

同杆双回线环流量的行波特点

宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 张健康, 康小宁

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 对存在复杂耦合关系的同杆双回线分解成解耦的同向模网和环流模网的过程进行了理论推导, 得到的双回线环流模网具有不包含双回线以外的系统且两端电压为零的特点, 该特点使得环流网成为双回线最佳的故障定位网络, 从而使复杂的双回线测距简单化。通过对比单相接地故障时双回线环流网与双回线故障线的模行波的仿真波形, 得出了双回线环流量行波与双回线路以外系统无关, 且在两端母线处的反射最强而在故障点的反射较弱等特点。这些特点使得基于双回线环流量的单端行波测距具有双端测距效果。为环流量行波用于同杆双回线测距奠定理论基础。

关键词: 同杆双回线; 环流量; 行波

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)03-0001-05

0 引言

由于同杆双回线输电技术采用双回线路共用杆塔, 具有占地少, 节省出线走廊等优点, 故有利于环境保护, 减少资金投入和缩短建设工期。因此这种输电技术越来越受到重视, 并逐渐成为电能传输的主要方式。高压远距离输电线路走廊复杂, 巡线困难且费用较高, 因此其故障定位技术一直是电力工作者的重要研究课题。

由于同杆双回线路存在线间互感, 故障类型多且复杂, 尤其是在考虑同杆双回线的分布参数模型时, 反应单端电气量的工频量准确故障定位问题一直没有得到很好的解决。在反应暂态电气量的行波测距方面, 国内学者进行了大量的研究^[3,5,7], 但同杆双回线的特殊结构使得其单端行波故障测距目前仍存在如下问题: 反应单端电气量的行波测距是通过检测故障点产生的初始行波到达检测点的时间和检测点与故障点间的首次反射行波到达检测点的时间间隔实现测距。初始行波一般可以做到准确检测, 但反射波中包含背侧系统复杂的反射波、故障点的反射波、对端母线和系统的反射波、故障点内部产生的反射波, 因此反射波的识别非常困难, 并且从理论上都没解决其识别的机理, 从现场得到的故障时的行波数据和仿真数据看波形复杂很难用计算机自动识别反射波进行故障测距, 需由专家根据情况估算出故障点, 测距可信度和成功率不高。

目前的同杆双回线故障行波测距是直接采用单

回线的行波测距方法, 没有反应同杆双回线自身的故障特征。通过对同杆双回线故障分析的研究发现, 双回线中的电流可以分解为同向量和环流量, 其中环流量仅在双回线路内部流动和系统无关, 故双回线环流量中的行波不受双回线路以外的系统接线情况的影响。环流量行波仅在线路内部来回反射, 测量点的行波将具有极强的规律性, 且双回线环流量行波具有行波模量高, 行波波头清晰等特点。基于双回线环流量的单端行波测距具有与双端行波测距完全相同的性能, 与双端行波测距相比又无需同步装置和通道配合, 具有一定的应用前景。

1 同杆双回线的环流量

同杆架设的双回线路是一种并联运行状态, 由于线路参数相同, 在非故障状态下, 两回线路的同名相流过的电流大致相等, 但故障情况下, 故障相的电流和另一回线同名相的电流差异很大, 如果将双回线中的电流分解成同相量和环流量(与同向量相对应也称反向量^[1,2,4,5,6]), 则环流量只在故障时出现, 且只在双回线路内部流动。以上分析表明双回线的环流量具有如下特征: 标识故障, 即仅在故障时出现, 能够区分故障与非故障; 只在双回线路内部流动, 与双回线以外的系统参数无关, 即不受双回线路以外的系统参数的影响; 双回线的环流电压沿线分布, 故障点最高, 双端母线侧为零。环流量的以上优良特性, 使得环流量成为双回线最佳的故障识别与定位的电气量。

由前分析知, 如果将双回线系统中的电压和电流表示成同向量和环流量形式^[4,6], 则有:

基金项目: 国家自然科学基金(50377032)

$$\begin{cases} u_T = 0.5(u_+ + u_-) \\ u_F = 0.5(u_+ - u_-) \\ i_T = 0.5(i_+ + i_-) \\ i_F = 0.5(i_+ - i_-) \end{cases} \quad (1)$$

