

Research of Suitable Frequency Band of Transmission Line Model for Pilot Protection

Xiping Fu¹, Zhaozuo Wu², Xiaoning Kang², Jiale Suonan², Hao You²

¹ Shannxi Local Electricity (Group) Co., Ltd.--Baoji branch company, Baoji, Shannxi Province, China 721000

² Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shannxi Province, China 710049

Email: contec007@sina.com, wuzhaozuo@stu.xjtu.edu.cn

Abstract: In the research of relay protection, transmission lines are usually imitated with different mathematical models. But the mathematical model only corresponds with actual physical model approximately when applied in the special frequency band. So it has to consider the suitable frequency band when implementing the relay protection. This paper raises the definition of suitable frequency band of line model applied to pilot differential protection based on parameter identification. And it researches the suitable frequency band of transmission line Π model. It appears that the suitable frequency band becomes narrower with the increase in the length of transmission line, and is irrelevant with the system impedance. Finally, simulations by ATP basically establish the suitable frequency bands of Π model for the transmission lines of different length, providing the criteria for the design of digital filters of pilot differential protection based on parameter identification.

Key words: parameter identification, pilot differential protection, Π model, suitable frequency band of model, port impedance, angle-Frequency characteristic

纵联保护输电线路模型适用频带的研究

付喜平¹, 吴招座², 康小宁², 索南加乐², 游昊²

¹ 陕西省地方电力(集团)有限公司-宝鸡分公司, 陕西, 宝鸡, 中国 721000

² 西安交通大学电气工程学院, 陕西, 西安, 中国 710049

Email: xipingfu@163.com, wuzhaozuo@stu.xjtu.edu.cn

摘要: 在继电保护研究中, 输电线路通常采用不同的数学模型进行模拟, 而数学模型仅仅在一定的适用频带范围内与实际物理模型近似一致, 因此实现保护原理时必须考虑模型的适用频带。本文给出了适用于基于参数识别的纵联差动保护的线路模型适用频带定义, 研究了输电线路 Π 模型的适用频带。研究表明, 本文研究的输电线路 Π 模型适用频带随着输电线路长度的增加而变窄, 与两侧系统阻抗无关。最后通过 ATP 仿真研究, 初步确定不同线路长度的 Π 模型适用频带范围, 对基于参数识别原理的纵联保护数字滤波器设计提供了设计依据。

关键字: 参数识别; 纵联差动保护; Π 模型; 模型适用频带; 端口阻抗; 相频特性

1 引言

现有保护算法都是在对被保护元件模型进行一定简化的基础上提出的, 但实际物理模型往往比数学模型复杂得多, 不同的输电线路数学模型只在一定适用

频带内与物理模型相一致(满足工程需要), 在实现保护原理时必须考虑其模型适用频带。只有在模型适用频带范围内的信号才满足保护原理和算法要求, 这是设计数字保护滤波器的基础工作。

对元件模型适用频带的研究目前开展的不多, 但学者逐步认识到该问题的重要性。文献[1-3]提出了基于参数识别的快速方向元件, 结合保护原理研究了故障分量网络的入端阻抗的频率特性, 根据入端等效阻抗角不超过 90° 来确定模型的适用频带; 文献[4-5]

基金资助项目: 国家自然科学基金项目(NO: 50677051, 50877061); 国家“973 计划”项目(NO: 2009CB219704)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NO: 50677051, 50877061) and National Basic Research Program of China(973 Program) (NO: 2009CB219704).

从零序网络出发, 分析了小电流接地系统中线路的相频特征, 指出健全线路的零序阻抗特性在全频域里呈容性、感性交替变化, 且首段频带为容性, 定义所有线路公共的首段容性频带为小电流接地系统的特征频带, 在特征频带内, 健全线路可等效为一个电容, 故障线路背侧阻抗也为容性。以上文献对适用频带的研究都是从单端量出发观察模型的相频特性, 从而给出模型适用频带的定义。实际上模型适用频带与保护所采用的信号频带、算法及模型对激励的响应等因素有关, 应结合实际的应用考虑模型适用频带的定义方法。

