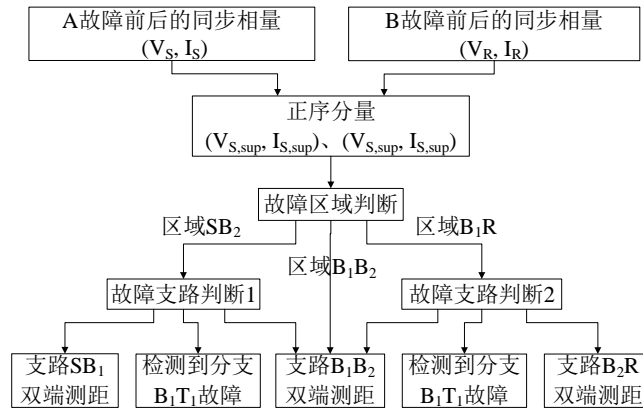


Figure 7. Fault location procedures  
图 7. 故障测距流程

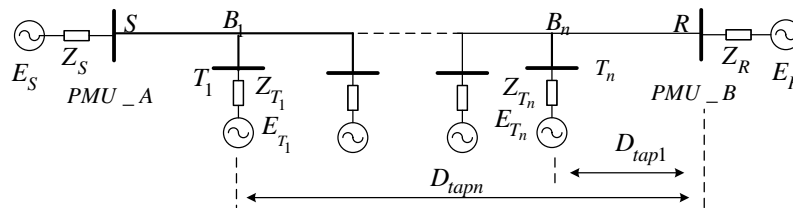


Figure 8. Transmission tapped with multi-legs  
图 8. 传输线路出现多分支的情况

其中  $k_1, k_2, \dots, k_n$  均为非零常数, 且若所有线路、阻抗均为高感抗, 即  $I_{T_1,sup}, I_{T_2,sup}, \dots, I_{T_n,sup}$  与  $I_{S,sup}, I_{R,sup}$  的相角差均不高于  $90^\circ$ , 则可得到:

$$\text{Re}(D) < \text{Re}(D_1) \leq \text{Re}(D_{tap1}) \quad (11)$$

2) 故障位于节点  $B_1, B_n$  间时, 有:

$$\operatorname{Re}(D_1) - \operatorname{Re}(D) = \operatorname{Re}\left(\frac{k_1 I_{T_1, \text{sup}} + k_2 I_{T_2, \text{sup}} + \cdots + k_n I_{T_n, \text{sup}}}{I_{S, \text{sup}} + I_{R, \text{sup}}}\right) \quad (12)$$

其中  $k_1, k_2, \dots, k_n$  将各有大小, 因此无法确定  $\operatorname{Re}(D)$  与  $\operatorname{Re}(D_1)$  是何种关系。

3) 故障位于  $SB_1$  和  $B_1T_1$  之间, 一样可得:

$$\operatorname{Re}(D) > \operatorname{Re}(D_1) \geq \operatorname{Re}(D_{\text{tapn}}) \quad (13)$$

也即当  $n \geq 3$  时, 若处于(1)、(3)两种情况时, 我们可将原问题转化为  $(n-1)$  条支路的线路进行判断; 否则就讲原问题转化为  $(n-2)$  条支路的线路, 并一直重复该过程。

#### 4. 基于智能算法的改进

人工智能算法可以尽量的模拟各种非线性方恒, 同时还可以模拟不确定性系统。而遗传算法是一种具有较好特性的全局性智能算法, 具有较高的收敛特性。将人工智能算法与遗传算法相结合, 充分的利用了两种算法的优点, 保证样本之间的快拟合, 从而使得结果得到精确的修正, 尤其适合于需要多次判断故障的系统。

基于智能算法的故障测距的主要步骤为:

- 1) 选取训练样本集, 训练 AI, 以获得遗传算法测距结果与修正参数的非线性映射关系。
- 2) 使用上述的判定准则进行判定, 并使用基于遗传算法的双端故障测距法进行计算。
- 3) 使用人工智能算法根据样本集修正结果。

#### 5. 算例仿真

使用 PSCAD 进行仿真计算, 初始的数据采样频率为 12 kHz。本文使用某 220 kV 等级电网进行测试, 线路长度为 400 km。假设在传输线路各点上发生单相接地故障, 采用 PSCAD 对故障进行仿真模拟, 获取暂态数据并利用本文算法进行故障区域判断。

人工智能算法原始样本的选取:

- 1) 故障距离选取为均匀选取故障点, 变化步长为 5 km;
- 2) 故障过渡电阻分别取 0、50  $\Omega$ 、100  $\Omega$ ;
- 3) 环境变化对线路参数的影响, 使用取故障线路参数分别为正常(等于计算参数)、弧垂变化至 10 m 两种情况来模拟, 并生成样本集。

多线路接入线路模型如图 9 所示, 假设分支线路均匀出现在主线路路上。

使用未考虑算法修正的方法进行计算, 假设输电线路主线上发生不同位置的单相接地短路故障, 应用本文方法进行初步的故障区域判断。结果如表 1 所示。

由表 1 的结果可知, 所使用的方法对于判断故障区域是可行的, 具有较高的准确性。

#### 人工智能算法提高算法精度分析

本文的故障定位原理中, 传输线路分支母线端的等效阻抗是影响两端精确测距的关键因素, 其又受线路距离的影响, 因此有必要研究其对整个算法的影响。

表 2 所示为加入人工智能算法修正后, 考虑线路长度误差时的测距误差结果。由表 2 线路两端故障时测距误差明显减小。线路参数准确时测量误差较小; 当受环境影响线路参数不准确时, 测距误差控制在 1% 以内, 充分的说明了算法的有效性。



