

DOI: 10.7667/PSPC171198

# 电流互感器饱和对风电场送出线纵差保护的影响及对策

于群<sup>1</sup>, 王仲耀<sup>1</sup>, 王玉彬<sup>2</sup>, 杨曼<sup>1</sup>, 刘增训<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002;  
3. 国家电网公司发展策划部, 北京 100031)

**摘要:** 目前风电等新能源应用越来越广泛, 而风电场送出线路电流互感器的配置依旧采用常规的方法进行选型计算。当风电场送出线发生故障时, 由于风电场呈现出弱电源特性, 且输出故障电流含有大量的非周期分量使电流互感器易发生饱和现象, 从而导致送出线路纵差保护误动。利用 PSCAD 和 Matlab 软件, 针对风电场送出线路电流互感器的不同饱和情况分别进行了仿真分析。为了提高纵差保护的可靠性, 给出在保护中采用改进递推两点乘积算法的措施。仿真结果表明, 改进递推两点乘积算法能有效避免电流互感器饱和所带来的区外故障保护误动作的问题, 且计算、动作时间更快, 从而提高了送出线路纵差保护的可靠性和快速性。

**关键词:** 电流互感器饱和; 纵差保护; 影响; 仿真

## Influences and countermeasures of the saturation of current transformer to the differential protection of wind farms' output transmission line

YU Qun<sup>1</sup>, WANG Zhongyao<sup>1</sup>, WANG Yubin<sup>2</sup>, YANG Man<sup>1</sup>, LIU Zengxun<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China;  
3. Department of Development and Planning, SGCC, Beijing 100031, China)

**Abstract:** New energies, such as wind and electricity, have been widely applied. However, for the configuration of current transformer of the output transmission line in wind farms, people still do the lectotype calculation in conventional ways. When the output transmission line breaks down, the power supply of wind farms will be weak, and a large number of aperiodic components in the faulty current will be easy to make the current transformer become saturated, which will result in the malfunction of the differential protection. In the aim of improving the reliability of differential protection, we will use PSCAD and Matlab to conduct a simulation analysis on the different saturation situation of the output transmission lines, finding out the solutions to the improvements of the reliability of differential protection. The results of simulation show that the improved recursive two-point product method can effectively prevent external mal-operations caused by the current transformer saturation. Besides, the calculation and operation time of this method can be faster, which will enhance the reliability and improve the speed of the differential protection of the output transmission line.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEM13) and China Electric Power Research Institute Innovation Fund Project (No. XT83-17-002).

**Key words:** saturation of current transformer; differential protection; influence; simulation

## 0 引言

电流互感器(以下简称 CT)是电力系统中重要的传变设备, 目前广泛使用的是电磁式电流互感器, 由于近年来风电新能源技术的发展, 我国风电发展

具有集群开发、弱电网接入、长距离外送的发展模式, 非额定风速下, 故障电流频率偏移明显<sup>[1-2]</sup>, 风电场与电力系统连接时, 存在电流互感器型号不一致、不同电流互感器混用等情况, 一旦电流互感器发生饱和, 或者两侧饱和情况不同, 将给风电场送出线路纵差保护带来了极大的挑战<sup>[3]</sup>。

国内外相关学者对电流互感器饱和与风电场故障特性对保护的影响方面做了很多研究。文献[3-4]

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目资助(ZR2016EEM13);  
中国电力科学研究院创新基金项目资助(XT83-17-002)

分析了电磁式电流互感器与电子式电流互感器的不同特性,保护中 CT 混用对差动保护的影响,并提出了采用差分虚拟制动 CT 饱和开放的方法和来解决混用导致的饱和误开放问题和以 B 样条小波变换对电磁式电流互感器二次饱和和电流的饱和点进行识别的方法;文献[5-7]分析了电流互感器饱和对电网和变压器继电保护带来的影响;文献[8-10]分析了集群风电场弱电源特性对送出线路保护的影响,分别讨论了非额定风速下电压和电流波形特性,故障电流频率偏移对继电保护的影响,并采用算例来验证。

