

# 基于两相电流差和线电压的中低压线路自适应保护

吴娟娟, 杨晓敏

(郑州电力高等专科学校, 河南 郑州 450004)

**摘要:** 首先利用动模实验数据验证了线路两相电流差的特性, 根据此特性, 提出了基于两相电流差和线电压的中低压线路自适应保护方案, 该保护方案具有故障类型和运行方式自适应的特点。然后, 分析了该自适应速断保护的性能, 并传统电流速断保护、距离保护以及电流闭锁电压速断保护进行分析比较, 阐明了该自适应速断保护的优越性。

**关键词:** 两相电流差; 自适应保护; 保护范围

## Adaptive protection for middle and low voltage line based on phase-to-phase differential current and phase-to-phase voltage

WU Juan-juan, YANG Xiao-min

(Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** First, this paper validates the characteristic of phase-to-phase differential current using the experiment data. According to this characteristic, it presents an adaptive protection for middle-low-voltage transmission line based on phase-to-phase differential current and phase-to-phase voltage. This protection has the trait of adapting to the type of phase fault and the operating conditions of power system. Then, it analyses the performance of this adaptive instantaneous trip protection, and compares with the conventional current instantaneous trip protection, distance protection and voltage instantaneous trip with current blocking. And the superiority of the adaptive instantaneous trip protection is elucidated.

**Key words:** phase-to-phase differential current; adaptive protection; zone of protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0036-05

## 0 引言

对于中性点非有效接地网络, 传统的线路电流保护定值按系统最大运行方式下三相短路电流整定, 灵敏度按最小运行方式下两相短路校核, 由于系统运行方式、故障类型的变化, 保护灵敏度可能降低。为了改善保护性能, 近年来自适应电流速断保护开始在中低压线路保护中得到研究和应用, 研究工作主要集中在引入区分故障类型的功能和引入电压量识别等效系统阻抗上<sup>[2]</sup>。自适应电流保护一般基于相电流和相电压, 在区分故障类型时需要进行故障选相, 使算法趋于复杂。且在中性点非有效接地系统中, 计算等效系统阻抗时引入的相电压并不是理想的测量量。考虑到一般自适应电流保护的不足, 本文提出一种基于两相电流差和线电压的电流自适应保护, 该保护原理具有故障类型和运行方式自适应的特点。

## 1 线路两相电流差特性

文献[4]对线路两相电流差特性进行了理论分析, 得出在电力网络中, 被保护线路发生相间金属性短路故障时, 流过保护的电流的两相电流差存在如下关系: 无论发生何种相间短路故障, 两故障相间的两相电流差大小等于三相短路时单相电流的 $\sqrt{3}$ 倍, 与非故障相有关的两相电流差的大小则小于故障相间的两相电流差值, 而且两故障相间电流差的大小与短路类型无关。

本文利用在华中科技大学动模实验室所做实验得到的实验数据对线路两相电流差特性进行验证。双电源网络模型如图1所示, 02号发电机和21号无穷大系统同时为线路供电, k点为短路点, 电流测量点在53QF处。

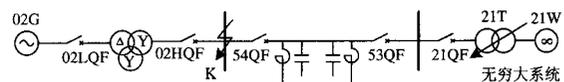


图1 双电源网络模型

Fig.1 Model of system with two-end sources

在短路点处分别设置两相短路、两相接地短路、三相短路故障, 得到各种故障下两相电流差  $I_{ab}$ 、 $I_{bc}$ 、 $I_{ca}$  的有效值, 如表 1 所示:

表 1 双电源网络故障数据

Tab.1 Fault data of system with two-end sources

短路类型	相电流差有效值		
	$I_{ab}/A$	$I_{bc}/A$	$I_{ca}/A$
AB 两相短路	33.9	16.9	16.9
BC 两相短路	16.8	34.4	17.5
CA 两相短路	17.0	17.1	34.1
AB 两相接地短路	33.8	16.0	19.4
BC 两相接地短路	19.0	34.4	16.6
CA 两相接地短路	16.2	19.5	34.2
ABC 三相短路	34.2	34.4	34.2