其中: T 为同向量, F 为环流量, $+$ 为双回线的回线 1, $-$ 为双回线的回线 2。为分析方便, 将同杆双回线耦合关系示于图 1。

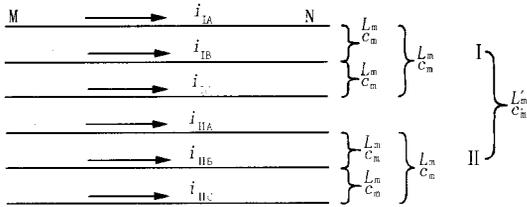


图 1 同杆双回线耦合关系图
Fig. 1 Coupling relational graph of double-circuit lines on the same pole

如果将同杆双回线的输电线看成均匀传输线, 在考虑同杆双回线间的互感和线间电容时, 其传输线方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_A}{\partial x} \\ \frac{\partial u_B}{\partial x} \\ \frac{\partial u_C}{\partial x} \\ \frac{\partial u_A}{\partial x} \\ \frac{\partial u_B}{\partial x} \\ \frac{\partial u_C}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m & L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m & L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_s & L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_m & L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_m & L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_m & L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_A}{\partial t} \\ \frac{\partial i_B}{\partial t} \\ \frac{\partial i_C}{\partial t} \\ \frac{\partial i_A}{\partial t} \\ \frac{\partial i_B}{\partial t} \\ \frac{\partial i_C}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial i_A}{\partial x} \\ \frac{\partial i_B}{\partial x} \\ \frac{\partial i_C}{\partial x} \\ \frac{\partial i_A}{\partial x} \\ \frac{\partial i_B}{\partial x} \\ \frac{\partial i_C}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_s & C_m & C_m & C_m & C_m & C_m \\ C_m & C_s & C_m & C_m & C_m & C_m \\ C_m & C_m & C_s & C_m & C_m & C_m \\ C_m & C_m & C_m & C_s & C_m & C_m \\ C_m & C_m & C_m & C_m & C_s & C_m \\ C_m & C_m & C_m & C_m & C_m & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_A}{\partial t} \\ \frac{\partial u_B}{\partial t} \\ \frac{\partial u_C}{\partial t} \\ \frac{\partial u_A}{\partial t} \\ \frac{\partial u_B}{\partial t} \\ \frac{\partial u_C}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: L_s 为单位线路的自感; L_m 为单回线内单位线

路的线间互感; L_m 为两回线间单位线路的线间互感; C_s 为单位线路的对地电容; C_m 为单回线内单位线路的线间电容; C_m 为两回线间单位线路的线间电容。

按式(1)、(2)的变换规则, 将式(3)、(4)变成同向量和环流量的传输方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_{TA}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{TB}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{TC}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s + L_m & L_m + L_m & L_m + L_m \\ L_m + L_m & L_s + L_m & L_m + L_m \\ L_m + L_m & L_m + L_m & L_s + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{TA}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{TB}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{TC}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_{FA}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{FB}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{FC}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s - L_m & L_m - L_m & L_m - L_m \\ L_m - L_m & L_s - L_m & L_m - L_m \\ L_m - L_m & L_m - L_m & L_s - L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{FA}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{FB}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{FC}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial i_{TA}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{TB}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{TC}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_s + C_m & C_m + C_m & C_m + C_m \\ C_m + C_m & C_s + C_m & C_m + C_m \\ C_m + C_m & C_m + C_m & C_s + C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{TA}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{TB}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{TC}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial i_{FA}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{FB}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{FC}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_s - C_m & C_m - C_m & C_m - C_m \\ C_m - C_m & C_s - C_m & C_m - C_m \\ C_m - C_m & C_m - C_m & C_s - C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{FA}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{FB}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{FC}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (8)$$

从式(5)~(8)表示的同向量和环流量传输线方程可以看出, 用同向量和环流量表示的双回线已实现两回线间解耦。然后将同向量和环流量表示的传输方程进行相模变换以消除其非对角元素, 则得同向量和环流量的 α 模、 β 模、 γ 模的模量传输线方程如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_{T\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{T\beta}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{T\gamma}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s + 2L_m + 3L_m & & \\ & L_s - L_m & \\ & & L_s - L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{T\alpha}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{T\beta}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{T\gamma}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u_{F0}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{F\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{F\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s + 2L_m - 3L_m & & \\ & L_s - L_m & \\ & & L_s - L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{F0}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{F\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{F\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial i_{T0}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{T\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{T\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_s + 2C_m + 3C_m & & \\ & C_s - C_m & \\ & & C_s - C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{T0}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{T\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{T\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial i_{F0}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{F\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial i_{F\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_s + 2C_m - 3C_m & & \\ & C_s - C_m & \\ & & C_s - C_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{F0}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{F\alpha}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_{F\beta}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(9)、(10)对 x 求偏导,并将式(11)、(12)代入,则得到如下波动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_{Tj}}{\partial x^2} = L_{Tj} C_{Tj} \frac{\partial^2 u_{Tj}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u_{Fj}}{\partial x^2} = L_{Fj} C_{Fj} \frac{\partial^2 u_{Fj}}{\partial t^2} \end{cases}$$