上述研究主要分析了电网中 CT 饱和对保护的影响情况,和基于一次电流的弱电源特性对风电场送出线路保护的影响情况,由于风电场故障电流非周期分量更大更易引发 CT 饱和,国内外针对风电场送出线路发生 CT 饱和及 CT 饱和情况不一致对送出线路纵差保护影响的研究相对较少。因此,深入研究 CT 饱和情况对风电场送出线路保护的影响,对风电场安全并网运行、改善送出线路继电保护有重要意义。

本文基于 EMTDC/PSCAD 软件,结合新疆哈密某地区双馈集群风电场接入系统,建立了风电场接入系统模型、送出线路纵差保护模型、CT 饱和模型,仿真分析送出线路两侧不同程度饱和和情况下纵差保护的動作特性,并借助 Matlab 软件,给出了保护中使用改进递推两点乘积算法的措施,为解决 CT 饱和引发纵差保护不正常动作提供新的解决方法。

## 1 CT 饱和特性与风场送出线短路电流特性

为了研究电流互感器铁心饱和的过渡过程,铁心磁滞回线如图 1。

由图 1 可以看出,CT 铁心饱和过程为:随着电流出现并正向增大, $H$  随之增大直至  $H_m$ ,磁感应强度  $B$  沿  $Oa$  方向达到最大值  $B_m$ ,铁心饱和;电流正向达到峰值后下降直到反向峰值,磁感应强度  $B$  沿  $a$ 、 $B_r$ 、 $-H_c$ 、 $b$  方向达到最小值  $-B_m$ ,铁心饱和;反向电流达到峰值后下降直至正向峰值,磁感应强度  $B$  沿  $b$ 、 $-B_r$ 、 $H_c$ 、 $a$  方向达到最大值  $B_m$ ,铁心经过一个循环后饱和。以上循环过程围成曲线即为电流互感器铁心饱和磁滞回线。根据不同一次电流的值,磁滞回线也不尽相同,构成磁滞回线族,以上为 CT 饱和机理与特性<sup>[11]</sup>。

电力系统线路发生金属性短路故障时线路短路电流由强制分量和非周期分量两部分构成,当短路初始角  $\theta=0$  时,非周期分量最大,此时短路电流为

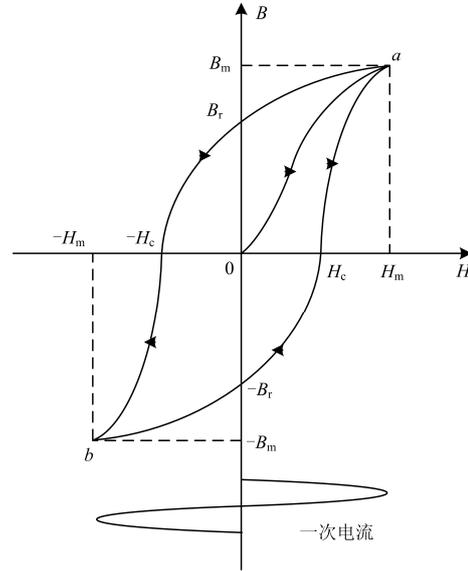


图 1 电流互感器铁心磁滞回线

Fig. 1 Iron core magnetic hysteresis loop of the current transformer

全偏移情况。IEC 标准及国家标准中,暂态特性计算一般取短路电流全偏移情况,设 CT 变比为 1,考虑偏移系数  $\cos\theta=0$  (无偏移)与  $\cos\theta=1$  (全偏移)时,磁场强度分别为

$$H_{(0^\circ)} = I_{\max} \frac{R_2}{\omega} \cos \omega t + H_0 \quad (1)$$

$$H_{(90^\circ)} = I_{\max} \frac{R_2}{\omega} [\sin \omega t - \omega T_1 (1 - \lambda^{-\frac{1}{T_1}})] + H_0 \quad (2)$$

