

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180984

## 双馈风场进线对 220 kV 母线采样值差动保护的影响

宋杰辉, 杨炳元, 吴俊杰

(内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

**摘要:** 由于采样值差动保护具有计算速度快、易考虑 CT 饱和等优点而被普遍应用于当前的母线保护装置中。然而暂态特性不同于传统火电机组的双馈风电机组大量接入电力系统, 这会给现有的继电保护带来严重的挑战。以双馈风电场远距离接入 220 kV 电压等级变电站母线为例, 在 RTDS 仿真平台上研究双馈风场进线对母线采样值差动保护的影响。结果表明, 在母线区内故障时风场侧支路提供的短路电流存在弱馈、高谐波及频率偏移等特点。与此同时, 计及 CT 饱和、双馈机组本身的无功优化控制策略等因素影响, 使得该短路电流的复杂性更加突显, 进而造成传统母线采样值差动保护动作有延迟。为此, 提出了一种自适应变数据窗的采样值差动保护判据, 并通过 RTDS 仿真平台验证了该方法行之有效。

**关键词:** 母线; 采样值差动保护; 双馈风场; 频率偏移; CT 饱和; RTDS

### Influence of double fed wind field incoming line on sampled value differential protection of 220 kV bus

SONG Jiehui, YANG Bingyuan, WU Junjie

(School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

**Abstract:** Because the sampled value differential protection has the advantages of fast calculation speed and easy consideration of CT saturation, it is widely used in current busbar protection devices. However, when doubly fed induction generators, which have different transient characteristics from traditional thermal power units, are widely connected into power systems, it will bring serious challenges to the existing relay protection. Taking the doubly-fed wind farm connected to the busbar of 220 kV substation as an example, the influence of doubly fed wind field incoming line on busbar sampled value differential protection is studied on the RTDS simulation platform. It is found that the short-circuit current provided by the wind side branch has the characteristics of weak feed, high harmonic and frequency offset when the fault occurs in the busbar area. At the same time, taking into account the CT saturation, doubly-fed unit itself reactive power optimization control strategy and other factors, it makes the complexity of the short-circuit current more prominent and results in the traditional busbar sampled value differential protection action being delayed. For this reason, a criterion for sampled value differential protection of adaptive variable data window is proposed, and the method is validated by RTDS simulation platform.

This work is supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2018LH05032).

**Key words:** busbar; sampled value differential protection; doubly-fed wind farm; frequency offset; CT saturation; RTDS

## 0 引言

母线作为电力系统的一个重要元件, 其保护必须满足选择性、速动性、灵敏性和可靠性。由于采样值差动保护算法简单、运算速度快、易考虑 CT 饱和等优点而被广泛运用于母线保护装置中<sup>[1-2]</sup>。当

采样值差动保护动作判据确保其数据窗长于 1/4 个工频周波时长时, 采样值差动保护可以等于或者优于常规电流差动保护<sup>[3]</sup>。为了保障采样值差动保护的可靠性, 通常需要进行连续  $R$  次判断是否满足动作方程, 当且仅当满足规定的  $S$  次时, 才能使保护动作于出口跳闸<sup>[4]</sup>。为避免区外故障引起 CT 饱和而造成母线保护误动, 通常利用 CT 时差法<sup>[5-7]</sup>、小波变换法<sup>[8]</sup>等来判断故障点发生在母线保护的区内还是区外, 进而来开放或闭锁母差保护。因为即使

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目资助(2018LH05032)

CT 深度饱和也会存在故障初期 3~5 ms 的线性传变区, 这为采样值差动保护本身抗 CT 饱和提供了保障。

随着风电等大规模新能源接入电力系统, 这会给基于常规同步发电机整定的继电保护带来严重的挑战<sup>[9]</sup>。风机类型、运行状态、控制策略、故障类型及风电场的弱馈特性等因素都将影响风电接入电力系统的故障电流<sup>[10-11]</sup>。双馈风机在低电压穿越期间投入 Crowbar 保护电路, 会使其定子电流发生频率偏移<sup>[1,12-14]</sup>, 进而造成差动保护动作延迟<sup>[1,12-13]</sup>。然而, 此类文献并未详实分析造成采样值差动保护动作时间有延迟的确切原因。此外, 独特的本体结构和控制策略导致双馈机组在故障期间会产生不同程度的谐波分量<sup>[15]</sup>。

鉴于当前学者仅限于研究风电机组的故障特性或者单纯研究母线采样值差动保护的情况较多, 而对双馈风场出线接入高电压等级的变电站后, 结合双馈风电机组的新能源电源特点来分析常规的采样值差动保护动作适应性较少。为此在借鉴上述文献成果的基础上, 利用 RTDS 仿真工具搭建了一个含双馈风场进线的母线仿真系统和母线采样值差动保护模型, 以此为依托分析高比例风电接入对母线采样值差动保护的影响。