其中: $j = \alpha, \beta, 0$ 。

这样,存在复杂耦合关系的同杆双回线传输线方程就分解成为六个相互独立的、彼此之间没有耦合的模量传输线方程,进而化成波动方程形式。由上述推导可以看出,所得到的不同模量下的传输参数是不尽相同的,这说明分解后的不同模量具有不同的波阻抗和波速度。

上述处理过程只是将系统中的双回线部分分解成了同向量模量和环流量模量,如果将整个系统分解成为同向量模量和环流模量,还需要对双回线以外的系统进行分解^[4,6]。为了阐述方便,我们将上述分解得到的双回线各独立模量下的阻抗传输参数称为模阻抗,由模阻抗组成的图(与序网图对应)称之为模网图。

由式(1)可知,在双回线的母线侧,环流量电压为零,而同向量电压不为零。这说明双回线母线处因为环流量电压为零相当于直接接地,环流量模网图的模阻抗参数只含有双回线部分,双回线以外的部分在环流量模网图中将不存在;而同向量电压在双回线母线侧电压不为零,这样同向量模网图中双回线母线背侧的系统参数不能省去,在画模网图时,需要将双回线母线背侧的系统参数增加一倍^[4],然后进行对应的模变换。

图2、3为将一双电源的双回线系统分解成同向量和环流量模网图,图中双回线部分各模量下的具体线路传输参数计算分别如式(9)~(12)所示。

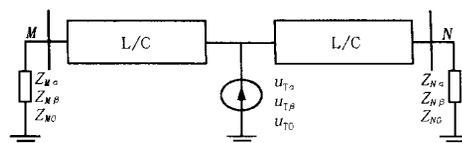


图2 同向量模网

Fig. 2 Same directional component mode nets

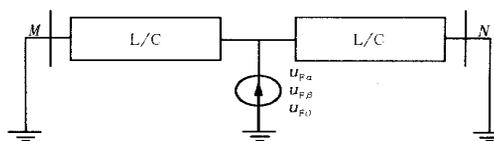


图3 环流模网

Fig. 3 Circumfluence component mode nets

由模网图也可以看出,图2的同向量模网中双回线背侧的系统参数依然存在,故电流行波在到达 M 端和 N 端后其反射和折射将受双回线路背侧系统参数的影响。同向量模网中的行波传输和单回线相同。而图3的环流量模网中双回线背侧没有参数,行波到达 M 端和 N 端时将出现全反射,故行波在其中的传播不受双回线路背侧的系统参数影响,故其行波特征将优于单回线。

2 仿真验证

为验证同杆双回线环流量的行波特点,本文采用如图4所示的仿真模型。500 kV 电压等级双电源系统,线路全长 110 km,中间 90 km 为同杆双回线,在线路发生单回线故障利用 ATP 进行仿真。

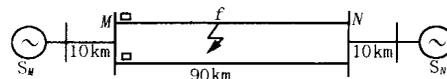


图4 系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of system

系统等效参数如下:

M 端的系统参数:正序阻抗 $Z_{M1} = j60.00$; 零序阻抗 $Z_{M0} = j46.80$ 。

N 端的系统参数:正序阻抗 $Z_{N1} = j45.20$; 零序阻抗 $Z_{N0} = j22.01$ 。

线路参数为:正序参数 $r_1 = 0.027$ / km, $l_1 = 0.343$ / km, $c_1 = 4.27 \times 10^{-6}$ S/km; 零序参数 $r_0 = 0.196$ / km, $l_0 = 0.695$ / km, $c_0 = 2.85 \times 10^{-6}$ S/km。