式中, $H_0$  为故障开始时铁心的剩磁。由式(1)和式(2)可得,故障电流中非周期分量对 CT 特性有非常大的影响。

文献[12-15]研究表明,风电机组短路时风电机组同时表现出异步电机和变压器的故障特性,投入 Crowbar 电路阶段时间短暂,波形复杂,一般持续 3~5 ms,风电场线路三相故障电流  $i_s$  可以近似表示为

$$i_s \approx a_1 \cos(\omega_1 t + \phi) + a_2 e^{-t/T_s'} \cos \phi + a_3 e^{-t/T_r'} \cos(\omega_1 t + \phi) \quad (3)$$

式中: $\phi$  为投入 Crowbar 电路时的初始相位角; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为常数; $\omega_1$  为电网角频率; $\omega_r$  为转子转角频率; $T_s'$ 、 $T_r'$  分别为定子回路和转子回路的时间常数。

由式(3)可得,送出线路故障电流近似由稳态交流分量、衰减直流分量以及衰减交流分量三部分构成,风电场短路电流中衰减直流分量和衰减交流分量含量较大,这些非周期分量是引起 CT 饱和的重要原因。

目前对风电场内 CT 饱和的研究较少, CT 饱和对送出线纵差保护的影响鲜有文献介绍, 由于大规模风电接入, 故障电流成分复杂、理论分析困难, 且非周期分量含量高易引发 CT 饱和, 因此采用仿真分析的手段研究风电场送出线路 CT 饱和后纵差保护能否正确动作是非常有必要的, 因此本文将建立风电场送出线路纵差保护仿真模型, 针对 CT 饱和不同情况进行仿真研究。

## 2 模型整体结构

### 2.1 风电场接入系统简化模型

以新疆哈密某地区双馈集群风电场为例, 风电场共有50台风机, 风电场接入系统如图2。风机经箱变升压至35 kV经汇集线汇集至汇集站, 再经汇集站主变升压至110 kV, 经过110 kV送出线路连接至110 kV电力系统。

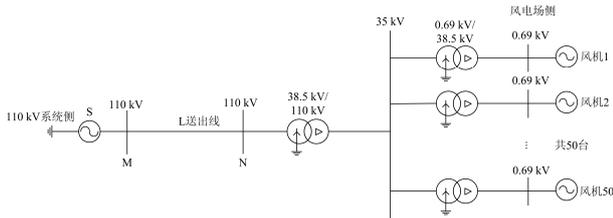


图 2 某地区风电场接入系统

Fig. 2 Access system of certain area's wind farm

系统电源电压为110 kV, 内阻 $2.5 \Omega$ , 送出线L与风电场相连, 线路型号为LJGJ-240/40, 正序阻抗为 $0.034+j0.307 \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗为 $0.283+j0.926 \Omega/\text{km}$ , 线路长度为50 km; 双馈集群汇集站主变额定容量为150 MVA, 额定电压为38.5 kV/110 kV, 电压百分比为 $U_k\%=10.5$ ; 风机箱变额定容量为2 MVA, 额定电压为0.69 V/38.5 kV, 电压百分比为 $U_k\%=6.5$ ; 双馈风机机组额定容量为1.5 MW, 额定电压为0.69 kV, 定子阻抗为 $0.007174+j0.1386 \text{ p.u.}$ , 转子阻抗为 $0.008749+j0.1493 \text{ p.u.}$ , 激磁电抗为 $3.9370 \text{ p.u.}$ , 转动惯量为3.5 s。仿真运行15 s时故障, 持续时间0.2 s。

### 2.2 CT 模型与纵差保护模型

本文搭建了基于 Jiles-Atherton 铁磁磁滞理论的 J-A 电流互感器模型和计及二次电流传变特性的自定义纵差保护模型。

CT 模型如图 3, 纵差保护模型如图 4。使用“Multimeter”元件测量图 2 中送出线 M 侧和 N 侧电流, 一次电流经“Current Transformer(CT)-JA Model”元件传变得二次电流波形。互感器设置变比为 1/400, 额定二次电流为 1 A, 二次绕组阻抗为  $5 \Omega$ , 铁心平均截面积为  $2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , 额定输出

