

## 基于突变量阻抗原理的差动保护的研究

曾铁军<sup>1</sup>, 郑茂然<sup>2</sup>, 苏泽光<sup>1</sup>, 周伟锋<sup>3</sup>, 李红<sup>4</sup>

(1. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421000; 2. 中国南方电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510623;  
3. 浙江绍兴新昌县供电局, 浙江 绍兴 312000; 4. 国网电力科学研究院信息通信技术分公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 基于网络的智能变电站母线保护若采用瞬时值数据作为差动原始数据, 则在网络性能下降时, 其保护性能将显著降低甚至出错。对相位比较型差动保护的原理进行深入的分析, 得出其在区内故障存在流出电流情况下误动的根本原因, 并据此提出基于突变量阻抗原理的差动保护。该差动保护方案同步性要求低、传输的数据量小、抗 CT 饱和能力强, 且可用于母线保护、短引线保护、站域后备保护等场合。

**关键词:** 突变量阻抗; 差动保护; 智能变电站; 母线保护; 流出电流

### Study on the differential protection based on the principle of variable impedance

ZENG Tie-jun<sup>1</sup>, ZHENG Mao-ran<sup>2</sup>, SU Ze-guang<sup>1</sup>, ZHOU Wei-feng<sup>3</sup>, LI Hong<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421000, China; 2. Dispatching and Control Center of Power Grid, China South Power Grid Company, Guangzhou 510623, China; 3. Xinchang County Power Supply Bureau, Shaoxing 312000, China; 4. Information and Communication Technology Branch, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** If network-based smart substation takes synchronous values as differential original data, the differential protection performance declines significantly or even goes wrong when the network performance decreases. The principle of phase comparison differential protection is analyzed thoroughly. The fundamental reason of malfunction is found when the current flows out of the busbar in a busbar shorted fault, based on which a differential protection is proposed based on the principle of variable impedance. The new scheme has low synchronization requirement, small amount of data to be transferred, and high CT anti-saturation ability. It can be applied to busbar protection, short-lead line protection, backup protection for the whole substation, etc.

**Key words:** variable impedance; differential protection; smart substation; busbar protection; flowed current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0115-04

## 0 引言

随着国内智能变电站的推广普及, 智能化、网络化程度的不断加深, 过程层数据的传输将主要采用 IEC61850-9-2 通信规约。电流、电压互感器采集的数据将先在合并单元中转换为数字量再经通信网络传送到继电保护装置。这样继电保护的可靠性将很大程度地依赖于通信网络的可靠性, 而一旦发生网络风暴, 通信速度及能正确及时传送的数据量将大大减小, 此时依靠大量采样值数据的幅值差动保护将不能正常工作<sup>[1-4]</sup>。此外, 由于幅值差动保护需要的各端电流流量在不同的合并单元被转化为数字量, 一旦各合并单元同步性能下降, 甚至某个合并单元丢失同步时钟, 将对差动保护产生重大不利影

响。基于上述原因, 研究同步性要求低、传送数据量小的性能优越的快速主保护显得尤为重要。

基于 KCL 的电流差动保护由于其优越的性能而作为电网主保护被广泛采用。电流差动保护的实现方式大致可以分两类: 幅值比较型电流差动保护和相位比较型电流差动保护。幅值比较型差动保护(采样值差动也可归属这一类)对参与差动的各电流流量的同步性要求高, 且需要的数据量大<sup>[5-11]</sup>; 相位比较型差动保护对同步性要求不高, 利用电磁式互感器线性传变区还可以降低甚至克服 CT 饱和的影响。传统的母联电流比较式母差保护及电流相位比较式母差保护对于区内故障存在流出电流的情形无能为力。

本文对相位比较型差动保护的原理进行深入的

分析, 得出其在区内故障存在流出电流情况下误动的根本原因, 并据此提出基于突变量阻抗原理的差动保护。该差动保护方案延续了相位比较型差动保护的优点, 即同步性要求低、传输的数据量小。

### 1 电流相位比较型差动保护

设某母线上连接有  $n$  条支路, 正常运行或发生区外短路故障时, 根据 KCL 定律可知

$$I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1} + I_n = 0 \quad (1)$$

令  $I_\Sigma = I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1}$ , 则  $I_\Sigma = -I_n$  即两者数值上相等, 相位相反。电流相位比较型差动保护正式利用这种原理, 先选择某条支路 (一般取母联断路器) 作为参考支路, 然后计算出其他支路电流之和的相位与之比较, 如果两者相位相同则判为区内故障, 如果相位相反, 则判为区外故障。

在图 1 所示某双母线接线系统中, 如果 M、N 变电站是经短线路相连, 则当 F2 点发生故障, 由于接触电阻的原因, I 母将从母联支路流出电流, 再经支路 4 流出电流经 N 变电站、支路 3 流回 I 母, 这样如果是将母联断路器支路作为参考支路, 则 I 母的电位相位比较型差动将拒动。