## 1 母线采样值差动保护

### 1.1 母线采样值差动基本原理及仿真实践

母线采样值差动保护采用比率制动特性判据。母线上所有支路的电流采样值和其向量值一样均满足基尔霍夫电流定律, 即母线正常运行或者区外故障时所有流入和流出母线的电流采样值和为零, 区内故障时母线上所有支路电流采样值和为非零值。以模和制动判据为例, 比率制动式电流采样值差动保护基本判据为

$$I_d = \left| \sum_{i=1}^n I_i \right| \quad (1)$$

$$I_r = \sum_{i=1}^n |I_i| \quad (2)$$

$$I_d > I_0 \quad (3)$$

$$I_d > KI_r \quad (4)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $\dots$ 、 $I_n$  为母线上各支路电流;  $I_d$  为差动电流;  $I_r$  为制动电流;  $I_0$  为差动电流门槛值;  $K$  为比例系数。比率制动特性曲线如图 1 所示。

本文中的实验数据为: 采样频率 1 200 Hz, 即每周波 24 个采样点;  $I_0$  为 0.75 A,  $K$  为 0.5。

传统的采样值差动保护在上述情况下, 数据窗固定,  $R$  取 18,  $S$  取 16。这意味着连续 18 次判断

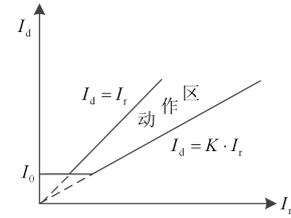


图 1 比率制动特性式动作曲线

Fig. 1 Operating characteristics of percentage differential protection

采样值是否满足上述动作方程, 只有在该数据窗内满足 16 次时才动作于保护出口。

本文在传统采样值差动保护基础上改进了其算法, 采取了自适应变数据窗算法, 具体做法如下:

首先, 运用时差法(数据窗较短, 使用 2~3 个采样点)判别发生故障为母线区内故障还是母线区外故障;

其次, 若判为母线区内故障时, 则采用短数据窗算法(即  $R$  取 11,  $S$  取 6), 保证区内故障采样值差动保护的快速性; 若判为母线区外故障时, 则采用长数据窗算法(即  $R$  取 18,  $S$  取 16), 保证区外故障时采样值差动保护的可靠性, 同时也兼顾了判为区外故障后又发生区外转区内故障时采样值差动保护能可靠动作。

### 1.2 CT 饱和对母线采样值差动的影响

CT 饱和是影响母线采样值差动保护正确动作的主要因素之一。在故障电流中衰减的非周期分量易造成 CT 暂态饱和, 不含非周期分量部分造成 CT 稳态饱和<sup>[6]</sup>。

通常在母线区外故障时, 故障支路由于要流过所有支路电流总和, 这容易使得该支路电流互感器饱和。在模和制动判据下, 由于 CT 饱和往往会使得差动电流增加, 相应地制动电流减小, 易造成母差保护误动作。

对于区内故障发生时, 尤其是含有双馈风电机组的新能源电源提供的占比较高的衰减直流分量易使支路 CT 造成暂态饱和, 从而使差动电流变小。同时, 加上风电机组的弱馈特性影响, 会导致差动电流小于差动电流的门槛值而使母差保护拒动。

### 1.3 电流频率偏移对母线采样值差动的影响

为了更简洁地分析采样值差动保护中由于采样电流频率不同对模和制动判据的影响, 假设母线上只有  $i_1 = \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$  和  $i_2 = \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$  两个支路。区内发生故障时, 同时假设两个支路电流的初相角均为零; 支路 1 的电流频率维持 50 Hz 不变, 支路 2 的电流频率分别取 40 Hz、50 Hz、60 Hz。在模和

制动判断中差动电流和制动电流情况如图 2 所示。

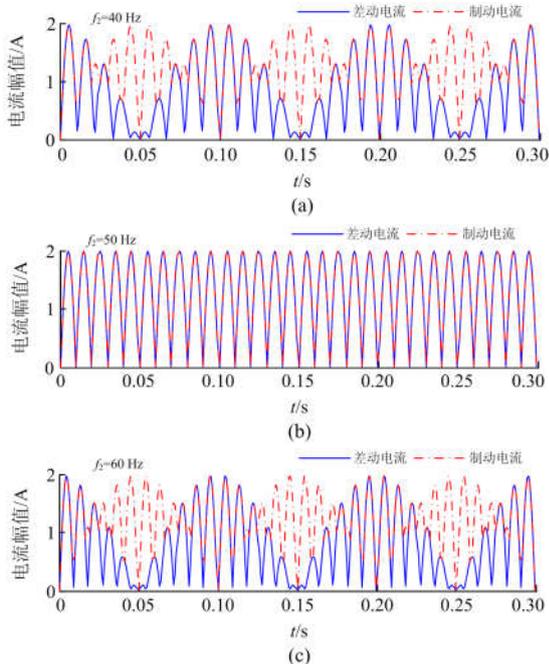


图 2 差动电流和制动电流关系曲线

Fig. 2 Differential current and braking current curve

如图 2(a)与图 2(c)所示, 两个支路电流频率不相等时, 在文中描述的模和制动判据下, 制动电流不再等于差动电流, 有一部分制动电流明显大于差动电流, 这将造成母线采样值差动保护灵敏度下降或者拒动。产生这种现象的原因是保护装置采用的是异步采样方式(即等间隔采样)。