通常我们根据保护原理算法的要求来选择输电线路的简化数学模型, 本文研究的输电线路模型适用频带主要应用在基于参数识别的纵联差动保护原理, 该保护原理是基于输电线路等效为II模型提出的, 因此本文研究II模型的适用频带。以往的模型适用频带定义方法都是基于单端量保护原理提出的, 不再适用于本文研究的基于双端量的参数识别纵联保护原理, 因此本文提出了一种新型的基于双端量的模型适用频带定义方法。本文假设分布参数模型为真实的物理模型, 通过理论和仿真研究, 分别比较II模型与分布参数模型在不同模量故障分量网络下端口阻抗的相频特性, 从而确定II模型的适用频带。

故障暂态信号中只有适用频带范围内信号, 可以用于参数识别。因此, 适用频带的研究对数字滤波器的设计和参数识别保护的快速性起着决定性作用。

2 基于参数识别的差动保护原理

文献[6][7]论述了该保护原理的详细内容和推导过程, 下面仅给出该保护原理的主要结论。

以单相模型为例, 来分析说明线路内外部故障时的故障特征模型。

2.1 输电线路外部故障模型

图1为线路外部故障的等效故障分量网络图。输电线路模型采用II模型, 假设电流正方向为由母线流向被保护线路。

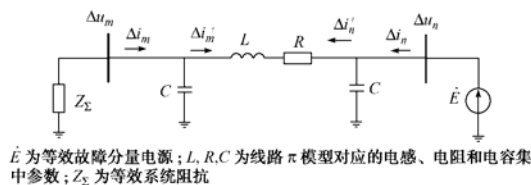


Figure 1. The fault component network with II model of external fault state

图1 外部故障时II模型故障分量网络

$$\Delta u_{cd} = \Delta u_m + \Delta u_n, \quad \Delta i_{cd} = \Delta i_m + \Delta i_n$$

由 Figure 1. The fault component network with II model of external fault state

图1 可以推导出输电线路外部故障时故障分量模型方程

$$\Delta i_{cd} = C \frac{d\Delta u_{cd}}{dt} \quad (1)$$

分析式(1), 可将线路外部故障状态等效为一电容电路模型, 如

Figure.2 Capacitance model of external fault state

图2 所示。

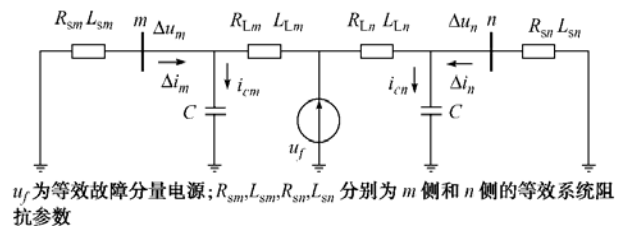


Figure.2 Capacitance model of external fault state

图2 线路外部故障时的电容电路模型

2.2 输电线路内部故障模型

图3为线路内部故障的等效故障分量网络图。



u_f 为等效故障分量电源; $R_{sm}, L_{sm}, R_m, L_m, R_n, L_n, R_{sn}, L_{sn}$ 分别为 m 侧和 n 侧的等效系统阻抗参数

Figure.3 The fault component network with II model of internal fault state

图3 内部故障时II模型故障分量网络

近似忽略线路容抗分流 i_{cm}, i_{cn} , 并假设电流分配系数 k_m, k_n 为实数, 由图3可以推导出输电线路内部故障时故障分量模型方程

$$\Delta u_{cd} = -R_{eq} \Delta i_{cd} - L_{eq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \quad (2)$$

式中: $R_{eq} = k_m R_{sm} + k_n R_{sn}; L_{eq} = k_m L_{sm} + k_n L_{sn}$ 。

分析式(2), 可将线路内部故障状态等效为一电感电路模型, 如图4所示。

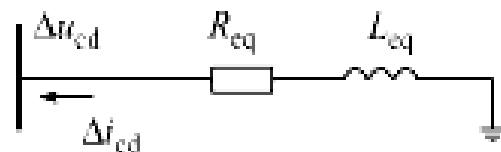


Figure.4 The inductance model of internal fault state

图4 线路内部故障时的电感电路模型

2.3 保护原理的实现

图3-图4给出了区内、区外故障时用于参数识别的线路故障等效模型,这是实现参数识别的基础。为了保证保护的选择性,即外部故障不误动,保护实现方法以外部故障电容模型为标准,利用故障模型误差及识别容抗的计算结果,识别出故障后线路模型,若满足电容模型,则为外部故障,否则为内部故障。具体实现判据可参考文献[6][7],这里不做详细介绍。