为 10 VA, 设置比率制动系数  $K_{res}$  为 0.5。

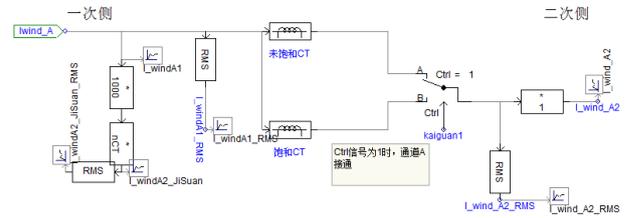


图 3 电流互感器饱和与未饱和模型

Fig. 3 Saturated and unsaturated model of the current system

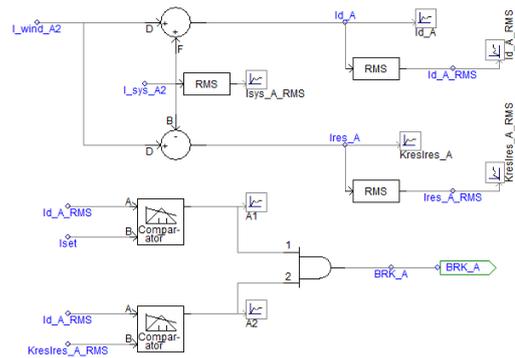


图 4 比率制动纵差保护模型

Fig. 4 Model of breaking type longitudinal differential protection

## 3 仿真及结果分析

### 3.1 仿真简介

PSCAD 仿真总体模型如图 5。故障位置位于送出线路 L 中间 50%处, 相分设置微机比率制动纵差保护, 故障发生时投入风机 Crowbar 保护电路, 以 A 相发生金属性接地短路为例, 使用傅里叶算法对送出线路纵差保护区内、区外故障进行仿真。针对 CT 不同饱和情况, 将对以下三种情况进行仿真:

- 1) M、N 两侧 CT 未饱和;
- 2) M、N 两侧 CT 饱和且饱和情况近似;
- 3) M、N 两侧 CT 饱和且情况相差较大甚至 CT 一侧饱和一侧轻微饱和。

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 电流互感器未饱和情况

CT 未饱和时, 区内故障微机保护情况如图 6, 其中差动与制动电流对比波形为图 6(a), 保护动作情况为图 6(b); 区外故障时微机保护情况如图 7, 其中差动电流与制动电流对比波形为图 7(a), 保护动作情况为图 7(b)。

由图 6 和图 7 可得, CT 未饱和时, 正常运行状态差动电流远小于制动电流, 依靠制动电流对保护制动, 线路正常运行; 区内故障时, 差动电流骤增并远大于制动电流, 断路器动作; 区外故障时制动

