

# 输电线路合闸于故障保护原理综述

钟超, 陈皓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**对合闸于故障保护的原理及识别判据进行了综述,提出了理论研究中存在的问题,并对目前的最新研究动态进行了介绍。最后,对合闸于故障保护的发展前景进行了展望。

**关键词:**输电线路;合闸于故障保护;继电保护

**Abstract:** The principle and identification criterion for switching into fault protection are described, the existing problems are given in theory studies, and new research trends are presented. At last, the developing direction of switching into fault protection is prospected.

**Key words:** transmission line; switch onto fault protection; relay protection

**中图分类号:** TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0070-04

## 0 引言

暂态保护因其与线路参数、故障情况等有关,而与系统运行状况、过渡电阻等无关,且不受工频现象影响,故障检测、识别比工频量快得多等优点,因而通过对线路暂态量的研究来寻求对高压输电线路的保护是继电保护的一大研究热点。

20 世纪 70 年代末,Chandia 等人利用故障时电压和电流行波极性的不同作为保护判据。20 世纪 90 年代,Z.Q.Bo 和 A.T.Johns 等人又提出了利用双端信息综合判断以实现方向保护。在此基础上,A.T.Johns 等又提出了利用弧光故障所产生的高频电流信号作为判断量<sup>[2]</sup>。随着研究的不断深入,行波保护<sup>[6,7]</sup>理论已日趋完善,比较成熟的有:行波极性比较式方向保护(又称为 RALDA 型保护)、行波差动保护、行波判别式方向保护、行波幅值比较式方向保护以及行波电流极性比较式方向保护。20 世纪末,A.T.Johns 和 Z.Q.Bo 等人经过一系列的研究,又提出了利用单端暂态量来实现对线路的保护,并将这一保护原理应用在平行双回线上取得了很好的效果。但无论采取什么样的保护判据,由于雷击、刀闸操作等所引起的暂态信号容易引起保护误动、难以实现故障选相、电压过零点故障时保护灵敏度不够等问题。同时,为防止因线路合闸过程产生过电压导致事故发生,要求断路器合闸操作产生的行波和暂态量能使保护启动,若线路上有故障,则保护应迅速动作以切除

故障;若无故障,则保护不应误动。因此,合闸保护面临断路器合闸时如何正确识别线路状况的问题。现有的保护判据,无论是基于工频量的保护还是暂态量保护,均不同程度地存在着这样或那样的不足之处,难以实现保护对断路器对被保护线路的正确识别。重点对目前研究比较广泛的四类合闸于故障保护原理进行了介绍,并对其中存在的问题以及高压电网中合闸于故障保护的应用前景做了简述和展望。

## 1 合闸于故障保护研究现状

输电线路的合闸操作大致可分为两种:空载合闸和自动重合闸。无论是哪一种合闸操作,都要求继电保护能够正确识别线路情况。尤其是针对 500 kV 以上输电线路而言,由于合闸操作将在线路上引起不可预想的过电压,严重时将直接导致线路绝缘体的损坏直至引起整个电网的崩溃。因而,对合闸于故障保护的研究提出了更高的要求。

### 1.1 基于行波测距和行波极性的合闸于故障保护

文献[8]通过对断路器合闸时引起输电线路上的行波过程和方向行波的特征进行分析,提出了基于行波来判断断路器是否合闸于故障线路的判据。

(1)TV 位于线路侧,合闸操作瞬间仅能检测到正向初始行波(设到达时间为  $t_1$ );反向初始行波(设到达时间为  $t_2$ )由对端母线的反射产生。令

$$l = \frac{t_2 - t_1}{2} v \quad (1)$$

式中,  $v$  为行波传播速度。若线路上无故障, 计算得到的  $l$  等于或大于被保护线路全长 ( $L$ ), 即有  $l \geq L$  (当对端母线仅有一进一出两条出线时有  $l \geq L$  除此之外有  $l = L$ )。若线路上有故障, 计算得到的  $l$  为故障距离, 它小于被保护线路全长, 即  $l < L$ 。

(2) TV 位于母线侧, 合闸操作瞬间既能检测到正向行波也能检测到反向行波 (母线仅有一进一出两条线路时仅能检测到反向行波, 设反方向初始波头到达时间为  $t'_1$ , 反方向第二个波头到达时间为  $t'_2$ , 令

$$l' = \frac{t'_2 - t'_1}{2} v \quad (2)$$

若线路上无故障, 计算得到的  $l'$  等于或大于被保护线路全长, 即  $l' \geq L$ 。若线路上有故障, 计算得到的  $l'$  小于被保护线路全长, 即  $l' < L$ 。