3 模型适用频带

上述保护原理是基于输电线路数学模型为 Π 模型提出的,这是在一定适用频带内对实际线路的精确分布参数模型的一种近似等效,因此实现该保护原理时必须考察 Π 模型适用频带。

3.1 模型适用频带的确定依据

1) 纵联差动保护中,内部故障时,差动电流以工频和非周期分量为主,高次谐波很小;外部故障时,在暂态过程中,差动电流以高次谐波为主^[8]。外部故障时高次谐波对参数识别影响很大,因此以外部故障电容模型确定模型适用频带。

2) 为保证参数识别的纵联差动保护的选择性,即外部故障保护可靠不误动,此时必须通过模型适用频带保证外部故障模型准确,因此以外部故障电容模型确定模型适用频带。

综上,在基于参数识别的纵联差动保护中,本文以输电线路外部故障电容模型研究 Π 模型适用频带。

3.2 模型适用频带的分析

3.2.1 故障分量网络端口阻抗的概念

$\Delta \dot{U}_m$ 、 $\Delta \dot{U}_n$ 、 $\Delta \dot{I}_m$ 、 $\Delta \dot{I}_n$ 分别为母线m、n处的故障分量电压和电流,定义输电线路故障分量网络的端口阻抗为:

$$Z_{cd} = \frac{\Delta \dot{U}_{cd}}{\Delta \dot{I}_{cd}} = \frac{\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n}{\Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n} \quad (3)$$

3.2.2 单相系统模型

下面以单相系统模型为例,分析 Π 模型和分布参数模型的故障分量网络端口阻抗的相频特性。其中线路参数为: $z = 0.4072 + j1.2338\Omega/km$;

$$c = 0.0064292\mu F/km;$$

1) Π 模型故障分量网络端口阻抗

当输电线路模型等效为 Π 集中参数模型时,其外

部故障故障分量网络如图5所示。其中 Z_s 为系统阻抗; R, L, C 分别为输电线路集中电阻、电感、电容参数。

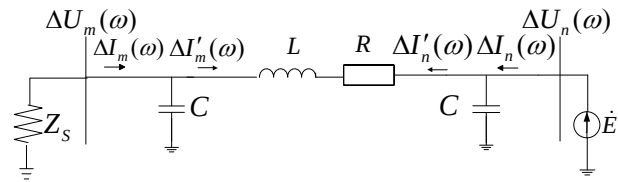


Figure.5 Equivalent circuit of the fault network with Π model

图5 Π 模型故障分量网络等效图

由图5可得 Π 模型故障分量网络频域方程为:

$$\Delta I_m(\omega) = \Delta I'_m(\omega) + \Delta U_m(\omega)j\omega C \quad (4)$$

$$\Delta I_n(\omega) = \Delta I'_n(\omega) + \Delta U_n(\omega)j\omega C \quad (5)$$

$$\Delta I'_m(\omega) = -\Delta I'_n(\omega) \quad (6)$$

利用式(6),式(4)+(5)可得 Π 模型下故障分量网络端口阻抗:

$$Z_{cd}(\omega) = \frac{\Delta U_{cd}(\omega)}{\Delta I_{cd}(\omega)} = \frac{\Delta U_m(\omega) + \Delta U_n(\omega)}{\Delta I_m(\omega) + \Delta I_n(\omega)} = \frac{1}{j\omega C} \quad (7)$$

由式(7)可以画出50km、100km输电线路 Π 模型下故障分量网络端口阻抗的相频特性,如图6、7所示:

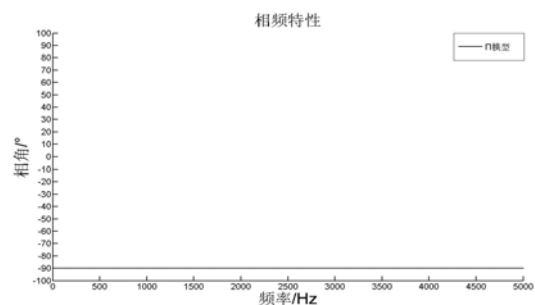


Figure.6 Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 50km line with Π model

图6 50km线路 Π 模型故障分量网络端口阻抗相频特性

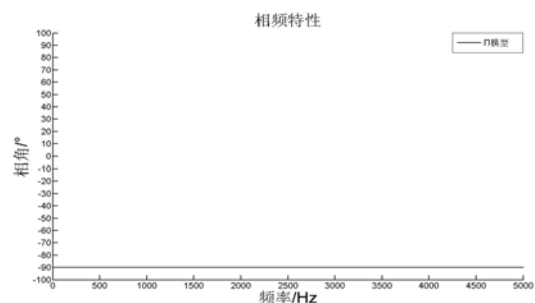


Figure.7 Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 100km line with Π model