电流骤增, 一直持续大于差动电流, 断路器不动作。

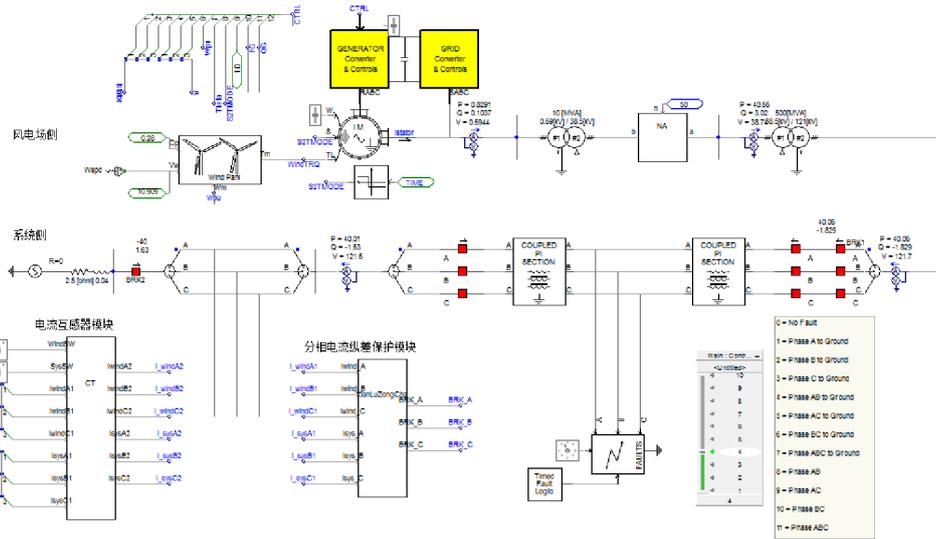
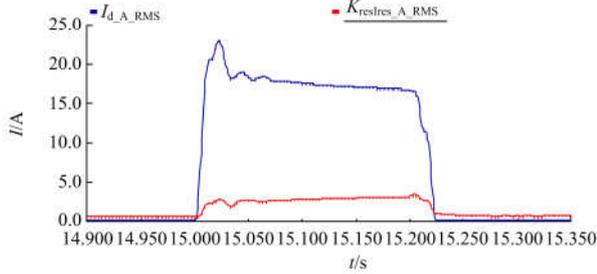
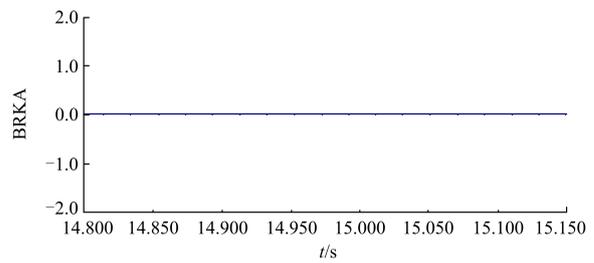


图 5 PSCAD 仿真总体模型

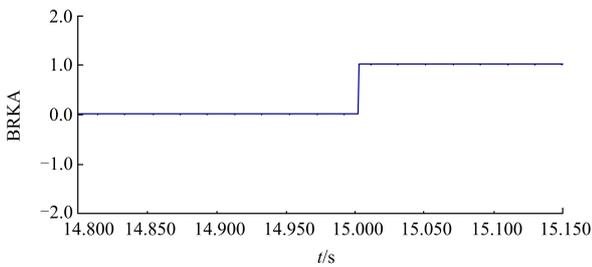
Fig. 5 A general PSCAD simulation model



(a) 差动与制动电流对比



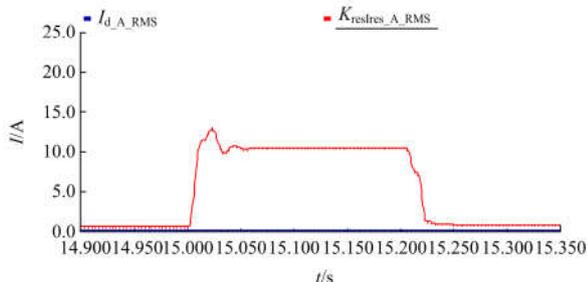
(b) 保护动作情况



(b) 保护动作情况

图 6 CT 未饱和、区内故障时微机保护情况

Fig. 6 Situation of microprocessor when the CT is not saturated or internal malfunctioning happens



(a) 差动与制动电流对比

图 7 CT 未饱和、区外故障时微机保护情况

Fig. 7 Situation of microprocessor when the CT is not saturated or external malfunctioning happens

