

# 基于离散化长线方程的超高压输电线路功率平衡法保护研究

乔占俊<sup>1</sup>, 李永<sup>1</sup>, 李祥忠<sup>2</sup>

(1. 华北科技学院机电工程系, 北京 101601; 2 吉林石油集团热电厂, 吉林 吉林 138000)

**摘要:** 带并联电抗器的超高压远距离输电线路发生故障后系统的暂态过程会变得更为复杂。针对通常以相量形式表示的输电长线方程, 提出离散化长线方程模型, 并在此模型的基础上通过分析判断线路两端的功率平衡与否来判断线路内部是否发生了故障, 进而对线路实施保护。功率平衡保护确定了保护判据, 最大限度地利用了电压、电流等电气量的故障信息, 实现超高压输电线路故障的快速切除和安全、可靠、灵敏的高速保护, 进而提高了电力系统暂态稳定性。

**关键词:** 离散化长线方程; 超高压输电线路; 暂态过程; 功率平衡法; 线路保护

**中图分类号:** TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)21-0005-04

## 0 引言

带并联电抗器的超高压输电线路发生故障时, 由于电抗器电感及输电长线沿线分布电容的影响, 会使得系统的暂态过程变得极为复杂。“能量平衡保护”通过对瞬时电压、电流的线性分布假设、判据的离散化特别处理, 用两种不同方法计算一段时间内输入输电线路的能量并进行比较, 判断内部和外部故障。借鉴“平衡”思想, 基于某模型, 研究一种同时利用故障后的电流量和电压量所包含的故障信息, 对带并联电抗器的超高压输电线路进行保护的新方法是可行和必要的。

本文从输电长线分布参数方程出发, 提出离散化长线方程模型, 在此模型基础上分析了基于功率平衡原理的超高压输电线路保护, 并确定了功率平衡保护判据。离散化长线方程基础上的“功率平衡法”简化电流、电压等电气量的处理而不降低对其所含故障信息的获取, 进而保证了系统保护的精确性。另一方面, 离散化基础上功率平衡保护判据的确定更便于现代微机保护对离散化数据的处理, 提升系统保护性能。

## 1 直接离散化长线方程

现代微机保护时代, 研究中常用的是离散化数据, 且在需要准确计算或必须考虑输电系统沿线分布参数的具体影响时, 传统的集中参数模型和以相量形式表示的长线方程难以达到研究要求, 此时就必须采用基于分布参数模型的输电长线方程来完成系统电气量的推导。

如图 1, 线路上任一距 A 端  $x$  处的电压和电流,

可分别用 A 端与 B 端的电压和电流以长线方程表示如下:

$$\begin{cases} U_x = U_A \cosh(\gamma x) - Z_c I_A \sinh(\gamma x) \\ I_x = I_A \cosh(\gamma x) - \frac{U_A}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (1)$$

和

$$\begin{cases} U_x = U_B \cosh(\gamma (l-x)) + Z_c I_B \sinh(\gamma (l-x)) \\ I_x = I_B \cosh(\gamma (l-x)) + \frac{U_B}{Z_c} \sinh(\gamma (l-x)) \end{cases} \quad (2)$$

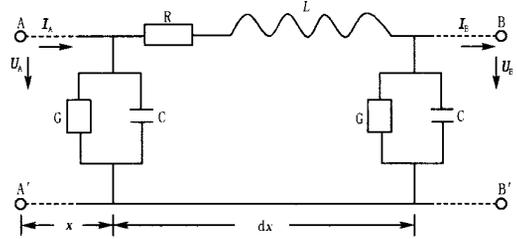


图 1 均匀输电长线的电路分析模型

Fig 1 Electric circuit model for long transmission line

在式 (1) 和式 (2) 中,

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \text{ 称为传播常数,}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \text{ 称为特性阻抗。}$$

设  $\gamma = \alpha + j\beta$ ,  $Z_c = f + jg$ , 利用双曲线函数的性质对式 (1) 中的  $U_x$  进行推导有:

$$\begin{aligned} U_x &= U_A [\cosh(\alpha x) \cos(\beta x) + j \sinh(\alpha x) \sin(\beta x)] - \\ & I_A (f + jg) [\sinh(\alpha x) \cos(\beta x) + j \cosh(\alpha x) \cdot \\ & \sin(\beta x)] = U_A \cosh(\alpha x) \cos(\beta x) + j U_A \sinh(\alpha x) \cdot \\ & \sin(\beta x) - I_A [\sinh(\alpha x) \cos(\beta x) - g \cosh(\alpha x) \cdot \\ & \sin(\beta x)] - j I_A [f \cosh(\alpha x) \sin(\beta x) + g \sinh(\alpha x) \cdot \\ & \cos(\beta x)] = U_A \cdot PA + j U_A \cdot PB - I_A \cdot PM - \end{aligned}$$