结合方向行波的特征, 当 TV 位于线路侧时: 若线路有故障, 反向行波与初始正向行波极性相反; 若线路无故障且对端开关断开, 反向行波与初始正向行波极性相同。若线路无故障且对端开关闭合, 对端母线只有一条出线时, 方向行波与初始正向行波极性相同; 对端母线有两条出线时, 无反射波存在; 当对端母线有 3 条或以上出线时, 方向行波与初始正向行波极性相反。TV 位于母线侧时: 初始反向行波与故障点二次反向行波极性相同, 其他情况下二者的关系也与 TV 位于线路侧时的结论相反。

综上所述, 得出合闸于故障线路的识别判据如下。

(1) 线路空载合闸时的判据为: 线路有故障时  $l (l') \leq L + \Delta L$  反之线路无故障;

(2) 线路对端开关先合, 对端母线出线有 3 条以上出线时的判据为: 线路有故障时,  $l (l') \leq L - \Delta L$  反之线路无故障。

## 1.2 基于不同期合闸的行波合闸于故障保护

文献 [9] 根据线路有故障与无故障情况下行波反射系数的不同, 提出一种新的行波合闸保护方法。

(1) 对于单相无损线路, 反向行波将是正向行波经过时间  $\tau$  ( $\tau$  为行波从线路一侧传播到另一侧所用的时间) 的延迟再取反, 并且在合闸后的时间范围内都成立。即

$$i_r(t) = -i_f(t - \tau) \quad (3)$$

式中,  $i_r(t)$  为反向行波;  $i_f$  为正向行波。

(2) 对于单相有损线路, 因线路有损, 式 (3) 将近似成立, 为便于判断, 将式 (3) 中  $i_r(t)$  和  $i_f$  离散化并

引入了反向行波与正向行波的相关系数  $C_{\text{oeff}}(n)$ , 其定义为

$$C_{\text{oeff}}(n) = \frac{\sum_{k=n}^{M+n-1} [i_f(k+T_f) i_r(k+T_b)]}{\sum_{k=n}^{M+n-1} [i_f(k+T_f)]^2} \quad (4)$$

式中,  $n$  为计算相关系数所取数据的起始点;  $M$  为计算相关系数对应的时窗宽度, 以采样点数表示;  $T_f$  和  $T_b$  为正、反向行波的初始行波波头到达的时刻。

(3) 对于三相输电线路, 将三相线路解耦为 3 个相互独立的单相线路, 并以单相线路进行分析与计算。此时, 三相输电线路的断路器的 3 个触头是不同期闭合的, 即三相输电线路存在不同期合闸的问题。

对此, 提出了行波合闸保护的实现步骤。

1) 使用文献 [10] 提出的不同期合闸行波采集方案对线路合闸产生的行波进行采集, 采集量包括三相电流行波与线路侧三相电压行波。

2) 将合闸引起的三相电压与电流行波使用变换矩阵进行相模变换, 得到零模与  $\alpha$  模、 $\beta$  模、 $\gamma$  模 3 个线模。

3) 提取  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  线模, 分别使用式 (5) 和式 (6) 计算 3 个线模的正向行波  $i_{fm}(n)$  与反向行波  $i_{bm}(n)$ 。

$$i_{fm}(n) = \frac{u_m(n)}{2Z_{Cm}} + i_m(n) \quad (5)$$

$$i_{bm}(n) = \frac{u_m(n)}{2Z_{Cm}} - i_m(n) \quad (6)$$

式中,  $n$  为采样点;  $m$  为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  这 3 个线模;  $u_m(n)$  和  $i_m(n)$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  线模的电压和电流行波。

4) 利用三次 B 样条小波寻找  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  线模正、反向行波的初始行波波头<sup>[10]</sup>, 得到  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  线模正、反向行波的初始行波波头到达的时刻  $T_{fm}$  和  $T_{bm}$ 。

5) 令计算反向行波与正向行波的相关系数的起始时间。

6) 将 3 个线模的  $T_{fm}$  和  $T_{bm}$  以及  $T_{st}$  代入式 (4), 计算 3 个线模正向行波与反向行波的相关系数  $C_{\text{oeff}m}(T_{st})$ 。

7) 若  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  线模正向行波与反向行波的相关系数  $C_{\text{oeff}m}(T_{st})$  有一个小于  $C_{st}$ , 则认为线路有故障; 若  $C_{\text{oeff}m}(T_{st})$  均大于  $C_{st}$ , 则需要判断三相断路器是否已经闭合了一定的时间 (闭合时间应远大于行波在线路上往返一次的时间), 若断路器已经闭合, 则判断为线路无故障; 否则令  $T_{st} = T_{st} + N$  ( $N$  表示向后推移的时间步长), 将计算相关系数的时间向后推移一