对表 1 中不同故障类型两相电流差有效值数据进行规律统计, 不难发现实验结果与理论分析相一致。

对单电源网络模型做同样的故障分析, 可以得到相同的结论, 由于篇幅限制这里不再赘述。

## 2 基于两相电流差和线电压的自适应保护

根据两相电流差的特性, 可以将相差电流作为相间短路保护的判据, 能保证各种类型的相间短路都有相同的保护区, 且不用计算故障类型系数, 自动具有故障类型自适应的功能, 整定和灵敏度校验方便, 但是也存在系统的运行方式变化影响保护灵敏度的问题。如果再利用线电压及两相电流差的故障分量估计出背后的系统阻抗<sup>[4]</sup>, 就可以得到具有故障类型和运行方式自适应特点的基于两相电流差和线电压的自适应保护方案。

### 2.1 系统阻抗估计

设故障前保护检测到的两相电流差分别为  $\dot{I}_{\phi_1\phi_2}(0)$ , 故障后检测到的两相电流差分别为  $\dot{I}_{\phi_1\phi_2}(t)$ 。故障前保护检测到的线电压分别为  $\dot{U}_{\phi_1\phi_2}(0)$ , 故障后检测到的线电压分别为  $\dot{U}_{\phi_1\phi_2}(t)$ 。利用故障相间线电压及两相电流差的故障分量计算系统阻抗。

三相短路时,

$$Z_S = -\frac{\dot{U}_{BC}(t) - \dot{U}_{BC}(0)}{\dot{I}_{BC}(t) - \dot{I}_{BC}(0)} = -\frac{\dot{U}_{AB}(t) - \dot{U}_{AB}(0)}{\dot{I}_{AB}(t) - \dot{I}_{AB}(0)} = -\frac{\dot{U}_{CA}(t) - \dot{U}_{CA}(0)}{\dot{I}_{CA}(t) - \dot{I}_{CA}(0)} \quad (1)$$

$\phi_1\phi_2$  相间短路时,

$$Z_S = -\frac{\dot{U}_{\phi_1\phi_2}(t) - \dot{U}_{\phi_1\phi_2}(0)}{\dot{I}_{\phi_1\phi_2}(t) - \dot{I}_{\phi_1\phi_2}(0)} \quad (2)$$

$Z_S$  为保护本侧系统等效阻抗。

### 2.2 保护动作判据

由于故障相间的两相电流差值最大, 发生短路故障时取三个电流差中的最大值及其对应的线电压进行实时整定计算。以 AB 相为例:

$$\dot{E}_{AB}(t) = \dot{U}_{AB}(t) + \dot{I}_{AB}(t)Z_S \quad (3)$$

$$Z_S = -\frac{\dot{U}_{AB}(t) - \dot{U}_{AB}(0)}{\dot{I}_{AB}(t) - \dot{I}_{AB}(0)} \quad (4)$$

于是保护动作判据为:

$$\max(|\dot{I}_{AB}|, |\dot{I}_{BC}|, |\dot{I}_{CA}|) \geq \sqrt{3}I_{op} \quad (5)$$

$$\sqrt{3}I_{op} = K_{rel} \left| \frac{\dot{E}_1}{Z_S + Z_L} \right| = \quad (6)$$

$$K_{rel} \left| \frac{\dot{U}_{AB}(t)(\dot{I}_{AB}(t) - \dot{I}_{AB}(0)) - \dot{I}_{AB}(t)(\dot{U}_{AB}(t) - \dot{U}_{AB}(0))}{-(\dot{U}_{AB}(t) - \dot{U}_{AB}(0)) + Z_L(\dot{I}_{AB}(t) - \dot{I}_{AB}(0))} \right|$$

式中:  $I_{op}$  为传统电流保护的整定值,  $K_{rel}$  为可靠系数,  $E_1$  为保护本侧系统等效电源的线电势,  $Z_L$  为被保护线路的正序阻抗。

这种保护动作判据中的整定值由保护实时测量值计算而来, 而且测量值中故障前后的相间电流和相间电压值可由保护直接采集、或仅经过简单的计算得到, 因而实际上是免整定的。

### 3 自适应速断保护性能分析

自适应保护的整定值为:

$$\sqrt{3}I_{op} = K_{rel} \cdot \frac{E_1}{Z_S + Z_L} \quad (7)$$

设在  $\alpha Z_L$  处短路, 则短路电流为:

$$I_F = \frac{E_1}{Z_S + \alpha Z_L} \quad (8)$$

上面两式中的  $E_1$  和  $Z_S$  均由采样值计算而来, 令  $\sqrt{3}I_{op} = I_F$ , 可得保护范围为:

$$\alpha = \frac{Z_L + (1 - K_{rel})Z_S}{K_{rel}Z_L} \quad (9)$$

上式表明, 保护范围  $\alpha$  不是常数, 它随系统实际阻抗的变化而变化, 并总能满足选择性的要求, 其最小保护区  $\alpha_{\min}$  可表示为:

$$\alpha_{\min} = \frac{Z_L + (1 - K_{\text{rel}})Z_{S,\text{max}}}{K_{\text{rel}}Z_L} \quad (10)$$