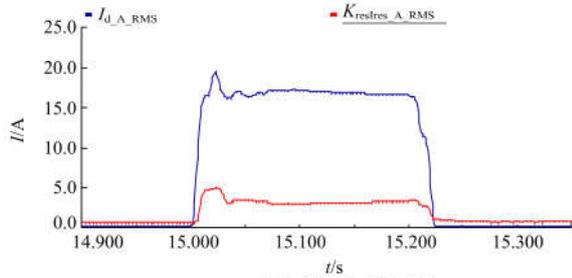
因此 CT 未发生饱和时, 保护动作正常, 仿真模型搭建符合实际。

### 3.2.2 电流互感器发生饱和情况

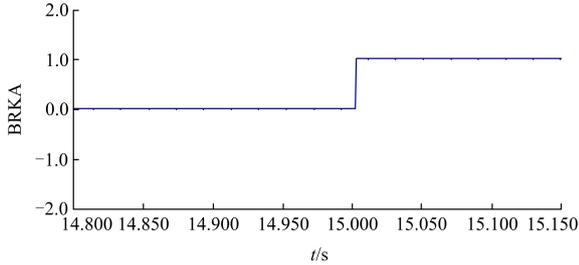
1) M、N 两侧 CT 同时饱和且饱和情况近似, 由于纵差保护原理是对比差动电流和制动电流, 在发生区内故障和区外故障时, CT 饱和和相当于 M、N 两侧电流采样值同时减小, 与未饱和情况近似, 对保护的正常动作影响不大, 仅会造成动作灵敏度降低或略有延迟, 此处不作过多分析。

2) M、N 两侧 CT 饱和且情况相差较大甚至 CT 一侧饱和和一侧轻微饱和, 仿真结果为:

区内故障时微机保护情况如图 8, 其中差动电流与制动电流对比波形为图 8(a)、保护动作情况为图 8(b); 区外故障时微机保护情况如图 9, 其中差动电流与制动电流对比波形为图 9(a), 保护动作情况为图 9(b)。



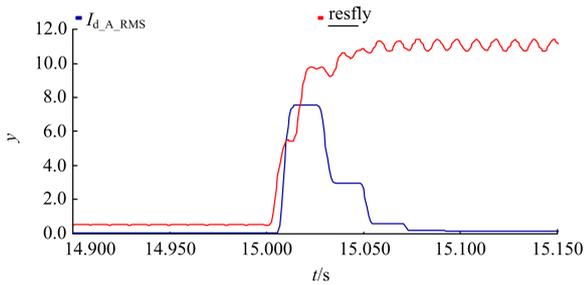
(a) 差动与制动电流对比



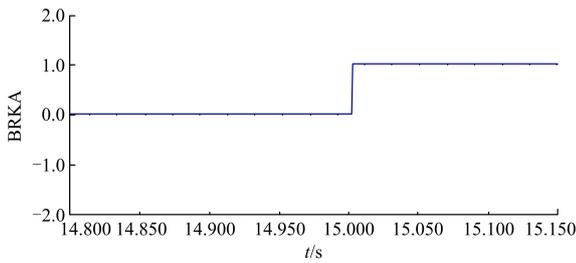
(b) 保护动作情况

图 8 CT 饱和、区内故障时微机保护情况

Fig. 8 Situation of microprocessor when the CT is saturated or internal malfunctioning happens



(a) 差动与制动电流对比



(b) 保护动作情况

图 9 CT 饱和、区外故障时微机保护情况

Fig. 9 Situation of microprocessor when the CT is saturated or external malfunctioning happens

由图 8 和图 9 可得, CT 饱和发生区内故障时, 故障时刻差动电流骤增远大于制动电流, 断路器动作; 区外故障时制动电流骤增, 本应制动电流持续大于差动电流, 但是由于全波傅立叶算法数据窗时间长, 保护装置中电流正确采样需一个数据窗, 在此过程由于 CT 饱和导致电流波形幅值降低, 出现

了局部制动电流小于差动电流的情况, 使得断路器误动。

上述三种类型仿真结果汇总见表 1。仿真结果表明风电场送出线路两侧电流互感器发生不同情况饱和时, 区内故障保护动作情况相对正常, 区外故障保护易出现误动。

表 1 仿真结果汇总

Table 1 Summary of the simulation results

故障位置	CT 未饱和	CT 饱和	
		M、N 两侧 CT 饱和且饱和情况近似	M、N 两侧 CT 饱和且情况相差较大甚至电流互感器一侧饱和一侧轻微饱和
区内	正常	正常动作但时间延迟	正常动作但时间延迟
区外	正常	正常动作但时间延迟	误动