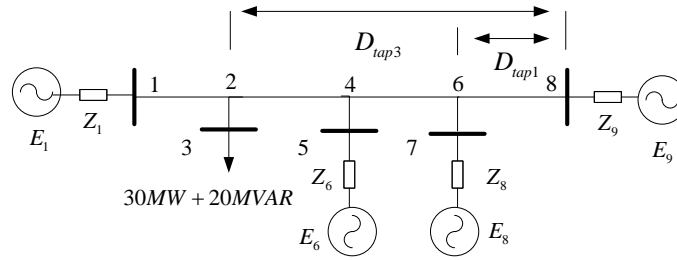


Figure 9. Transmission line with multi tapped legs  
图 9. 多线路接入传输线路

Table 1. Results of faulted section discrimination  
表 1. 故障区域判断结果

实际故障		判定区域
故障支路	故障位置/km	
2-4	210	3-6
4-5	220	3-6
2-4	105	3-6
2-4	195	2-6
4-6	205	2-6
4-6	295	4-8
6-8	305	4-8
6-8	395	4-8

Table 2. Simulation result compare under errors of the length of lines  
表 2. 线路长度误差下的仿真结果对比

是否考虑修正	定位误差(%)					
	10 km	70 km	120 km	160 km	210 km	260 km
否	2.90	1.02	1.44	1.37	2.46	3.12
是	0.12	0.25	0.33	0.43	0.51	0.23

## 6. 总结

本文提出了一种改进的基于智能算法的故障测距方法，该算法通过测量输电线路两侧的电流、电压值，得到相对应的判别指标，从而可预先识别出故障对应的区域；然后将非故障分支进行等效，得到合并后的电气量；再对故障处的分支应用基于遗传算法的双端测距法进行初步的测距，并利用神经网络算法对所得到的测距结果进行进一步的调整，提高了线路故障的测距精度。

通过仿真表明，所提出方法所得的测距结果不受故障点位置与过渡电阻的影响，并且结果的精度受线路长度的影响较小，具有一定的实用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 施世鸿, 何奔腾. 不受 TA 饱和影响的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 67-71.
- [2] 李强, 王银乐. 高压输电线路的故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009(23): 192-197.



- [3] Pereira, C.E.M. and Zanetta, L.C. (2004) Fault Location in Transmission Lines Using One-Terminal Postfault Voltage Data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**, 570-575. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2004.824391>
- [4] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
- [5] Tabatabaei, A., Mosavi, M.R. and Farajiparvar, P. (2013) A Traveling-Wave Fault Location Technique for Three-Terminal Lines Based on Wavelet Analysis and Recurrent Neural Network Using GPS Timing. *IEEE of Smart Grid Conference (SGC)*, 268-272.
- [6] Suonan, J., Gao, S., Song, G., *et al.* (2010) A Novel Fault-Location Method for HVDC Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **25**, 1203-1209. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033078>
- [7] 翟永昌, 李永丽, 曾治安, 等. 高压输电线路的双端电气量综合测距方法[J]. 继电器, 2004, 32(15): 29-33.
- [8] Aslan, Y. (2012) An Alternative Approach to Fault Location on Power Distribution Feeders with Embedded Remote-End Power Generation Using Artificial Neural Networks. *Electrical Engineering*, **94**, 125-134. <http://dx.doi.org/10.1007/s00202-011-0218-2>
- [9] Izykowski, J., Rosolowski, E., Balcerek, P., *et al.* (2010) Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 72-80. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035222>
- [10] Song, G., Chu, X., Cai, X., *et al.* (2014) A Fault-Location Method for VSC-HVDC Transmission Lines Based on Natural Frequency of Current. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **63**, 347-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.069>
- [11] Dine, M., Sayah, H. and Bouthiba, T. (2012) Accurate Fault Location Algorithm on Power Transmission Lines with Use of Two-End Unsynchronized Measurements. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **9**, 189-200. <http://dx.doi.org/10.2298/SJEE1202189M>
- [12] Farshad, M. and Sadeh, J. (2013) A Novel Fault-Location Method for HVDC Transmission Lines Based on Similarity Measure of Voltage Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 2483-2490. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2272436>
- [13] Izykowski, J., Molag, R., Rosolowski, E., *et al.* (2006) Accurate Location of Faults on Power Transmission Lines with Use of Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 627-633. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858778>
- [14] Izykowski, J., Rosolowski, E., Balcerek, P., *et al.* (2010) Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 72-80. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035222>
- [15] 顾伟, 王波. 适于多分支输电线路的故障支路判别算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 127-133.
- [16] 刘涤尘, 杜新伟, 李媛, 等. 基于遗传算法的高压长线路双端故障测距研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 21-25.
- [17] 李小叶, 李永丽, 张烁. 基于混合智能算法的直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 108-113.