图7 100km线路 Π 模型故障分量网络端口阻抗相频特性

即Ⅱ模型下输电线路故障分量网络端口阻抗可恒定等效为一容抗,幅值为输电线路集中电容容抗,相角为 -90° 。

2) 分布参数模型故障分量网络端口阻抗

当输电线路模型为分布参数模型时,其外部故障故障分量网络如图8所示。其中 Z_s 为系统阻抗; r, l, c 分别为输电线路单位长度的电阻、电感、电容参数; D 为输电线路总长度。

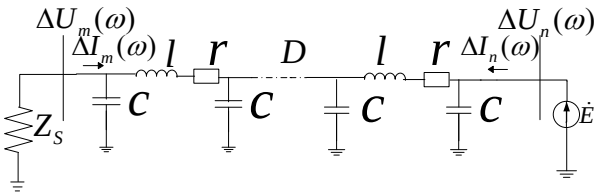


Figure.8 Equivalent circuit of the fault network with distributed model

图8 分布参数模型故障分量网络等效图

由图8得,分布参数模型故障分量网络频域方程如下所示:

$$\Delta U_n(\omega) = \Delta U_m(\omega) \cosh(r(\omega)D) - \Delta I_m(\omega) Z_c(\omega) \sinh(r(\omega)D) \quad (8)$$

$$\Delta I_n(\omega) = \frac{\Delta U_m(\omega)}{Z_c(\omega)} \sinh(r(\omega)D) - \Delta I_m(\omega) \cosh(r(\omega)D) \quad (9)$$

$$\Delta U_m(\omega) = -\Delta I_m(\omega) Z_s \quad (10)$$

式中: $r(\omega) = \sqrt{j\omega c(r + j\omega l)}$ —与频率 f 对应的线路传播常数,简记为 r ;

$Z_c(\omega) = \sqrt{(r + j\omega l) / j\omega c}$ —与频率 f 对应的线路波阻抗,简记为 Z_c 。

由式(8)、(9)、(10)可得分布参数模型下故障分量网络端口阻抗:

$$\begin{aligned} Z_{cd}(\omega) &= \frac{\Delta U_m(\omega) + \Delta U_n(\omega)}{\Delta I_m(\omega) + \Delta I_n(\omega)} \\ &= \frac{-Z_s - Z_s \cosh(rD) - Z_c \sinh(rD)}{1 - \frac{Z_s}{Z_c} \sinh(rD) - \cosh(rD)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\because \cosh^2(rD) - \sinh^2(rD) = 1 \therefore \cosh^2(rD) - 1 = \sinh^2(rD)$$

$$\text{则 } (\cosh(rD) + 1)(\cosh(rD) - 1) = \sinh^2(rD)$$

$$\frac{1 + \cosh(rD)}{\sinh(rD)} = \frac{\sinh(rD)}{\cosh(rD) - 1}$$

等式两边同乘于 Z_c ,左式分子分母同乘于 Z_s 可得:

$$\frac{Z_s + Z_s \cosh(rD)}{\frac{Z_s}{Z_c} \sinh(rD)} = \frac{Z_c \sinh(rD)}{\cosh(rD) - 1} \quad (12)$$

结合式(12),利用等比性质:

如果 $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$,则 $\frac{a+c}{b+d} = \frac{a}{b} = \frac{c}{d}$,式(11)可化简为:

$$Z_{cd}(\omega) = \frac{Z_c(\omega) \sinh(r(\omega)D)}{\cosh(r(\omega)D) - 1} \quad (13)$$

由式(13)可以画出50km、100km输电线路分布参数模型下故障分量网络端口阻抗的相频特性,如图9、10所示:

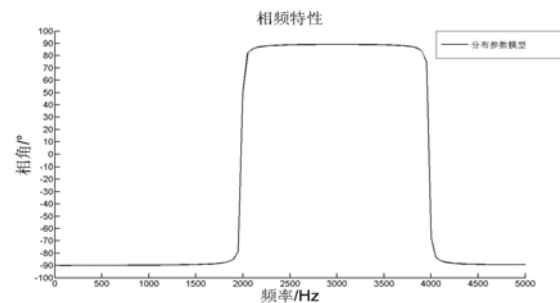


Figure.9 Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 50km line with distributed model