#### 4 电流互感器饱和引起保护误动的对策

相关专家和学者提出了一些抗饱和措施, 例如更换新型电流互感器、增大互感器变比、改进一次侧参数等, 但更换新型电流互感器设备数量多、费用高, 增大变比易造成二次电流减小不易整定, 影响继保准确性, 改进一次侧参数计算复杂, 效果微乎其微<sup>[6]</sup>。微机保护中广泛使用傅立叶算法, 该算法虽可以滤去多次谐波, 但受输入模拟量中非周期分量的影响较大<sup>[16]</sup>, 因此本文从微机保护装置算法角度进行改进, 针对电流互感器饱和易引起区外故障误动的问题, 给出了保护中使用改进递推两点乘积算法的措施, 并使用 Matlab 软件进行仿真。

两点乘积算法是在一个周期中, 每隔 1/4 个周期进行一次采样, 设  $i_1$  和  $i_2$  分别是两个相隔为  $90^\circ$  的采样时刻  $n_1$  和  $n_2$  的采样值, 可得电流有效值和相位为<sup>[17]</sup>

$$I = \sqrt{(i_1^2 + i_2^2)} / 2 \quad (4)$$

$$\theta_{ii} = \arctan(i_1 / i_2) \quad (5)$$

本文对两点乘积算法进行了递推改进, 每个采样周期共选择 24 个数据点, 间隔  $90^\circ$  进行两点乘积采样后, 将数据点向后推进一个再计算, 使得每个周波有效值进行 24 次两点乘积计算求得, 改进后算法较之前更精确, 数据利用更合理。

本文将 PSCAD 故障电流波形导出在 Matlab 软件中采用不同算法进行有效值求解, CT 未饱和时, 两种算法算有效值如图 10, 两种算法计算有效值几乎没有差别。

CT 饱和时, 采用傅立叶算法与改进递推两点乘积算法两种算法得到的有效值与未饱和时原始波形有效值对比如图 11。

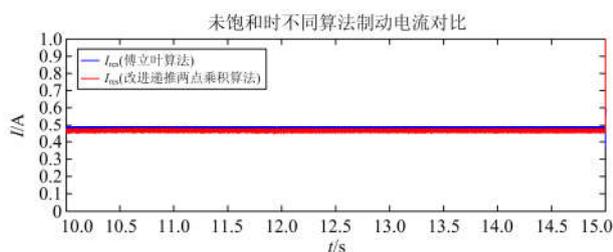


图 10 未饱和时两种算法采样值对比

Fig. 10 Comparison of the sample between two methods at the unsaturated situation

由图 11 可得, CT 饱和后, 由于傅立叶算法数据窗是一个周期, 且 CT 饱和使电流波形畸变、幅值降低, 一个采样周期后才得到有效值, 且计算得出的有效值偏小; 而改进递推两点乘积算法数据窗仅为 1/4 个周期只使用 3 个点即可快速得到有效值, 能更好还原电流原本未饱和时的波形。

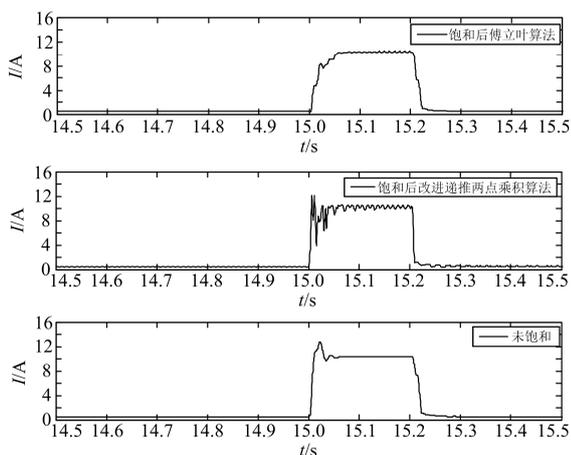


图 11 饱和时两种算法与未饱和有效值对比

Fig. 11 Comparison between two methods at the situation of saturated and unsaturated