$$jI_A \cdot PN \quad (3)$$

同理,对式(1)中的  $I_k$  进行推导有:

$$I_k = I_A \cdot PA + jI_A \cdot PB - U_A \cdot PE - jU_A \cdot PF \quad (4)$$

其中,

$$PA = \cosh(x) \cos(x), PB = \sinh(x) \sin(x)$$

$$PM = f \sinh(x) \cos(x) - g \sin(x) \cosh(x)$$

$$PN = f \sin(x) \cosh(x) + g \sinh(x) \cos(x)$$

$$PE = \frac{f \sinh(x) \cos(x) + g \sin(x) \cosh(x)}{f^2 + g^2}$$

$$PF = \frac{f \sin(x) \cosh(x) - g \sinh(x) \cos(x)}{f^2 + g^2}$$

$$\text{由于 } j = e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = j$$

对式(3)和式(4)重新整理后得到

$$\begin{cases} U_X = U_A \cdot PA + U_A \cdot e^{j^2} \cdot PB - I_A \cdot PM - I_A \cdot e^{j^2} \cdot PN \\ I_k = I_A \cdot PA + I_A \cdot e^{j^2} \cdot PB - U_A \cdot PE - U_A \cdot e^{j^2} \cdot PF \end{cases}$$

再用离散化的方式表示如下:

$$\begin{cases} u_{X(k)} = PA \cdot u_{A(k)} + PB \cdot u_{A(k+n)} - PM \cdot i_{A(k)} - PN \cdot i_{A(k+n)} \\ i_{k(k)} = PA \cdot i_{A(k)} + PB \cdot i_{A(k+n)} - PE \cdot u_{A(k)} - PF \cdot u_{A(k+n)} \end{cases} \quad (5)$$

此式即为基于分布参数模型的直接离散化长线

方程。其中,  $n = \frac{1}{4}N$ ,  $N$  是一个工频周期内的采样点数。

仿真研究后发现,在电压变化比较剧烈的暂态过程,虽然直接离散化长线方程的精确度不比进入稳态过程后的精确度高,但总体而言,两种状态下的精确度差别不大,误差比较小,所以直接离散化长线方程可以用于跟踪电压的变化规律。而对电流来讲,不论是在电流变化相对比较剧烈的暂态过程,还是在变化平缓的稳态过程,直接离散化方程的精确度都很高,都能够很好地反映电流的变化规律。

## 2 超高压输电线路功率平衡法保护分析

超高压输电线路一般输送距离远、电压等级高,系统发生故障后,暂态过程比较复杂,特别是并联电抗器的投入使用,更加剧了暂态过程的复杂性。为提高系统的安全稳定性,可以在直接离散化长线方程的基础上,利用线路两侧电压、电流功率平衡保护原理,对超高压输电线路实施快速、灵敏的保护。

### 2.1 功率平衡法保护原理

对一正常工作的超高压输电线路,依据输电线路

长线方程,可由一端的电气量推导出另一端的电气量。

如图2所示有:

$$\begin{cases} u_N = u_M \cosh(l) - i_M \sinh(l) \\ i_N = i_M \cosh(l) - \frac{u_M}{Z_c} \sinh(l) \end{cases} \quad (6)$$

当被保护线路段 MN 正常工作时,依据长线方程(6),可由 M 端的实测电气量  $u_{M(t)}$ 、 $i_{M(t)}$  推导得出的 N 端电气量  $u_{N(t)}$ 、 $i_{N(t)}$ ,应与在 N 端的实测电气量  $u_{N(t)}$ 、 $i_{N(t)}$  相等。

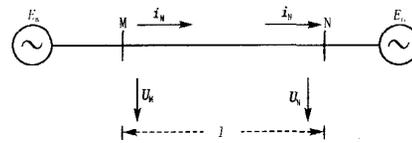


图2 超高压长线的简化模型

Fig 2 Simple model for extra high voltage transmission line

$$\text{即有: } \begin{cases} u_{N(t)} = u_{N(t)} \\ i_{N(t)} = i_{N(t)} \end{cases} \quad (7)$$

设  $P_{NN} = u_N \cdot i_N$  为线路 N 端的实测功率,  $P_{MN} = u_N \cdot i_N$  为由 M 端推导得出的 N 端的功率。在线路 MN 正常工作时,即在保护区内无故障时(包括线路 MN 外部发生故障),式(7)恒成立,从而有:

$$P_{MN} = u_N \cdot i_N = P_{NN} = u_N \cdot i_N \quad (8)$$

当线路内部发生故障后,长线方程(6)不再成立,从而式(7)和式(8)也不再成立,两端功率不再平衡。因此,可以通过判断线路 MN 两端的功率平衡与否来判断线路 MN 内部是否发生了故障,进而对线路实施保护。