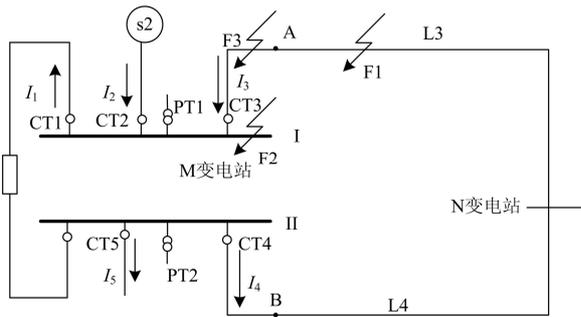


图 1 某双母线接线示意图

Fig. 1 Connection of a double-bus bus

仔细分析不难发现, 电流相位比较型差动的关键点有两个: 一是以各支路 CT 的位置为界, 区内故障时电流方向刚好相反; 二是电流方向指向线路时是指从 CT 安装处至无穷远处。如果能将方向元件的正反方向仅局限于从 CT 安装处至支路上一定电气距离处, 超出该距离时正反方向元件都不会动作, 这样就可以克服流出电流的影响 (因为流出电流是从另一支路流回的, 这点不同于区外故障)。

### 2 基于突变量阻抗原理的差动保护

定义指向母线的方向元件为正方向元件, 指向非本母线的方向元件为反方向元件。基于突变量阻抗原理的差动保护的基本思路就是寻找一种判据,

正反方向元件只将本方向上距离 CT 安装处一定距离 (如图 1 中支路 3 的 A 点即为反方向元件的区内故障) 的短路故障判为区内故障而动作, 区外故障和背向故障均不动作。假定支路 1 的反方向元件可识别的电气距离至点 A, 则当发生图 1 所示的线路故障 F1 时, 所有支路的正、反方向元件都不动作; 当发生图 1 所示的线路故障 F3 时, 所有支路的正、除支路 3 外的其他支路反方向元件都不动作, 而支路 3 的反方向元件动作; 当发生图 1 所示的线路故障 F2 时, 如果不存在流出电流的情形, 则所有支路的正方向元件都动作, 所有支路的反方向元件都不动作; 当发生图 1 所示的线路故障 F2 时, 存在如图示流出电流的情形, 则支路 1、2 的正反方向元件都不动作, 支路 3 的正方向元件动作, 支路 3 的反方向元件不动作。

根据上述分析, 在各种运行方式下都能正确区分正反方向区内故障的方向元件都可以被用来作为母线方向差动的方向元件, 且这种差动不会在母线区内故障存在流出电流情形下拒动。

突变量阻抗元件不仅工作极为安全、可靠, 不发生误动, 而且能判别故障方向, 故障点愈靠近保护安装处时, 继电器愈灵敏。其次, 采用积分方式实现时, 动作速度快, 一般情况下小于 10 ms, 在线路出口故障时, 动作时间小于 5 ms。再次, 在单侧电源线路上, 因有负荷存在, 在线路上发生故障时, 非电源侧继电器仍有较好的测量性能。由于突变量阻抗元件的这些优点, 本节提出基于突变量阻抗原理的差动保护。正反方向采用相同的判据形式。具体形式: 接地和相间突变量阻抗元件的动作方程分别如式 (2) 和式 (3)。

$$\left| \Delta \dot{U}_{op\phi} \right| = \left| \Delta (\dot{U}_\phi - (\dot{I}_\phi + K3I_0) \cdot Z_{set}) \right| \geq U_{set} \quad (2)$$

$$\left| \Delta \dot{U}_{op\phi\phi} \right| = \left| \Delta (\dot{U}_{\phi\phi} - \dot{I}_{\phi\phi} \cdot Z_{set}) \right| \geq U_{set} \quad (3)$$

$\vec{P}$  表示正方向突变量阻抗元件动作,  $\overleftarrow{P}$  表示反方向突变量阻抗元件动作, 正方向为指向母线的方向。当连接于母线上的所有支路都满足: 该支路正方向元件动作、反向元件不动作或正反方向元件都不动作, 则可判为母线故障。低压侧母线 1 段的基于突变量阻抗原理的差动保护动作表示为 ActBus1, 低压侧母线 2 段的基于突变量阻抗原理的差动保护动作表示为 ActBus2, “ $\cap$ ”表示逻辑“与”, “ $\cup$ ”表示逻辑“或”, 上划线“ $\bar{\quad}$ ”表示逻辑“非”。从而可以用真值表表示如下:

