

DOI: 10.7667/PSPC171282

# 一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护

李会新<sup>1</sup>, 王兴国<sup>2</sup>, 谢俊<sup>1</sup>, 柳焕章<sup>1</sup>

(1. 国网华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 为了减小负荷电流增加制动量对电流差动保护灵敏度的影响, 提出了一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护。首先比较线路两侧电流大小, 利用两侧电流幅值比与相位关系构造虚拟电流, 虚拟电流可以根据线路两侧电流幅值关系自适应调整制动量大小。与利用线路两侧电流相位差的制动量相比: 区内故障时, 虚拟电流制动量小于电流相位差制动量, 提高了电流差动保护灵敏度; 区外故障时, 虚拟电流制动量等于电流相位差制动量, 电流差动保护的可靠性不降低。同时分析了弱馈线路、串补线路电流反相两种情况下虚拟制动电流的适应性。利用RTDS建立仿真模型验证保护的動作性能。仿真结果表明, 虚拟电流制动量可以有效提高电流差动保护的灵敏度和可靠性, 同时具有良好的适应性。

**关键词:** 输电线路; 虚拟制动电流; 电流差动保护; 灵敏度; 可靠性

## A transmission line current differential protection based on virtual brake current

LI Huixin<sup>1</sup>, WANG Xingguo<sup>2</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, LIU Huanzhang<sup>1</sup>

(1. Central China Branch of State Grid Corporation, Wuhan 430077, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to reduce the influence of load current on the sensitivity of current differential protection, a current differential protection based on virtual brake current is proposed. Comparing current sizes of transmission line firstly, then amplitude ratio and phase relationship of both side currents are used to construct the virtual current. The virtual current can adjust the braking size according to the current amplitude relationship on both sides of the line. Comparing to brake current using phase differences of line both side currents, virtual brake current is smaller than phase differences brake current for internal faults and it improves the sensitivity of zero current differential protection. Virtual brake current is equal to phase differences brake current for external faults and it doesn't reduce the reliability of zero current differential protection. its adaptation is analyzed for weak feeder line and current inverse for line with series compensation device. RTDS simulation results show that virtual braking current can improve the sensitivity and reliability of the current differential protection effectively. Its adaptability is good.

This work is supported by National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFB0900604).

**Key words:** transmission line; virtual brake current; current differential protection; sensitivity; reliability

## 0 引言

电流差动保护动作速度快, 不受系统振荡影响, 被广泛应用于 220 kV 及以上电压等级输电线路作为主保护, 根据采用电气量的不同分为突变量电流差动保护、分相电流差动保护和零序电流差动保护。对于分相电流差动保护采用线路两侧电流相量和作为动作量, 采用两侧电流相量差作为制动量, 该制

动量受负荷电流影响, 在重负荷情况下发生区内故障时电流差动保护灵敏度会降低, 尤其是经较大过渡电阻接地故障时, 电流差动保护存在拒动风险。如何通过改进电流差动保护的制动量减小负荷电流对保护动作性能的影响, 对于提高差动保护的灵敏度具有重要意义。

国内外研究人员针对电流差动保护制动量进行了大量的研究<sup>[1-18]</sup>, 主要分为两个方面: 一是改进差动保护制动量; 二是调整制动系数  $K$ 。文献[1]分析了电流差动保护不同制动原理的動作特性, 文献

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900604)

[2-3]提出了双  $K$  值的电流差动保护, 在制动量中引入了双  $K$  值代替单一  $K$  值, 利用复平面分析了差动保护的耐受过渡电阻能力。文献[4]将差动两侧的电流量幅值之比调节电流差动保护的制动系数。文献[6]利用线路两侧零序电流和电压构造了零序差动阻抗保护, 理论上不受过渡电阻和分布电容的影响。