定时间, 转步骤 6) 重新计算。

### 1.3 基于行波测距原理的合闸于故障保护

文献 [11] 通过检测初始前、反向行波到达保护安装处的时间间隔来计算出线路长度, 与被保护线路全长比较, 判断是否合闸到故障线路, 提出了三类识别判据如下 (判据中初始前行波 F 及初始反行波 B 到达 M 侧的时刻分别为  $t_f$  和  $t_b$ ,  $\Delta t_{bf}$  为前、反行波到达 M 侧的时间差)。

判据 1: 当线路断路器空载合闸时, 在  $t_f$ 、 $t_b$  时刻分别检测到模量初始前行波 F 和模量初始反行波 B, 若  $\Delta t_{bf} = t_b - t_f = 2l/v < 2T(7)$  成立, 则该线路上有故障。

为了确保判据 1 的可靠需添加一小段时间裕度, 此时式 (7) 变为式 (8), 即:  $\Delta t_{bf} = t_b - t_f = 2l/v < 2T - \tau$ 。

判据 2: 当  $\Delta t_{bf} \geq 2T - \tau$  时, 若存在 2 个线模初始前行波 F 与初始反行波 B 极性相反, 则该线路上有故障, 且故障位于线路末端附近。但对于以下 2 种特别的情形可能无能为力:

(1) 少数线路末端故障而仅有 1 个模量前、反行波极性相反的情况。

(2) 线路末端经高阻接地的故障会造成故障点的反射波较小, 在一定的反行波门槛值之下, 就有可能检测不到与前行波极性相反的故障点引起的反行波, 以致出现 3 个模量前、反行波极性都相同的情况。

判据 3: 当  $\Delta t_{bf} \geq 2T - \tau$  且仅有 1 个线模的初始前、反行波 F 与 B 极性相反或 3 个线模 F 与 B 极性都相同时, 提取合闸相电流的低频能量  $E_L$  和高频能量  $E_H$ , 计算比值  $\lambda_h = E_L / E_H$ 。若任一相的  $\lambda_h > k_h$  (门槛值), 则线路末端有故障; 若三相的  $\lambda_h$  均小于  $k_h$ , 则线路末端无故障, 即整条线路无故障。

### 1.4 基于频率特征的合闸于故障保护

文献 [11] 在对空载线路合闸操作暂态过程频域特征进行了详细分析, 并对不同线路长度进行合闸于非故障线路和故障线路的自振频率分量进行仿真, 定性地得出了线路合闸操作暂态过程的基本特征为: 断路器空载合闸于非故障线路时, 线路中存在明显的自振频率分量。自振频率分量幅值较大, 远远大于基频分量的幅值, 仿真实验更进一步证实随着线路的增长, 这种自振频率分量的幅值将减小, 即自振频率与线路长度存在近似的反比关系; 而断路器空载合闸于故障线路时, 线路中不存在明显的自振频率分量。此

时, 线路中主要包含衰减直流分量和故障基频分量, 以及幅值很小的高频分量。据此, 可以得出在空载线路合闸过程中如何判别是否合闸于故障线路的定性判据。

判据 1: 断路器空载合闸于非故障线路时, 线路中存在明显的自振频率分量, 且自振频率分量随着线路的增长而逐渐减小。

判据 2: 断路器空载合闸于故障线路时, 线路中不存在明显的自振频率分量, 且线路中主要包含衰减直流分量和故障基频分量以及幅值很小的高频分量。

## 2 合闸于故障保护发展中存在的问题

### 2.1 基于行波测距和行波极性的合闸于故障保护

通过行波的极性关系、行波测距结果等时域特征判据识别出合闸线路是否存在故障。由其判据关系式 (1) 知, 当线路末端附近发生故障时有  $\approx L$  测距结果与线路无故障时相同, 而行波在线路末端反射情况较复杂, 正反向行波的极性可能出现与无故障线路空载合闸相同的情况, 因而识别方法可能会失效。

### 2.2 基于不同期合闸的行波合闸于故障保护

该方法在对单相无损线路进行识别时, 分别对线路中部故障和线路末端故障时的行波波头和极性关系进行了分析, 并提出了识别判据关系式 (3), 同时认为线路末端故障时, 反向初始电流行波的极性与正向电流行波的极性关系将与过渡电阻大小有关, 极性可能相同也可能相反, 但极性相反时大小不会相近。而线路末端故障是几乎所有合闸于故障保护面临的一个难点。文中对于线路末端故障与过渡电阻大小有关的分析尚不完善, 只是定性的认为极性相反时大小不会相近, 缺乏理论上严密的分析论证, 从而导致实际应用中的可信度不高。