图9 50km 线路分布参数模型故障分量网络端口阻抗的相频特性

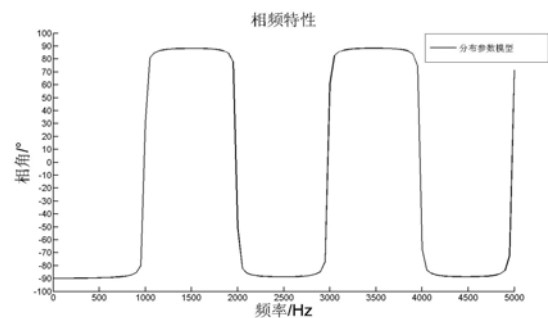


Figure.10 Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 100km line with distributed model

图10 100km 线路分布参数模型故障分量网络端口阻抗的相频特性

即分布参数模型下输电线路故障分量网络端口阻抗与线路传播常数、波阻抗、总长度有关,其阻抗特性不再恒定为容性。

3) 模型适用频带定义

由图6、7和图9、10可知,在低频段范围内,Ⅱ模型与分布参数模型的故障分量网络端口阻抗特性都体现为容性;而在高频段内,两者的相频特性存在较大差异,分布参数模型的故障分量网络端口阻抗特性

呈现容性与感性交替变化, 较为复杂, 而 Π 模型恒定呈现容性特性, 此时将使 Π 模型不再符合实际物理模型, 导致保护算法存在较大误差, 降低了保护的灵敏度。

本文定义输电线路 Π 模型的故障分量网络端口阻抗相频特性与分布参数模型相频特性一致的首段频段为输电线路 Π 模型适用频带。

由式(7)、(13)以及图 6、7、9、10, 根据输电线路 Π 模型适用频带定义, 可以发现输电线路 Π 模型适用频带随着线路长度的增加而变窄, 而与两侧系统阻抗无关。

3.2.3 三相系统模型

在三相系统模型中, 输电线路经相模变换后, 可将三相系统解耦为线模、零模两种模量系统。

在线模网中, Π 模型故障分量网络端口阻抗表达式为:

$$Z_{cd1}(\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} \quad (14)$$

分布参数模型故障分量网络端口阻抗表达式为:

$$Z_{cd1}(\omega) = \frac{Z_{C1}(\omega) \sinh(r_1(\omega)D)}{\cosh(r_1(\omega)D) - 1} \quad (15)$$

式中, C_1 为三相系统输电线路线模集中电容参数, Z_{C1} 为输电线路线模波阻抗, r_1 为线模传播常数, D 为输电线路总长度。

在零模网中, Π 模型故障分量网络端口阻抗表达式为:

$$Z_{cd0}(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \quad (16)$$

分布参数模型故障分量网络端口阻抗表达式为:

$$Z_{cd0}(\omega) = \frac{Z_{C0}(\omega) \sinh(r_0(\omega)D)}{\cosh(r_0(\omega)D) - 1} \quad (17)$$

式中, C_0 为三相系统输电线路零模集中电容参数, Z_{C0} 为输电线路零模波阻抗, r_0 为零模传播常数, D 为输电线路总长度。

因此, 根据式(14)(15)可以画出线模网下 Π 模型和分布参数模型故障分量网络端口阻抗的相频特性, 从而得到线模网的输电线路 Π 模型适用频带。同理根据式(16)(17)可以画出零模网下 Π 模型和分布参数模型故障分量网络端口阻抗的相频特性, 从而得到零模网的输电线路 Π 模型适用频带, 两种模网下 Π 模型适用频带的共同交集部分为三相系统输电线路的 Π 模型适用频带。

4 ATP 仿真研究

本文以分布参数精确模型为基准, 对输电线路 Π

模型的适用频带进行了仿真研究验证, 通过研究不同长度输电线路经不同系统阻抗接地网络的两种模网下 Π 模型与分布参数模型故障分量网络端口阻抗的相频特性, 根据本文给出的模型适用频带定义对 Π 模型适用频带进行初步的确定, 并分析适用频带范围随线路长度以及两侧系统阻抗的变化情况。