在 PSCAD 送出线纵差模型中使用两种不同算法, CT 饱和情况下区外故障仿真分析结果如图 12。

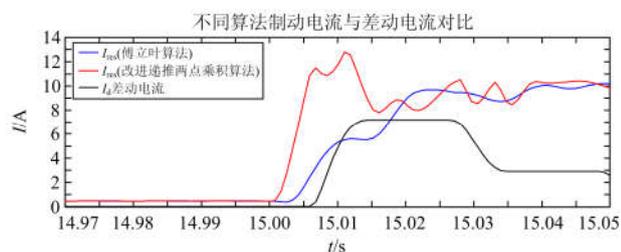


图 12 改进递推两点乘积算法的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of the improved recursive two-point algorithm

由图 12 分析可得采用改进递推两点乘积算法只需 6 ms 左右便可完成参数计算, 波形还原度高, 故障后制动电流始终保持大于差动电流, 受 CT 饱和和影响造成的幅值衰减较小, 送出线路发生区外故障时, 纵差保护不再误动。

由以上分析可得, 采用改进两点乘积算法能有效避免 CT 饱和带来的采样值减小的问题, 防止 CT 饱和时区外故障微机保护误动作。只需在微机保护中进行软件操作改进算法, 操作简单易行, 且数据窗短、速度快。因此采用改进两点乘积算法可以有效地提高风场送线路纵差保护的可靠性。

## 5 结论

风电场弱馈等特性使得送出线故障电流非周期分量和谐波含量高易引发 CT 饱和, 本文使用 PSCAD 软件仿真分析了 CT 饱和对风场送出线纵差保护带来的影响, 仿真结果表明, CT 饱和易引起场送出线区外故障保护误动作。针对此问题本文提出了在微机保护中采用改进递推两点乘积算法的措施, 并使用 Matlab 软件对微机保护中常用的傅立叶算法与改进算法进行了对比分析。结果表明, 改进递推两点乘积算法能有效防止区外故障纵差保护误动问题, 且保护动作速度快, 可有效提高风场送出线纵差保护的可靠性。

## 参考文献

- [1] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-5, 11.  
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5, 11.
- [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.  
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [3] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.  
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line

- differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [4] 王钊. 电磁式和光电式电流互感器混用对线路差动保护影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.  
WANG Tan. Research on the influence of mixed use of electromagnetic and electro-optical current transformer in differential protection[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [5] HAJIPOUR E, VAKILIAN M, SANAYE-PASAND M, et al. Current-transformer saturation compensation for transformer differential relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2293-2302.
- [6] 陈建玉, 孟宪民, 张振旗, 等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 54-56.  
CHEN Jianyu, MENG Xianmin, ZHANG Zhenqi, et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 54-56.
- [7] 于梦瑶, 于群, 史建省, 等. 电流互感器饱和对低压电动机保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 78-82.  
YU Mengyao, YU Qun, SHI Jiansheng, et al. Influences and countermeasures for saturation of current transformers on low voltage motors protections[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 78-82.
- [8] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.  
HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impact of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.
- [9] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.  
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.
- [10] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.  
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.
- [11] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [12] 潘文霞, 杨刚, 刘明洋, 等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3629-3634, 3382.  
PAN Wenxia, YANG Gang, LIU Mingyang, et al. Calculation of short-circuit current of DFIG with the considering of crowbar resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3629-3634, 3382.
- [13] 曹娜, 于群. 风电场建模技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [14] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.  
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [15] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.  
HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [16] 叶汉民, 谭惠尹, 穆晓慧. 基于傅里叶算法的衰减直流分量消除的研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(2): 15-20.  
YE Hanmin, TAN Huiyin, MU Xiaohui. A research on eliminating decaying DC component based on Fourier algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(2): 15-20.
- [17] 于群, 曹娜. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

收稿日期: 2017-08-09; 修回日期: 2017-09-26

作者简介:

于群(1970—), 男, 教授, 研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全分析; E-mail: yuqun\_70@163.com

王仲耀(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: sdkdwzy@163.com

(编辑 周金梅)