本文提出了一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护方法。通过比较线路两侧电流大小, 利用两侧电流幅值比与相位关系构造虚拟电流, 虚拟电流可以根据线路两侧电流幅值关系自适应调整制动量大小。与传统以相量差为制动量的电流差动保护相比, 输电线路区内故障时, 灵敏度更高, 区外故障时, 可靠性不变。利用 RTDS 建立仿真模型, 验证了所提保护算法的动作性能。

## 1 基本原理

### 1.1 基于虚拟制动电流的保护判据

图 1 为输电线路故障示意图。图中, 保护安装在线路两侧 1 和 2 处,  $i_m$ 、 $i_n$  分别为保护安装处的电流相量, F1、F2 分别为故障点。

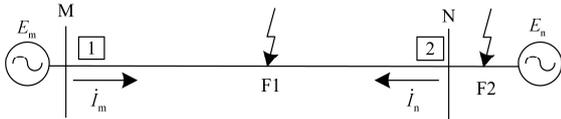


图 1 故障线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission line with faults

线路故障后, 比较线路两侧电流  $i_m$ 、 $i_n$  幅值大小, 当  $|i_m| \geq |i_n|$  时, 令  $i_{max} = i_m$ ,  $i_{min} = i_n$ , 当  $|i_m| < |i_n|$  时, 令  $i_{max} = i_n$ ,  $i_{min} = i_m$ 。

利用  $i_{max}$  与  $i_{min}$  构造虚拟制动电流为  $i_p = \frac{|i_{min}|}{|i_{max}|} \cdot i_{max} - i_{min}$ , 利用虚拟制动电流建立的电流差动保护判据可以表示为

$$\text{判据 I: } |i_m + i_n| > k |i_p| \quad (1)$$

式中,  $k$  为制动系数。

虚拟电流  $i_p$  中引入了两侧电流幅值比的信息, 可根据故障后线路两侧电流自适应调整虚拟制动电流的大小。

### 1.2 区内故障动作性能

区内 F1 点故障时,  $i_m \neq i_n$ , 虚拟制动电流

$$i_p = \frac{|i_{min}|}{|i_{max}|} \cdot i_{max} - i_{min}$$

图 2 为输电线路区内故障时判据 I 的动作相量图。从图中可以看出,  $|i_m + i_n| > |i_p|$ , 制动系数选取 0.5~1, 判据 I 正确动作。

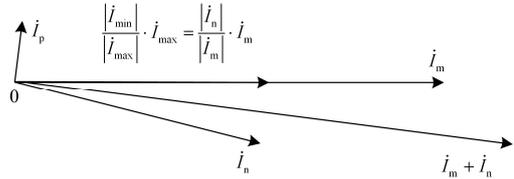


图 2 区内故障判据 I 的动作相量图

Fig. 2 Phasor diagram of criterion I for internal faults

### 1.3 正常情况及区外故障动作性能

正常情况及区外故障时,  $i_m = -i_n$ , 差动电流  $|i_m + i_n| = 0$ , 虚拟制动电流  $i_p = i_m - i_n$ 。图 3 为输电线路区外故障判据 I 动作相量图, 从图中可以看出,  $|i_m + i_n| < |i_p|$ , 制动系数选取 0.5~1, 判据 I 可靠不动作。



图 3 区外故障判据 I 动作相量图

Fig. 3 Phasor diagram of criterion I for external faults

### 1.4 与现有保护判据比较

目前分相电流差动保护采用两侧电流相量差作为制动量, 保护判据为

$$\text{判据 II: } |i_m + i_n| > k |i_m - i_n| \quad (2)$$

比较判据 I 和判据 II, 可得两者的动作量相同, 制动量不同。以下通过分析区内故障时制动量的差异比较两者的性能。

图 4 为输电线路区内故障时, 判据 I、II 制动量的差异, 从图中可以看出, 虚拟制动量  $|i_p| < |i_m - i_n|$ , 相同制动系数情况下, 输电线路区内故障时, 判据 I 灵敏度高于判据 II 的灵敏度。