仿真模型为输电线路末端发生单相接地故障的故障分量网络, 如图 11 所示, 线路分别采用分布参数模型和 Π 模型, 系统电压等级为 500kV, 各模型线路的正序和零序阻抗参数相同, 仅在线路长度和系统阻抗的大小方面有差别。

线路参数为:

$$r_1 = 0.02083\Omega/km, \quad r_0 = 0.1148\Omega/km;$$

$$l_1 = 0.8984mH/km, \quad l_0 = 2.2886mH/km;$$

$$c_1 = 0.0129\mu F/km, \quad c_0 = 0.00523\mu F/km。$$

$$\text{系统参数为: } R_{M1} = 1.0515\Omega, \quad R_{M0} = 0.6\Omega;$$

$$L_{M1} = 137.43mH, \quad L_{M0} = 92.6mH。$$



Figure11. Simulation model of fault component network

图 11 故障分量网络仿真模型

通过改变故障分量电源频率, 利用 Clarke 相模变换方法, 提取故障分量网络的模量, 然后利用全周傅氏算法, 根据式(3)计算出线模、零模故障分量网络端口阻抗的相量, 于是可以画出仿真线路的线模、零模故障分量网络端口阻抗随频率变化的相频特性曲线。下面将给出不同长度、不同系统阻抗条件下的模型的仿真结果:

4.1 Π 模型适用频带与线路长度的关系

输电线路长度 D 分别为 50km, 100km, 200km, 300km 四种, 系统阻抗取原始系统参数。

图 12-图 15 分别为 50km、100km、200km、300km 线路的两种模型线模、零模故障分量网络端口阻抗相频特性, 其中实线代表分布参数模型的零模量, 星形线代表分布参数模型的线模量, 虚线代表数学简化 Π 模型。

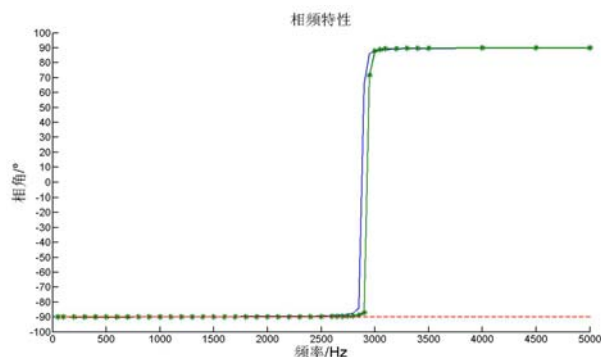


Figure12. Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 50km line in modal network

图 12 50km 线路模故障分量网络端口阻抗相频特性

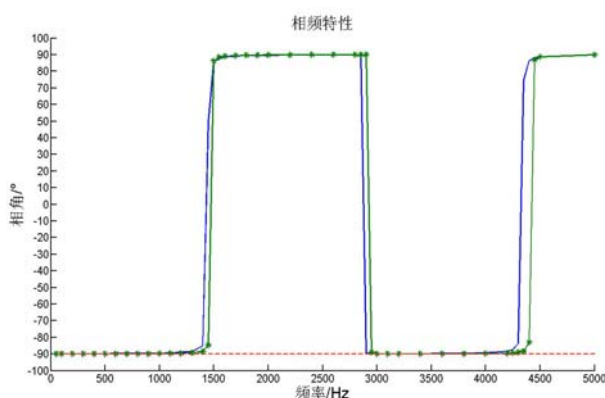


Figure13. Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 100km line in modal network

图 13 100km 线路模故障分量网络端口阻抗相频特性

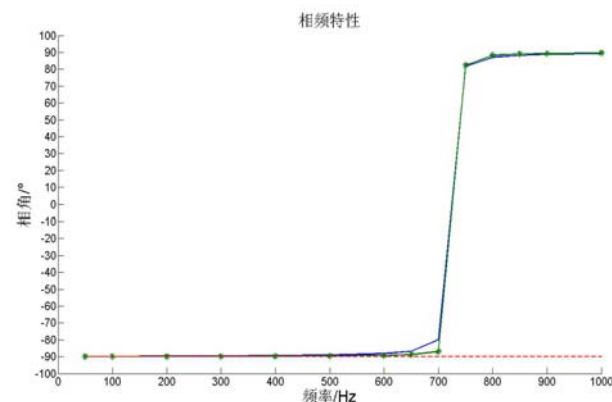


Figure14. Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 200km line in modal network