在仿真时,暂态数据的采样频率 500 kHz,即每 $2 \mu\text{s}$ 记录一个数据;记录数据长度为 1000 个,即只记录故障最初的 2 ms 数据;以下所给的仿真结果分别是双回线故障线路行波的 模和双回线环流量行波的 模(它们的传播速度为 259591 km/s);所给出仿真波形的测点都选在 M 侧;另外,本文只给出了单回线故障中的单相接地故障的仿真。

1) 金属性接地,故障发生在距 M 侧 50 km 处,如图 5、图 6 所示。

2) 过渡电阻 500 Ω ,故障发生在距 M 侧 50 km 处,如图 7、图 8 所示。

现在对以上仿真结果进行分析如下:在图 5~8 中的行波波头 1 对应故障点行波在双回线 M 端母线第一个反射波到达测点的时刻;波头 2、3、4 对应 M 背侧线路末端的第一、二、三个反射波到达测点的时刻;波头 5 对应故障点在 N 侧母线的第一个反射波到达测点的时刻;波头 6 分别对应故障点与 M 侧母线间的第二个反射波到达测点的时刻、波头 5 在 M 背侧线路末端的第一个反射波到达测点的时刻、波头 5 在 N 背侧线路末端的第一个反射波到达测点的时刻,三者极性相同,互相叠加;波头 7、8、9 分别对应波头 5 在 M 和 N 背侧线路末端的第二、三、四个反射波到达测点的时刻,由于 M 和 N 的背侧线路都为 10 公里,所以二者总是同时到达,且极性相同、互相叠加;波头 10、12 分别对应波头 1 在 M 端和 N 端母线间经第一、二次反射后,到达 M 端测点的时刻;波头 11、13 分别对应波头 5 在 M 端和 N 端母线间经第一、二次反射后,到达 M 端测点的时刻。

从仿真结果可以看出:(1) 双回线故障回线行波在波头 1 与 5、5 与 10 间包含有 M 、 N 母线背侧线路传来的折射波,而反模网中没有 M 、 N 母线背侧线路传来的杂波;(2) 波头 1、5 间的时刻可用于行波测距,测距原理同双端行波测距;(3) 双回线 M 、 N 母线处电流波为全反射;(4) 波头 1、10、12 间的距离为

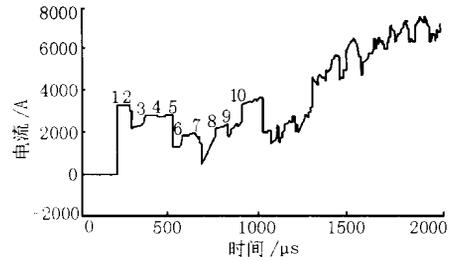


图 5 故障回线 模行波

Fig. 5 Mode travelling wave of fault circuit

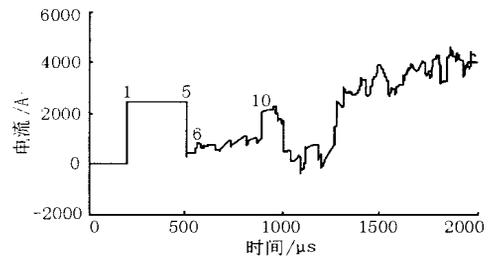


图 6 环流量 模行波

Fig. 6 Mode travelling wave of circumfluence component

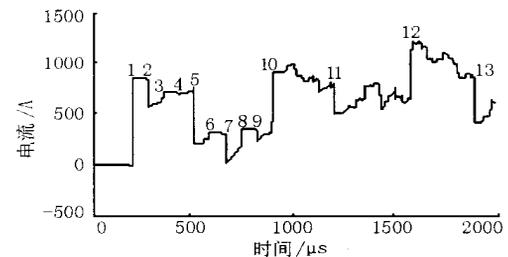


图 7 故障回线 模行波

Fig. 7 Mode travelling wave of fault circuit

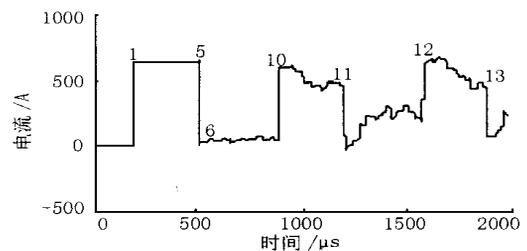


图 8 环流量 模行波

Fig. 8 Mode travelling wave of circumfluence component

双回线全长的 2 倍,波头 5、11、13 间的距离也为双回线全长的 2 倍,它们间隔周期出现,规律性强。

通过上述分析,可以将双回线环流量的行波特点简单归纳如下: 双回线背侧的反射波被消除; 本侧和对侧的母线反射最强烈; 故障点的反射较弱。所以可以通过本侧母线和对侧母线强烈的周期反射波来实现故障测距。