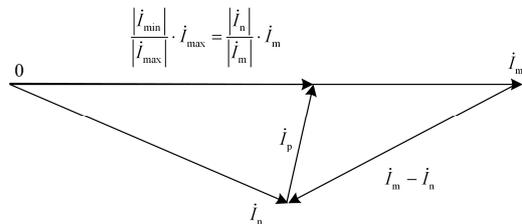


图 4 区内故障判据 I、II 制动量比较

Fig. 4 Comparison of criterion I and II for internal faults

根据 1.3 节的分析结论, 区外故障时, 判据 I、II 制动量相等, 即

$$|i_p| = \left| \frac{i_{\min}}{i_{\max}} \cdot i_{\max} - i_{\min} \right| = |i_m - i_n| \quad (3)$$

即区外故障时, 判据 I、II 具有相同的可靠性。

综上所述, 虚拟制动电流提高了电流差动保护区内故障时的灵敏度, 且区外故障可靠性不降低。

### 1.5 适应性分析

#### 1) 弱馈线路

弱馈线路发生区内故障时, 弱馈侧电流较小, 以图 1 中 N 侧为弱馈系统为例,  $i_n=0$ , 虚拟制动电流  $|i_p|=0$ , 现有判据 II 的制动量为  $i_m$ , 可见, 对于弱馈线路, 判据 I 的灵敏度显著高于判据 II 的。

#### 2) 串补线路

虚拟电流制动量也适用于零序电流差动保护, 保护判据为

$$\text{判据 III: } |i_{m0} + i_{n0}| > k_0 |i_{p0}| \quad (4)$$

式中:  $i_{p0} = \frac{i_{\max 0}}{i_{\min 0}} \cdot i_{\max 0} - i_{\min 0}$ ;  $i_{\max 0}$  为  $\max(|i_{m0}|, |i_{n0}|)$

对应的零序电流;  $i_{\min 0}$  为  $\min(|i_{m0}|, |i_{n0}|)$  对应的零序电流;  $i_{m0}$ 、 $i_{n0}$  分别为线路两侧零序电流;  $k_0$  为制动系数。

目前零序电流差动保护广泛采用如下判据:

$$\text{判据 IV: } |i_{m0} + i_{n0}| > k_0 |i_{m0} - i_{n0}| \quad (5)$$

对于高串补度输电线路, 发生区内经过渡电阻接地故障时, 串补侧线路电流会发生零序电流反向<sup>[19-20]</sup>。图 5 为串补线路故障示意图, F 处发生故障后, 若  $i_{m0}$  反相时, 考虑最极端情况,  $i_{m0}$  与  $i_{n0}$  相位相差  $180^\circ$ 。判据 III、IV 的制动量相位关系如图 6 所示, 可见  $|i_{p0}| < |i_{m0} - i_{n0}|$ , 判据 III 灵敏度高于判

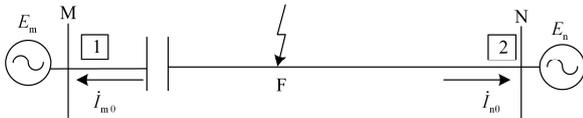


图 5 串补线路故障示意图

Fig. 5 Series compensated transmission lines

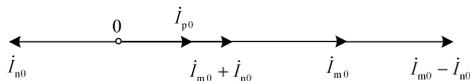


图 6 区内故障判据 III、IV 制动量比较

Fig. 6 Comparison of criterion III and IV for current inverse of series compensated transmission lines

据 IV, 即串补线路区内故障引起电流反向时, 基于虚拟制动电流的电流差动保护也能正确动作。

## 2 仿真实证

利用 RTDS 建立了仿真模型(如图 1 所示)验证判据 I 的动作性能, 系统参数如下: 电压等级 500 kV,  $Z_{m1} = 18 + j137.43 \Omega$ ,  $Z_{n1} = 15 + j92.6 \Omega$ ,  $Z_{m0} = 26 + j142.98 \Omega$ ,  $Z_{n0} = 20 + j119.27 \Omega$ , 线路 MN 全长 220 km,  $Z_{11} = 0.027 + j0.2783 \Omega/\text{km}$ ,  $C_{11} = 0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $Z_{10} = 0.195 + j0.6946 \Omega/\text{km}$ ,  $C_{10} = 0.0898 \mu\text{F}/\text{km}$ , 故障点位于 F1、F2。