图 14 200km 线路模故障分量网络端口阻抗相频特性

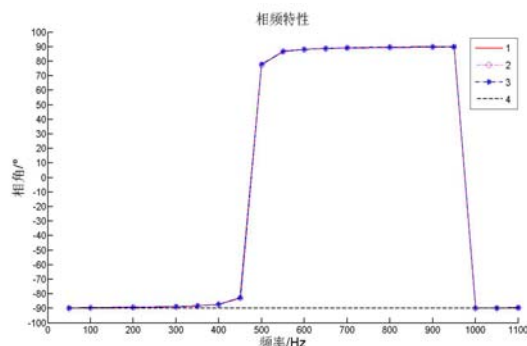


Figure15. Angle-Frequency characteristics of fault component port impedance of 300km line in modal network

图 15 300km 线路模故障分量网络端口阻抗相频特性

根据适用频带定义可以看出，输电线路Ⅱ模型的适用频带随着线路的长度的增大而变窄，这与第 2 节理论分析相符合。

根据本文对输电线路Ⅱ模型适用频带的定义，由图可知，50km 线路Ⅱ模型适用频带范围可达到 0~2800Hz，100km 线路Ⅱ模型适用频带范围大致为 0~1400Hz，200km 线路Ⅱ模型适用频带降至 0~700Hz，300km 线路Ⅱ模型适用频带降至 0~450Hz。

4.2 Ⅱ模型适用频带与系统阻抗的关系

输电线路长度 $D=300\text{km}$ ，系统阻抗取线路阻抗的 0.1 倍、1 倍、10 倍，即 $Z_{si} = kZ_{Li} = k(r_i + j\omega l_i)D$ ，其中 $i=0, 1$ ； $k=0.1, 1, 10$ 。

图 16 和图 17 分别为 300km 输电线路的经不同系

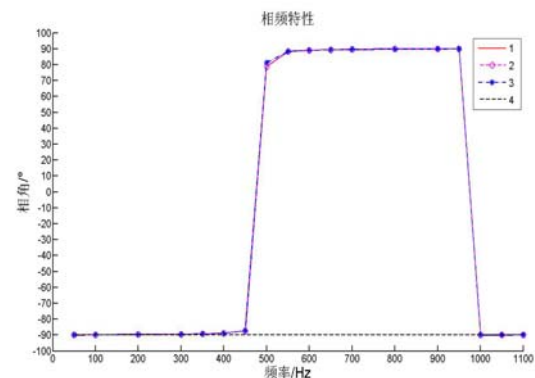


Figure16. Angle-Frequency characteristics of zero modal fault component port impedance for line with three system impedances

图 16. 三种系统阻抗下线路零模故障分量网络端口阻抗相频特性
统阻抗接地网络的零模、线模故障分量网络端口阻抗相频特性，其中线 1、2、3 分别代表分布参数模型下系统阻抗取 0.1 倍、1 倍、10 倍线路阻抗，而虚线 4

代表数学简化 Π 模型。从图中可以看出，线 1、2、3 重叠在一起，表明分布参数模型的零模、线模故障分量网络端口阻抗相频特性与系统阻抗无关。因此，本文输电线路 Π 模型的适用频带范围并不随着系统阻抗的变化而变化，这与第 2 节理论分析结果相一致。

综上所述，基于参数识别的纵联差动保护原理下，输电线路 Π 模型适用频带随着线路长度的增加而变窄，与系统阻抗无关。

应用在基于参数识别的纵联差动保护的 500kV 输电线路 Π 模型适用频带如表 1 所示：

Table1. Suitable frequency bands of 500kV line with Π model
表 1 500kV 输电线路 Π 模型适用频带

长度/km	50	100	200	300
适用频带/Hz	0~2800	0~1400	0~700	0~450

另外本文仿真研究了 110kV 输电线路，其 Π 模型适用频带如表 2 所示：

Table2. Suitable frequency bands of 110kV line with Π model
表 2 110kV 输电线路 Π 模型适用频带

长度/km	50	100	200	300
适用频带/Hz	0~1900	0~900	0~400	0~250

可见，不同电压等级的输电线路参数不同，因此其输电线路 Π 模型适用频带也不同。

线路模型的频带一旦确定，在应用于参数识别的纵联差动保护的过程中，必须设计自适应数字滤波器提取适用频带范围内的有效信息，用于参数识别。此外由于频带范围一般高于 3 次谐波，比如 300km 较长 500kV 线路的模型适用频带为 0~450Hz，根据适用频带设计的滤波器通带比常规基频滤波器或现有的带通滤波器通带要宽的多，因而整体延时小，保证了参数识别的快速性，为保护的快速性提供了保障。