### 2.2 功率平衡法保护判据的确定

现代微机保护中用到的多是离散化数据,因此,基于直接离散化长线方程,用离散化的形式表示式(8)有

$$P_{MN}(k) = u_N(k) \cdot i_N(k)$$

$$P_{NN}(k) = u_N(k) \cdot i_N(k)$$

$$P_1 = \frac{W_1}{T} = \frac{1}{T} \sum_{k=N_1}^{N_1+N} P_{MN}(k)$$

$$P_2 = \frac{W_2}{T} = \frac{1}{T} \sum_{k=N_1}^{N_1+N} P_{NN}(k)$$

$$\text{设: } R = \frac{P_1}{P_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

对  $P_{MN}(t)$  和  $P_{NN}(t)$  而言,当线路 MN 无内部故障(即使外部发生故障),理论上总有  $P_{MN}(t) = P_{NN}(t)$ ,也就是  $|W_1| = |W_2|$ ,  $R = 1$ ,  $|1 - R| = 0$ 。图

3为EMTP仿真得到的线路MN在内部无故障与外部发生故障两种情况下的 $R$ 值。由图可知,即使外部故障 $R$ 值也近似恒等于1,所以,此状态下保护亦可正确判断而不误动。

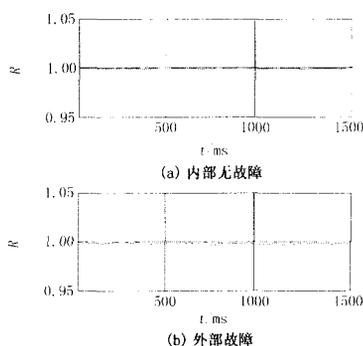


图3 线路MN正常工作时的 $R$ 值

Fig 3  $R$ 's value for line MN normally worked

相反,当线路MN内部发生故障时,无论其过渡电阻有多大,理论上总有 $P_{MN}(t) > P_{NN}(t)$ ,即有 $|W_1| > |W_2|$ ,  $R > 1$ ,  $|1 - R| > 0$ 。

考虑到实际应用中计算的误差等因素影响后,

$$\text{令: } |1 - R| = R_s \cdot R_{set} \quad (9)$$

$R_{set}$ 称为保护判据,其值的确定要考虑保护的灵敏度和可靠性等因素。为选择合适的 $R_{set}$ 值作为判据,依据仿真模型计算线路MN带不同过渡电阻和无故障情况下, $R$ 的不同取值见表1。

表1  $R_{set}$ 的取值范围

Tab 1 Scope for  $R_{set}$

过渡电阻 /	1	50	100	300	500	700	(无故障)
$R$	3	1	1	0.6	0.5	0.35	0

由表1可以看出,在无故障情况下, $R$ 值为0。但在故障情况下,即使是带较大过渡电阻的情况下, $R$ 的取值仍远大于0。因此,在灵敏度和可靠性兼顾的前提下通过整定选取合适的 $R_{set}$ 值就可以作为线路MN的动作保护判据。

对保护判据 $|1 - R| = \left| 1 - \frac{W_1}{W_2} \right| = R_s \cdot R_{set}$ ,进一步推导可得:

$$\begin{aligned} |1 - R| &= \left| 1 - \frac{W_1}{W_2} \right| = \left| 1 - \frac{U_N I_N \cos(\varphi_M)}{U_N I_N \cos(\varphi_N)} \right| = \\ &= \left| 1 - \frac{P_{MN} \cos(\varphi_M)}{P_{NN} \cos(\varphi_N)} \right| = R_s \cdot R_{set} \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)的判据可以看出保护判据既是功率幅值的函数,也是相位的函数,也就是说,判据既有比幅功能,也具有比相功能。

对被保护线路MN而言,M端和N端线路的电

流实际流向有以下两种情况。

### (1) 两端电流同向

在这种情况下,若线路MN内部发生故障,依据能量守恒定律,一定有 $|W_1| > |W_2|$ ,  $|1 - R| = R_s > 0$ ,所以通过整定选取合适的 $R_{set}$ ,就可以反应一定阻抗范围内的故障,也就是说可以以功率幅值的变化作为判据。

### (2) 两端电流反向

由式(10)可以看出,当M端和N端电流反向时, $\cos(\varphi_M)$ 与 $\cos(\varphi_N)$ 相反,从而使 $R_s$ 的值增加,这加快了保护出口的动作速度,对线路保护而言是有利的。

基于功率平衡法保护原理的各项数据,结合EMTP仿真程序进行大量仿真验证,结果表明,在超高压输电线路各种故障情况下,保护原理总能正确判断出内部和外部故障,实现快速动作,且不发生误动,即使在带较大过渡电阻等情况下,动作时间也不会受到明显影响。