常规电流差动保护判据 II 在重负荷下发生区内故障时的灵敏度不足, 为了验证本文所提判据的灵敏性, 设置线路重负荷情况下发生区内高阻接地故障。

图 7 为系统功角  $50^\circ$ 、线路 F1 点处发生 A 相经  $200 \Omega$  过渡电阻接地时判据 I、II 动作曲线。图中红色曲线为差动电流, 黑色曲线为判据 II 的制动电流, 蓝色虚线为判据 I 的制动电流。从图中可以看出, 在区内重负荷经高阻接地故障时, 传统判据 II 灵敏度不足, 电流差动保护拒动。虚拟制动电流小于差动电流, 保护判据 I 可以正确动作, 可见判据 II 的灵敏度高于判据 I 的灵敏度。

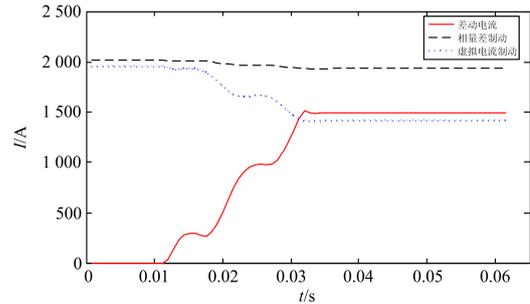


图 7 F1 故障判据 I、II 性能比较

Fig. 7 Simulation results of criterion I and II for internal faults

图 8 为区外 F2 点处发生 A 相经  $10 \Omega$  过渡电阻接地时的判据 I、II 动作曲线。从图中可以看出, 区外故障时, 本文判据与现有判据可靠性相同。

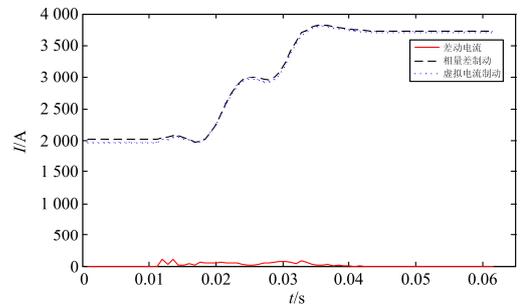


图 8 F2 故障判据 I、II 性能比较

Fig. 8 Simulation results of criterion I and II for external faults

### 3 结论

本文提出了一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护。利用两侧电流幅值比与相位关系构造虚拟制动电流,根据故障后电流自动调整制动电流的大小,在线路区外故障可靠性不降低的前提下,显著提高了线路区内故障时电流差动保护的灵敏度,虚拟制动电流可以应用于零序电流差动保护中,提高串补线路电流反向时差动保护的動作性能。