5 结论

1) 在继电保护研究中，输电线路数学模型应用于保护原理和算法时，必须考察其模型适用频带，暂态信号中只有模型适用频带内的有效信息才满足保护算法。在实际的应用中，需要结合保护原理、信号频谱及激励响应等因素，考虑模型适用频带的定义方法。对基于参数识别的纵联差动保护而言，本文定义输电线路 Π 模型的故障分量网络端口阻抗相频特性与分布

参数模型相频特性一致的首段频段为输电线路 Π 模型适用频带。

2) 研究表明，对基于参数识别的纵联差动保护而言，输电线路 Π 模型的适用频带范围随着线路长度的增加而变窄，例如 50km、100km、200km、300km 的 500kV 输电线路 Π 模型适用频带范围分别为 0~1900Hz，0~950Hz，0~450Hz，0~300Hz。

3) 研究表明，基于参数识别的纵联差动保护原理下，输电线路 Π 模型的适用频带范围与系统阻抗无关。

References (参考文献)

- [1] SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection using parameter identification[J]. 2007, 1. 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 焦在滨. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报. 2007, 1.
- [2] SUONAN Jiale, WANG Xiangbing, LIU Wentao, et al. Quick Directional Relay Protection Based on T Model Parameter Identification[C]. Proceedings of CUS-EPSSA, 2005: 1649-1652. 索南加乐, 王向兵, 刘文涛等等. 基于 T 模型的参数识别快速方向保护原理[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十一届学术年会论文集第四册, 2005: 1649-1652.
- [3] SUONAN Jiale, WANG Xiangbing, MENG Xianglai, et al. Quick Directional Element Based on R-L Model Parameter Identification[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2006/06. 40(06): 689-693. 索南加乐, 王向兵, 孟祥来等等. 基于 R-L 模型的参数识别快速方向元件[J]. 西安交通大学学报, 2006/06, 40(06): 689-693.
- [4] XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth Fault Protection in Non-Solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003/05, 27(09): 48-53. 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003/05, 27(09): 48-53.
- [5] ZHANG Baohui, ZHAO Huimei, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2008/07, 36(13): 5-10. 张保会, 赵慧梅等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008/07, 36(13): 5-10.
- [6] SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. A Novel Transmission Line Pilot Protection Based on Fault Component Integrated Impedance. Proceedings of the CSEE[J], 2008/11, 28(31): 54-61. 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 张健康, 李怀强, 张怀宁, 康小宁. 输电线路故障分量综合阻抗纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报 2008/11, 28(31):54-61.
- [7] SUONAN Jiale, YANG Cheng, JIAO Zaibing et al. New Type of Transmission Line Pilot Protection Based on Model Identification, Automation of Electric Power Systems[J], 2008/12, 32(24): 30-34. 索南加乐, 杨钺, 焦在滨等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化 2008/12, 32(24):30-34.
- [8] Gao Houlei, Jiang Shifang. Calculation and Analysis for Transient Fault Component Current[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2000/04, 30(2): 146-151. 高厚磊, 江世芳. 暂态故障分量电流的计算分析[J]. 山东工业大学学报. 2000/04, 30(2):146-151
- [9] Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Zhang Zhe. Study on a new

- differential protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13.
袁荣湘, 陈德树, 张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报. 2000, 20(4).
- [10] Wen Minghao, Chen Deshu, Yin Xianggen. Study of current phasor differential protection for long UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37-40.
文明浩, 陈德树, 尹项根等. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化. 2000, 24(20).
- [11] Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53.
高厚磊, 江世芳, 贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研
- 究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53.
- [12] GUO Zheng, HE Jial. Novel principle of pilot differential relay protection of transmission lines. Automation of Electric Power System, 2004, 28(11): 1-5.
郭征, 贺家李. 输电线路纵联差动保护的新原理. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.
- [13] H. J. Koglin, M. Albert, M. Igel et al. Differential protection of multi-terminal lines without synchronization[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. July 2001.
- [14] Chi-Kong Wong, Chi-Wai Lam, Kuok-Cheong Lei, Chu-San Lei, et al. Novel wavelet approach to current differential pilot relay protection[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 2003, 18(1).