## 3 结语

超高压输电线路在电网中担负着大量的功率交换任务,对整个系统的安全稳定运行起着至关重要的作用。带并联电抗器的超高压输电线路发生故障时,基于离散化长线方程的功率平衡法保护,最大限度地利用电压、电流等电气量的故障信息,实现故障的快速切除和安全、可靠、灵敏的高速保护,可切实提高电力系统的暂态稳定性,进而保证系统其它安全措施得以可靠发挥作用。

## 参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.  
XIE Guang-run Power System Overvoltage[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,1998.  
ZHU Sheng-shi Theory and Techniques of Relay Protection on High-voltage Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [3] 杜克宇. 超高压线路并联电抗器匝间保护原理及检验浅析[J]. 内蒙古电力技术,2002,20(1).  
DU Ke-yu Analysis of Theory and Test in EHV Parallel Connection Reactor Intertum Protection[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2002, 20(1).
- [4] 熊小伏,林金洪. 基于功率平衡的电力电缆故障测距

算法 [J]. 继电器, 2002, 30(12): 24-26

X DNG Xiao-fu, L N Jin-hong A Cable Fault Location Method Based on Power Balance Theory [J]. Relay, 2002, 30(12) 24-26

- [5] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 远距离输电线路的能量平衡保护 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 75-80  
WEN Ming-hao, CHEN De-shu, YN Xiang-gen Long Transmission Line Protection Based on the Principle of Balance of Energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21

(2): 75-80

收稿日期: 2006-06-13; 修回日期: 2006-09-12

作者简介:

乔占俊 (1973 - ), 男, 硕士, 讲师, 从事高电压技术、继电保护等电气工程理论与实践教学与研究工作。E-mail: zhanjunqiao@126.com

### Studies on protection of extra high voltage transmission line based on discrete long line equation and power balance

Q IAO Zhan-jun<sup>1</sup>, L I Yong<sup>1</sup>, L I Xiang-zhong<sup>2</sup>

(1. Dept of Electromechanical Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. Jilin Petroleum Group Corporation, Thermal Power Plant, Jilin 138000, China)

**Abstract:** Because the voltage grade is higher and the transmission distance is longer in extra high voltage transmission line, the transient course after faults is complicated. When shunt reactors are adopted, the transient course is worsened. In order to keep the stability of whole electric power system, it should clear faults as soon as quickly, so a novel protection principle which can meet the new demands is needed. The paper proposes a discrete long line equation, and based on discrete equations, a novel protection principle based on power balance which uses voltage and current data on two ends of lines is proposed. The protection principle for extra high voltage transmission line can make fast protection for the transmission lines with shunt reactors and improve the transient course stability of the whole electric power system.

**Key words:** discrete long line equation; extra high voltage transmission line; transient course; power balance; transmission line protection

(上接第 4 页 continued from page 4)

YAO Huan-nian, CAO Mei-yue The Resonant Earth in Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

- [14] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.

DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia Study on Adaptively Choosing Fault Line Under Single-phase to Ground Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands [J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-05-29

作者简介:

许庆强 (1976 - ), 男, 博士, 主要从事电力系统仿真和继电保护的研究工作; E-mail: xuqq2008@126.com

伍雪峰 (1975 - ), 男, 工程师, 主要从事电力系统方面的研究和管理工作的;

丁士长 (1980 - ), 男, 硕士, 从事电力系统通信和继电保护方面的研究工作。

### Research on line-selection used for the grounding system with fast arc-suppression coil

XU Qing-qiang<sup>1</sup>, WU Xue-feng<sup>1</sup>, DNG Shi-chang<sup>1</sup>, B I Xiao-yi<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute Co Ltd, Nanjing 210036, China;

2. Northwest Electrical Staff Training Center, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the operating time of the intelligent arc-suppression coil increased, it is more difficult to select the fault line in the neutral indirectly grounded distribution systems. In order to overcome the disadvantage of the existing technique of fault line selection, a new theory of selecting the fault line is proposed by using the transient zero sequence currents, which has been applying to the grounding system with fast arc-suppression coil. Firstly, the first three maximal abrupt values of zero sequence currents can be selected. When the accumulative total of zero sequence currents abrupt values get the maximum or particle, the fault line can be selected according to the polarity of the three values. For that the transient zero sequence currents are used only, the criterion is immune to the abnormality of the PT, and it can be applied to all kinds of the neutral indirectly grounded systems. The theoretical analysis and the results tested by the fault recording data in a practical environment show that the proposed method can choose out the fault line in distribution networks exactly and effectively.

**Key words:** power systems; line selection; arc-suppression coil; transient current