$$\text{ActBus1} = ((\overrightarrow{P11} \cap \overleftarrow{P11}) \cup (\overrightarrow{P12} \cap \overleftarrow{P12})) \cup ((\overrightarrow{P13} \cap \overleftarrow{P13}) \cup (\overrightarrow{P14} \cap \overleftarrow{P14})) \cup ((\overrightarrow{P15} \cap \overleftarrow{P15}) \cup (\overrightarrow{P16} \cap \overleftarrow{P16})) \quad (4)$$

$$\text{ActBus2} = ((\overrightarrow{P11} \cap \overleftarrow{P11}) \cup (\overrightarrow{P12} \cap \overleftarrow{P12})) \cup ((\overrightarrow{P14} \cap \overleftarrow{P14}) \cup (\overrightarrow{P15} \cap \overleftarrow{P15})) \cup ((\overrightarrow{P16} \cap \overleftarrow{P16}) \cup (\overrightarrow{P17} \cap \overleftarrow{P17})) \quad (5)$$

从式(4)、式(5)可看出,为判别出变压器或母线的故障,只需传输与保护区相关的正反突变量阻抗元件的真值即可,而真值的数据量是很小的,且对时间同步性要求低。

### 3 仿真实验

模拟系统接线如图2所示。考虑到模型的实际情况和母差保护试验的特点,共设置了6个短路点,2个大容量模拟发电机组和一个无穷大系统,满足了实验的要求。

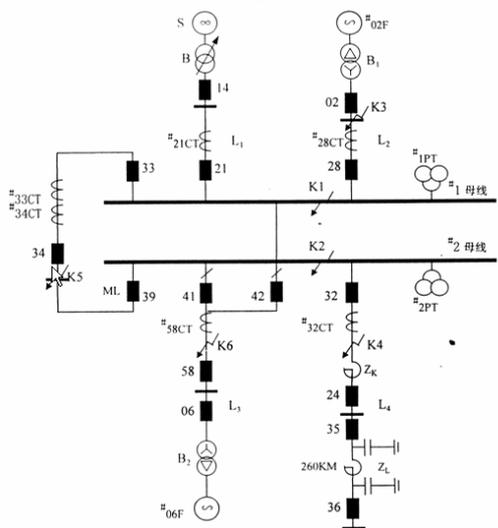


图2 仿真系统接线图

Fig. 2 Connection of simulation system

模型采用500kV模型。模拟比 $m = \text{原型}/\text{模型}$ 。功率模拟比： $m_p = 100 \text{ MVA}/1 \text{ kW} = 100000$ 。电压模拟比： $m_u = 525 \text{ kV}/800 \text{ V} = 656.25$ 。#02、#06发电机： $S = 15 \text{ kVA}$ ,  $U_e = 460/230$ ,  $\Phi = 0.8$ ,  $X_d = 0.5$ ,  $X_q = 0.132$ ,  $X_2 = 0.118$ 。无穷大系统阻抗： $Z_1 = 1.25 + j4.0$ ,  $Z_0 = 6.15 + j11.75$ 。升压变B1、B2： $U_e = 800/210$ ,  $U_k = 12\%$ 。限流电抗器 $Z_k$ ： $Z = 7.9 \angle 750 (13.9 \angle 750)$ 。线路阻抗： $L = 260 \text{ km}$ ,  $Z_1 = 1.26 + j17.4$ ,  $Z_0 = 12.168 +$

$j42.42$ 。模拟变B： $U_e = 800/400$ ,  $U_k = 14\%$ 。PT变比： $800/100/100/\sqrt{3}$ 。CT变比： $10 \text{ A}/5 \text{ A}$ 。电流： $\#21\text{CT}$ ：11a、11c。

当模拟区内故障,故障电流流出时,为K1故障,在断路器21至K1之间设置一个接触电阻 $50 \Omega$ ,断路器42支路模拟一条短线路阻抗： $L = 20 \text{ km}$ ,  $Z_1 = 1.26 + j17.4$ ,  $Z_0 = 12.168 + j42.42$ 。该支路的突变量阻抗元件的定值取为 $20 \Omega$ (接地和相间阻抗都取这个值),结果表明该支路正方向接地和相间阻抗元件都不动作,整个母线保护能正确动作。另外在转换性故障,  $K6\text{AN} \rightarrow K1\text{BN}$ 、 $K6\text{BN} \rightarrow K1\text{CN}$ 、 $K6\text{AN} \rightarrow K1\text{BCN}$ 、 $K6\text{AN} \rightarrow K2\text{BN}$ 、 $K6\text{BN} \rightarrow K2\text{CN}$ 、 $K6\text{AN} \rightarrow K2\text{BCN}$ 、 $K1\text{AN} \rightarrow K1\text{BN}$ 、 $K1\text{BN} \rightarrow K1\text{CN}$ 、 $K1\text{AN} \rightarrow K1\text{BCN}$ 、 $K2\text{AN} \rightarrow K2\text{BN}$ 、 $K1$ 时保护均能正确动作。