$Z_{S,\text{max}}$  为最小运行方式下的最大系统阻抗。

### 3.1 与传统电流速断保护的比较

传统电流速断保护的整定值为:

$$I'_{\text{op}} = K_{\text{rel}} \cdot \frac{E_\phi}{Z_{S,\text{min}} + Z_L} \quad (11)$$

$E_\phi$  为保护本侧系统等效电源的相电势,  $Z_{S,\text{min}}$  为最大运行方式下的最小系统阻抗。设在  $\alpha Z_L$  处短路, 则短路电流为:

$$I'_F = \frac{K_d E_\phi}{Z_S + \alpha Z_L} \quad (12)$$

$K_d$  为故障类型系数, 三相短路时  $K_d = 1$ , 两相短路时  $K_d = \frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

令  $I'_{\text{op}} = I'_F$ , 则可得传统电流速断保护的保护区为:

$$\alpha' = \frac{K_d(Z_{S,\text{min}} + Z_L) - K_{\text{rel}}Z_S}{K_{\text{rel}}Z_L} \quad (13)$$

令传统电流速断保护最小保护区为  $\alpha'_{\min}$ , 对于最小保护区, 取  $I'_F = I_{F,\text{min}}$ , 此时对应  $K_d = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $Z_S = Z_{S,\text{max}}$ , 上式可以表示为:

$$\alpha'_{\min} = \frac{\sqrt{3}(Z_{S,\text{min}} + Z_L)/2 - K_{\text{rel}}Z_{S,\text{max}}}{K_{\text{rel}}Z_L} \quad (14)$$

由式(10)、式(14)可得:

$$\frac{\alpha_{\min}}{\alpha'_{\min}} = \frac{Z_L + Z_{S,\text{max}} - K_{\text{rel}}Z_{S,\text{max}}}{\sqrt{3}(Z_{S,\text{min}} + Z_L)/2 - K_{\text{rel}}Z_{S,\text{max}}} > 1 \quad (15)$$

由式(15)可得, 上述自适应速断保护的最小保护区大于传统电流速断保护, 只有在最大运行方式下发生三相短路时, 两者的保护区才相同。

### 3.2 与距离保护的比较

距离保护的基本原理是根据保护的测量电压和测量电流求出短路点与保护安装处之间的测量阻抗, 并与整定阻抗比较, 若测量阻抗小于整定阻抗,

则保护动作。

#### 3.2.1 保护范围的比较

由于距离保护的测量阻抗只与故障点至保护安装处的距离有关, 而与系统运行方式无关, 因此距离保护的保护区经整定以后是固定不变的。由式(9)可以看出自适应速断保护的保护区随系统阻抗的变化而变化, 系统最小运行方式下其保护区最小。

#### 3.2.2 受过渡电阻影响的比较

距离保护的保护区受过渡电阻影响较大, 在单电源条件下, 保护区缩短; 在双电源条件下, 保护区可能缩短或伸长<sup>[1]</sup>。现以图2所示单电源系统为例进行分析比较。

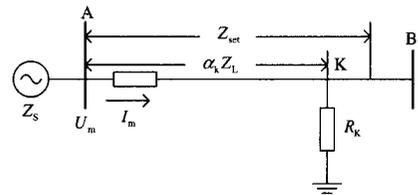


图2 单电源系统示意图

Fig.2 Radial system

当在线路 K 点经过渡电阻  $R_K$  发生短路时, 距离保护的测量阻抗为

$$Z_m = \alpha_k Z_L + R_K \quad (16)$$

令  $Z_m$  等于距离保护的整定阻抗  $Z_{\text{set}}$ , 得到此时的保护区为

$$\alpha_k = \frac{Z_{\text{set}} - R_K}{Z_L} = \alpha_Z - \frac{R_K}{Z_L} \quad (17)$$

其中:  $\alpha_Z$  为无过渡电阻时距离保护整定的保护区。

对于自适应速断保护, 此时的短路电流为

$$I_k = \frac{E_1}{Z_S + \alpha_k Z_L + R_K} \quad (18)$$

令  $I_k$  等于式(7)所确定的保护整定值, 得到经过过渡电阻短路时的保护区为

$$\alpha_k = \frac{Z_L + (1 - K_{\text{rel}})Z_S}{K_{\text{rel}}Z_L} - \frac{R_K}{Z_L} = \alpha - \frac{R_K}{Z_L} \quad (19)$$