#### 参考文献

- [1] 陈德树, 陈卫, 尹项根, 等. 差动保护运行动作特性的相量分析[J]. 继电器, 2002, 30(4): 1-3, 7.  
CHEN Deshu, CHEN Wei, YIN Xianggen, et al. The phasor characteristic analysis of differential protection[J]. Relay, 2002, 30(4): 1-3, 7.
- [2] 柳焕章, 李晓华. 新型数字线路电流差动保护原理及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 74-81.  
LIU Huanzhang, LI Xiaohua. A novel principle of digital current differential protection for transmission line and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 74-81.
- [3] 李晓华, 柳焕章, 尹项根, 等. 新型双 K 值差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 49-55.  
LI Xiaohua, LIU Huanzhang, YIN Xianggen, et al. Novel differential protection with double restraint coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 49-55.
- [4] 李斌, 范瑞卿, 于绚, 等. 相位相关电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 96-101.  
LI Bin, FAN Ruiqing, YU Xuan, et al. A novel principle of phase related current differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 96-101.
- [5] 马文龙, 郭效军, 王文雄, 等. 一种超高压输电线路自适应分相电流差动保护新原理研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 12-15.  
MA Wenlong, GUO Xiaojun, WANG Wenxing, et al. Study on new principle of adaptive current differential protection for EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 12-15.
- [6] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 11-17.  
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 11-17.
- [7] Xianggen Yin, Zhe Zhang, Zhenxing Li, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [8] 赵萍, 裘愉涛, 徐华, 等. 适用于多点 T 接的新型电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 152-157.  
ZHAO Ping, QIU Yutao, XU Hua, et al. A new current differential relay scheme for multi "T" nodes transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 152-157.
- [9] 黄景光, 梅李鹏, 林湘宁, 等. 故障行波特性对光纤差动保护时延的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 76-82.  
HUANG Jingguang, MEI Lipeng, LIN Xiangning, et al. Influence on the optical fiber differential protection delay based on characteristic of fault traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 76-82.
- [10] 王秀莲, 崔云龙, 胡广. 光伏并网系统送出线路不对称故障的差动保护灵敏度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 20-26.  
WANG Xiulian, CUI Yunlong, HU Guang. Sensitivity studies on differential protection during the output line of grid-connected photovoltaic systems occur asymmetrical faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 20-26.
- [11] 柳焕章, 周泽昕, 周春霞, 等. 输电线路突变量电流差动继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 146-152.  
LIU Huanzhang, ZHOU Zexin, ZHOU Chunxia, et al. Current differential relay of transmission lines based on incremental quantity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 146-152.
- [12] 林湘宁, 刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 27-31.  
LIN Xiangning, LIU Pei. Comparative studies on percentage differential criteria using phase current and superimposed phase current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 27-31.
- [13] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 复式电流比例差动保护判据的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 98-102.  
LIN Xiangning, HE Zhanhu, LIU Shiming, et al. Reliability evaluations on complex current percentage differential criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,

- 21(7): 98-102.
- [14] 李晓华, 张哲, 尹项根, 等. 故障分量比率差动保护整定值的选取[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 47-50.  
LI Xiaohua, ZHANG Zhe, YING Xianggen, et al. Selection of settings of differential protection based on fault component[J]. Power system technology, 2001, 25(4): 47-50.
- [15] 尹项根, 邵能灵, 杨书富. 标积制动量的应用与分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 85-88.  
YING Xianggen, TAI Nengling, YANG Shufu. The application and analysis of the differential protection with the product-restraint quantity[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 85-88.
- [16] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 40-42.  
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, MA Tianhao, et al. Study on transient current differential protection based on correlation analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 40-42.
- [17] 赵曙伟. 变压器差动保护的补偿算法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 95-100.  
ZHAO Shuwei. Analysis of Compensation Algorithm for Transformer Differential Protection[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 95-100.
- [18] 张尧, 李玉平, 陈实. 分布式就地化变压器保护定值自整定的实现方案研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 72-76.  
ZHANG Yao, LI Yuping, CHEN Shi. Research on distributed on-site transformer protection self-setting solution[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 72-76.
- [19] 刘毅, 刘汉伟, 梅涛. 一种确定保护受串补电容影响区域的仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 84-90.  
LIU Yi, LIU Hanwei, MEI Tao. Simulation method of defining the area in which the distance protection affected by the series compensation capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 84-90.
- [20] 闫旭, 李春明. 基于模糊逻辑的可控串补线路故障分类[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 122-127.  
YAN Xu, LI Chunming. Fuzzy-logic-based fault classification in a series compensated transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 122-127.

收稿日期: 2017-08-25; 修回日期: 2017-10-30

作者简介:

李会新(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理、整定计算、继电保护原理;

王兴国(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护原理及测试; E-mail: wangxingguo@epri.sgcc.com.cn

谢俊(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理、整定计算、继电保护原理。

(编辑 魏小丽)