### 2.3 基于行波测距原理的合闸于故障保护

文中通过对单相系统和三相同期合闸操作时线路中的行波信息进行了详细的时域特征分析, 并利用相模变换矩阵对三相系统进行线模解耦, 从而得出了相应识别判据, 因而同样具有诸多不确定性。一是初始前、反行波信息与所在母线结构和故障发生的类型与时刻相关, 因而导致初始前、反行波信号具有不确定性; 二是如何区分初始前、反行波信号与各类噪声干扰 (如 TA、TV 及测量仪器中的噪声) 问题; 三是判据对三相不同期合闸操作是否也同样适用有待进一

步论证。以上这些情况都可能造成合闸于故障保护元件 (SFU) 误动作。

### 2.4 基于频率特征的合闸于故障保护

该方法通过对合闸操作暂态过程频域特征进行分析,并对不同长度的输电线路进行自振频率仿真实验。研究表明,在给定的仿真条件下,尽管自振频率明显比工频高出很多倍,且自振主频率与线路长度近似成反比,线路越长,自振频率越低。但是,在利用自振频率分量识别合闸暂态过程时,需要考虑在不同线路长度下检测自振频率分量的可靠性。需要注意的是,随着线路长度的增加,自振主频率越来越靠近基频频率,其幅值也越来越小,为自振频率的检测增加了一定困难。其次,文中主要通过对空载合闸和三相同步合闸线路的频率特征进行了大量的分析论证,而对三相不同期合闸的问题探讨不够,因而对利用合闸操作引起的自振频率分量的分析和估计方法是否也同样适用值得进一步的探讨和研究。

## 3 发展前景与展望

近年来,在“西电东送、南北互供、全国联网”的指导方针下,更多的超高压远距离输电网络在国内相继投入运行,特高压电网的建设也提在议事日程上。随着电压等级的不断提高,输电距离增长,电网负荷加重,故障暂态过程中产生的暂态分量也将大大增加,持续时间也会相应变长,对传统的保护装置正确动作将产生不利影响,甚至不能正确运行。合闸于故障保护因其利用被保护线路上的行波时域和频域特征差异,其识别原理简单、故障检测快速(通常在不超过几个毫秒的时间范围内),尤其能够准确地判断出线路末端故障,具有传统的保护装置难以比拟的优势;同时,利用暂态电流高、低频成分特有的衰减差异以及小波变换在微机保护中的广泛应用,势必会在未来超高压和特高压电网中起到举足轻重的作用。

### 参考文献

[1] 赵京立,余恺,陈建. 高压电网的合闸于故障保护 [J].

电力系统自动化, 2001, 21(7): 67—70.

- [2] Johns AT, Aggarwal R K, Bo Z Q. Nonunit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise Part 1: Signal measurement [J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 1994, 141(2): 137—140.
- [3] Bo Z Q, Redfern M A, Aggarwal R K, et al Non-communication Protection of Transmission Line Based on Genetic Evolved Neural Network [A]. Proceedings of IEE International Conference on Developments in Power System Protection [C]. University of Nottingham, 1997, 291—294.
- [4] Bo Z Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073—1078.
- [5] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 周锦丽, 吕艳萍. 浅谈行波保护原理 [J]. 电气开关, 2006(4), 11—13.
- [7] 邹贵彬, 高厚磊. 输电线路行波保护原理与研究现状 [J]. 继电器, 2007(2), 1—6.
- [8] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中合闸到故障线路的检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 77—80.
- [9] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 一种考虑不同期合闸的行波合闸保护新方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 41—45.
- [10] 束洪春, 司大军, 孙向飞. 考虑断路器非同期合闸的行波数据采集方案及保护算法 [J]. 电网技术, 2005, 29(22): 80—84.
- [11] 段建东, 罗四倍, 张保会. 超高速保护中合闸于故障线路的识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 78—84.
- [12] 陈皓. 超高压输电线路暂态电流保护的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [13] 陈皓, 滕福生. 电力系统暂态信号频谱特征的仿真研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34(1): 89—92.
- [14] 陈皓. 电力系统故障暂态信号的功率谱估计 [J]. 电力自动化设备, 2002, (6): 12—15.

(收稿日期: 2009—12—05)

欢迎投稿 欢迎订阅