由式(17)和式(19)可以看出, 过渡电阻对两种保

护保护范围的影响大致相同。

### 3.2.3 与电压量有关的性能比较

距离保护的主要缺点是电压回路断线时保护会误动作, 必须及时闭锁并退出运行, 从而使保护失效, 此时线路上无速断保护。自适应速断保护在电压回路断线时可以闭锁保护退出运行, 也可以凭借微机的记忆功能, 利用以往测得的系统阻抗计算保护整定值, 此时自适应保护相当于不再具有运行方式自适应的功能, 但仍具备故障类型自适应的功能, 可以保证保护可靠动作。

距离保护可以用方向阻抗原理实现, 方向阻抗的电压死区可以采用文献[1]提到的相关对策克服。自适应速断保护采用故障分量计算系统阻抗, 因此无电压死区。

### 3.3 与电流闭锁电压速断保护的比较

对于瞬时电流闭锁电压速断保护中的电流元件(一般起闭锁作用), 按保证本线路末端故障有足够灵敏度整定; 对于电压元件(控制保护区, 保证选择性), 按躲本线路末端母线故障整定<sup>[5]</sup>。电压整定为:

$$U_{op} = \frac{U_{Cy.min}}{K_{rel}} = \frac{Z_L}{K_{rel}(Z_{S,max} + Z_L)} \quad (20)$$

式中:  $U_{Cy.min}$  为线路末端故障保护安装处母线最小残压标幺值。设在线路  $\alpha Z_L$  处发生短路, 此时的母线残压为:

$$U_F = \frac{\alpha Z_L}{K_{rel}(Z_S + \alpha Z_L)} \quad (21)$$

令  $U_{op} = U_F$ , 得到电流闭锁电压速断保护的保护区为:

$$\alpha' = \frac{Z_S}{K_{rel}Z_{S,max} + (K_{rel} - 1)Z_L} \quad (22)$$

令电流闭锁电压速断保护的最小保护区为  $\alpha'_{min}$ , 对于最小保护区, 取  $Z_S = Z_{S,min}$ , 上式可以表示为:

$$\alpha'_{min} = \frac{Z_{S,min}}{K_{rel}Z_{S,max} + (K_{rel} - 1)Z_L} \quad (23)$$

该式无法与式(10)确定的自适应速断保护的最小保护区进行直接比较。可以设定最小保护区, 比较两种保护满足保护区的条件, 即保护的适用范围。设最小保护区  $\alpha'_{min} = 20\%$ , 取可靠系数  $K_{rel} = 1.2$ , 分别带入式(10)和式(23), 得:

$$\begin{cases} Z_L = 0.263Z_{S,max} \\ Z_L = 25Z_{S,min} - 6Z_{S,max} \end{cases} \quad (24)$$

为便于比较, 将上述两个等式两边同除以  $Z_{S,min}$ ,

得到:

$$\begin{cases} K_L = 0.263K_S \\ K_L = 25 - 6K_S \end{cases} \quad (25)$$

其中:  $K_L = \frac{Z_L}{Z_{S,min}}$ ,  $K_S = \frac{Z_{S,max}}{Z_{S,min}}$ 。两种保护适用范围

比较如图3所示。

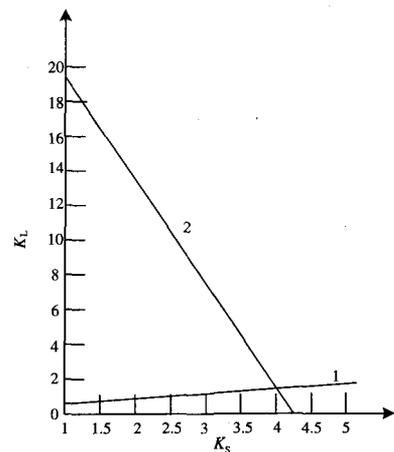


图3 两种保护适用范围比较示意图

Fig.3 Comparison of applicable range between two protections

图中, 直线1为自适应速断保护在可靠系数为1.2, 保护区为20%的条件下,  $K_S$ 与 $K_L$ 的关系曲线, 在直线1以上的区域内, 自适应速断保护的保护区都大于20%, 即直线1以上的区域都是自适应速断保护的适用区。同理, 直线2以下的区域是电流闭锁电压速断保护的适用区。很明显, 自适应速断保护的适用范围远远大于电流闭锁电压速断保护, 只有在线路很短或线路阻抗与最小系统阻抗之比很小时, 电流闭锁电压速断保护才比自适应速断保护优越, 但在极短线路发生短路时, 弧光电阻对电压保护性能影响极大, 很可能拒动。而且, 当电压回路断线时, 电压速断保护跟距离保护一样必须退出, 自适应速断保护仍能继续使用。