### 4 基于突变量阻抗原理的差动保护性能分析

基于突变量阻抗原理的差动保护性能相比于目前广泛使用的比幅式差动保护性能的提高主要体现在如下几个方面:采用网络实现时通信数据量小、抗CT饱和能力强、应用于中低压系统时易于实现。

国际国内都在大力发展智能变电站,应用于智能变电站的母线保护的数据是通过网络传输的,当网络拥挤时传输采样值数据可能会出现数据丢包,从而直接影响保护性能,甚至使得母线保护误动或者拒动。基于突变量阻抗原理的差动保护只需每条支路的方向信息,理想情况下只需要1 bit即可表示,从而可以接受更差的网络性能。另外,由于采用的是方向数据,各条支路的方向数据之间也不需要严格的同步,这将大大降低对全站对时时钟的依赖性。

基于突变量阻抗原理的差动保护是以每一条支路上的方向信息为基础的,而方向信息的识别本质上是相位信息的识别。分析电磁式CT的饱和特性可知,在每一个周期中电流瞬时值过零时,CT都会有一个线性转变区。把握这个线性转变区,则可以正确识别出相位信息,确定方向信息。

出于经济性考虑,很多中低压母线没有安装专门的母线保护装置。在改造工程中,还出现了简易母线保护,即不完全差动保护。如果原有线路支路安装有突变量阻抗保护,则基于突变量阻抗原理的差动保护只需要将其中间信息引出即可,方便实现。如不考虑电流流出,还可以直接由正向方向元件来获得简易母线保护。

### 5 结语

本文提出的基于突变量阻抗原理的差动保护采用网络实现时通信数据量小、同步性要求低、抗CT饱和能力强、且易于在中低压变电站母线保护中获得应用。此外，基于突变量阻抗原理的差动保护还可应用于短引线保护、站域后备保护等，在提高了继电保护性能的同时，易于实现。

### 参考文献

[1] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 112-116.  
LIU Hao-yu, ZUO Qun-ye, ZHANG Bao-shan. Process level network performance testing and analysis in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.

[2] 徐敏, 鲍有理, 李宝伟, 等. 智能变电站中点对点传输采样值延迟及延迟校验方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 145-149.  
XU Min, BAO You-li, LI Bao-wei, et al. Delay of point-to-point transmission of sampled values in smart substation and its calibration scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 145-149.

[3] 施婕, 艾芊. 智能电网实现的若干关键技术问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 1-4.  
SHI Jie, AI Qian. Research on several key technical problems in realization of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 1-4.

[4] 曹津平, 李伟, 秦应力, 等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 60-63.  
CAO Jin-ping, LI Wei, QIN Ying-li, et al. Research on digital substation process level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 60-63.

[5] 刘伟, 倪传坤, 杨恢宏, 等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-141.  
LIU Wei, NI Chuan-kun, YANG Hui-hong, et al. Implementation of distributed busbar protection applied to smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 139-141.

[6] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 180-186.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on

integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 180-186.

[7] 葛耀中, 董杏丽, 董新洲, 等. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究(一)——原理与判据[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 95-99.  
GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, et al. A new bus-bar protection based on current travelling waves and wavelet transform(1)——basic principle and criterion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 95-99.

[8] 葛耀中, 董杏丽, 董新洲. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究(二)——保护方案与仿真试验[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 98-101.  
GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou. A new bus-bar protection based on current travelling waves and wavelet transform(2)——scheme and simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 98-101.

[9] 刘玉东, 王增平, 张志梅. 变压器差动保护中电流互感器饱和的综合判据[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 87-90.  
LIU Yu-dong, WANG Zeng-ping, ZHANG Zhi-mei. Study on comprehensive TA saturation criterion for transformer differential protection[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 87-90.

[10] 武春艳, 和敬涵, 张浩, 等. 集成保护中母线保护设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 125-131.  
WU Chun-yan, HE Jing-han, ZHANG Hao, et al. Design of bus protection for integrated protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 125-131.

[11] 曾铁军, 宋艳, 侯玉强. 双母接线系统中线路保护、母线保护、线路断路器失灵装置一体化方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 100-103.  
ZENG Tie-jun, SONG Yan, HOU Yu-qiang. Scheme studying of the protection device combined transmission line protection, bus-bar protection and circuit breaker failure protection on double busbar connection substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 100-103.

收稿日期: 2013-04-08; 修回日期: 2013-05-17

### 作者简介:

曾铁军 (1983-), 男, 硕士, 助教, 研究方向为智能电网及电力系统继电保护; E-mail: ztj182002@163.com

郑茂然 (1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护运行管理工作;

苏泽光 (1966-), 男, 副教授, 研究方向为智能电网及电力系统继电保护。