在利用双回线的环流量行波进行单端测距时,

其原理和单回线的双端行波测距类似:要利用故障点行波在本侧母线的第一个反射波和故障点行波在对侧母线的第一个反射波。在图 6 和图 8 中,如果令环流量行波的第一个上跳时刻(时刻)为 t_u ,第一个下跳时刻(时刻)为 t_d ,行波的传输速度为 v ,故障点和测量点的距离为 x ,双回线路线长为 l ,则有测距方程: $x = l - 0.5v(t_d - t_u)$ 。

3 结论

同杆双回线环流量的行波具有不受双回线以外系统参数影响的特点,在本侧和对侧的行波都具有全反射的特征。故此,利用双回线环流量进行单端行波测距,在测距特点上相当于双端行波测距,且无需同步装置和通道辅助,故具有一定的现实意义和推广价值。

参考文献:

- [1] 索南加乐,葛耀中,陶惠良,等(SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong, TAO Hui-liang, et al). 同杆双回线的六序选相原理(The Micro-processor Based Fault Phase Indicator for the Double Circuit Line on the Same Tower Using Six Sequence Components) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1991, 11(6): 1 - 9.
- [2] 索南加乐,葛耀中(SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong). 用六序复合序网法分析同杆双回线的一些特殊问题(Analyzing the Special Problems of Double Circuit Lines on the Same Tower Using Six Sequence Composite Sequence Nets) [J]. 继电器(Relay), 1991, 19(1): 2 - 14.
- [3] 徐丙垠(XU Bing-yin). 利用暂态行波的输电线路故障测距技术(博士学位论文)(Fault Location Technology of

Transmission Lines based on Travelling Waves, Doctoral Dissertation) [D]. 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1991.

- [4] 索南加乐(SUONAN Jia-le). 同杆双回线的故障分析及继电保护(博士学位论文)(Fault Analysis and Protective Relaying of Double Circuit Lines on the Same Tower, Doctoral Dissertation) [D]. 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1991.
- [5] 索南加乐,葛耀中(SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong). 同杆双回线跨线故障的准确定位方法(A New Accurate Fault Locating Method of the Fault between Two Lines on the Double Line on the Same Tower) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1992, 12(3): 1 - 9.
- [6] 葛耀中(GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(Theory and Techniques for New Types of Protective Relaying and Fault Location) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996.
- [7] 董新洲,葛耀中,徐丙垠(DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin). 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究(Research of Fault Location Based on Current Travelling Waves) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1999, 19(4): 76 - 80.

收稿日期: 2003-05-13; 修回日期: 2003-06-22

作者简介:

宋国兵(1972 -),男,博士研究生,研究领域为输电线路的故障定位;

索南加乐(1960 -),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统继电保护领域的研究;

许庆强(1976 -),男,博士研究生,研究领域为电力系统频率测量和故障选相。

Travelling wave characteristics of circumfluence component of double-circuit lines on the same pole

SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, ZHANG Jian-kang, KANG Xiao-ning
(Dept. of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A theoretical derivation process about complicated coupling double-circuit lines on the same pole decomposed into decoupling same directional component mode net and circumfluence component mode net is given in this paper. The obtained circumfluence component mode net has features that the net is nothing to do with systems beyond the double-circuit lines and its two terminal voltages are zero. The above mentioned features make circumfluence component net become the optimal fault location network, and the complicated double-circuit line fault location simplified. Compared mode travelling wave of double-circuit line on the same pole with that of fault line when single phase earth fault, some conclusions are reached as follows: the circumfluence component travelling waves are free from the systems outside the double-circuit lines, and have strong reflection in two-terminal busbar and weak reflection at fault point. These features make the one-terminal travelling wave fault location based on circumfluence component of double-circuit lines has the same effect as two-terminal one. The paper lays a theoretical foundation for fault location of double-circuit lines on the same pole using circumfluence component travelling wave.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377032).

Key words: double-circuit lines on the same pole; circumfluence component; travelling wave