## 4 结语

本文首先根据实验数据验证了线路两相电流差的特性: 无论发生何种相间短路故障, 两故障相间的两相电流差大小等于三相短路时单相电流的 $\sqrt{3}$

倍, 与非故障相有关的两相电流差的大小则小于故障相间的两相电流差值, 而且两故障相间电流差的大小与短路类型无关, 并根据此特性提出基于两相电流差和线电压的自适应保护方案, 该保护具有故障类型和运行方式自适应的功能。通过比较分析得出, 这种自适应速断保护的最小保护范围大于传统电流速断保护, 提高了保护的灵敏度。其适用范围远远大于电流闭锁电压速断保护, 且在电压回路断线的情况下, 自适应速断保护比电压速断保护体现出更大的优越性。虽然自适应速断保护的保护区不像距离保护那样不受系统运行方式的影响, 且两种保护的保护区都会受到过渡电阻的影响, 但在电压回路断线时自适应保护比距离保护更具优越性, 且自适应保护不存在电压死区。

参考文献

[1] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.  
YIN Xiang-gen, ZENG Ke-e. The Principle and Application of Relay Protection in Electric Power Systems[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.

[2] 葛耀中, 赵梦华, 彭鹏, 等. 微机式自适应馈线保护的研究和开发[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 19-22.  
GE Yao-zhong, ZHAO Meng-hua, PENG Peng, et al. Study and Development of Microprocessor-based Adaptive Protection for Distribution Feeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 19-22.

[3] 李小明, 张尔桦, 王惠. 两相电流差的特性[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(12): 32-35.  
LI Xiao-ming, ZHANG Er-hua, WANG Hui. The Character of Phase-to-phase Differential Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(12): 32-35.

[4] CHEN Yan-xia, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. The Research of the Overcurrent Relays Based on Phase-to-phase Differential Current adaptive Setting and Coordination[A]. In: Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES[C]. 2003. 250-255.

[5] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.  
CUI Jia-pei, MENG Qing-yan, CHEN Yong-fang, et al. Relay Protection of Electric Power Systems and the Calculation of the Secure and Automated Device [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.

收稿日期: 2008-02-19; 修回日期: 2008-04-08

作者简介:

吴娟娟(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事继电保护教学研究工作; E-mail:wujuan1115@163.com

杨晓敏(1957-), 女, 副教授, 从事发电厂及电力系统教学研究工作。

许继研制的 500 kV 输电线路移动式直流融冰装置成功投运

12月7日, 由国家电网公司组织、许继柔性输电系统公司研制的我国首台 500 kV 高压输电线路移动式直流融冰装置在湖南复兴变电站顺利投运。试验融冰电流从 0 安培起以 500 安培/分钟速度升至 4200 安培, 维持 4 200 A 稳定运行 50 分钟后线路最高温度达到 50 °C, 温升 39 °C, 试验线路、金具、接头和直流融冰装置各设备运行正常, 各项试验数据达到设计要求, 试验取得圆满成功。

本装置额定输出功率 32 MW, 额定输入交流电压 35 kV, 额定输出直流电压 8.1 kV, 额定输出直流 4000 A。能满足长达 50 km 的 500 kV 线路融冰要求。该装置采用具有国际先进水平的高压直流输电换流阀技术和直流输电控制保护技术, 具有运行可靠、移动方便等特点。

装置可“移动”至多个变电站融冰, 克服了传统人工作业的除冰方法缺点, 一至两小时内可融化上百公里线路的冻冰, 相当于数百名工人一天的人工敲冰工作量, 而且不需人工到现场观察线路覆冰情况再进行融冰, 在融冰站内通过微机监控系统, 可随时掌握线路覆冰情况, 避免电力工人在除冰作业中不必要的牺牲。500 kV 线路移动式直流融冰装置的研制成功, 标志着国家电网公司应对低温雨雪冰冻等极端气候的能力得到了进一步提升, 提高了电网抗灾保障能力。

移动式直流融冰装置研制成功和投入使用, 必将对全国抗冰救灾发挥巨大作用。