## 2 仿真系统和短路试验

搭建具有低电压穿越能力的双馈机组模型<sup>[10,14]</sup>, 正常运行期间, 有功参考值设置原则为: 在转子侧变流器根据风能的最佳利用率来设置; 在网侧变流器依据维持直流母线电压恒定来设定。无功参考值按照双馈机组正常运行时其励磁无功电流由定子、转子双方共同承担原则来设置。采取上述参考值设定方法可以使双馈机组运行效率最佳且损耗最小<sup>[16]</sup>。

在故障期间, 当转子电流超过额定值的 1.5 倍时, 将闭锁转子侧变流器, 同时投入 Crowbar 保护电路, Crowbar 电阻  $0.026 \Omega$  (20 倍转子电阻)<sup>[17-18]</sup>。Crowbar 投入期间, 改变网侧  $q$  轴电流分量参考值, 使网侧变流器提供无功支撑电压恢复<sup>[19]</sup>。

双馈风电机组出线接入母线后, 母线采样值差动保护测试系统如图 3 所示。

双馈风场额定功率为 100 MW, 火电机组额定功率为 120 MW, 负荷为 100 MW。稳态运行时

功率出力情况为: 双馈机组发 96.35 MW, 火电机组发 109.13 MW, 负荷吸收 100.00 MW, 此时往系统输送功率 103.30 MW。变压器 T1 变比为 0.69/35 kV, 变压器 T2 变比为 35/242 kV, 变压器 T3 变比为 10.5/242 kV, 线路 L1 为 50 km, L2 至 L4 均为 100 km, 线路采用 Bergeron 模型。CT 的基本参数见表 1。

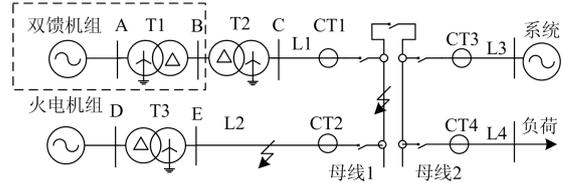


图 3 含双馈风电场进线的母线保护测试系统

Fig. 3 Busbar protection test system with incoming line of doubly-fed wind farm

表 1 CT 基本参数

Table 1 CT parameters

参数	数值	参数	数值
负载电阻/ $\Omega$	0.5	二次绕组电阻/ $\Omega$	0.5
负载电感/H	0.035	二次绕组电感/H	0.008
铁芯横截面积/ $m^2$	0.065	互感器变比	100
铁芯长度/m	0.5	铁芯损耗/%	15

在 RTDS 仿真软件中, 元件库提供 CT、CVT 和 PT 元件, 这些元件可以用来准确反映互感器特性。对于 CT 来说, 还需要输入 10 组 B-H(磁通密度与磁场强度关系)曲线数据。然后通过最小二乘法或固定线性斜率来拟合出完整的 CT 曲线; 或者采用 10 组从二次绕组实验测得的 V-I 曲线, 该曲线可以直接向铭牌标的互感器生产厂家索取; 也可以完全采用 CT 材料本身的物理数据。

在以下实验中, 默认的故障发生时刻为母线 1 的 A 相电压过零点时, 故障持续时长为 0.2 s。

### 2.1 不同故障类型下双馈机组提供的故障电流

图 4 为在母线 1 处发生不同故障类型时 CT1 的一次侧电流波形。

通过图 4 可以发现, 当发生单相接地故障或两相接地故障时, 双馈风电机组提供的故障相电流和非故障相电流差别不大。这表明双馈机组与传统火电机组提供的故障电流特征是不同的。此外, 在发生单相接地故障时, 一次侧三相电流近似同相位。这是由于三相电流中含有较大零序分量引起的。

### 2.2 CT 饱和对二次侧电流的影响

图 5 为母线 1 发生 A 相短路故障时 CT1 至 CT4 的二次侧三相电流波形。

通过图 5 中 CT1 的电流波形与图 4 中发生 A 相接地故障的电流波形对比得出, 电流互感器二次

侧电流受 CT 饱和因素影响, 其二次侧电流值不能正确反映一次侧电流波形。对图 5 中描述的 CT1 和 CT2 两个互感器的一次侧电流波形进行傅里叶分析, 分析结果如图 6 所示。

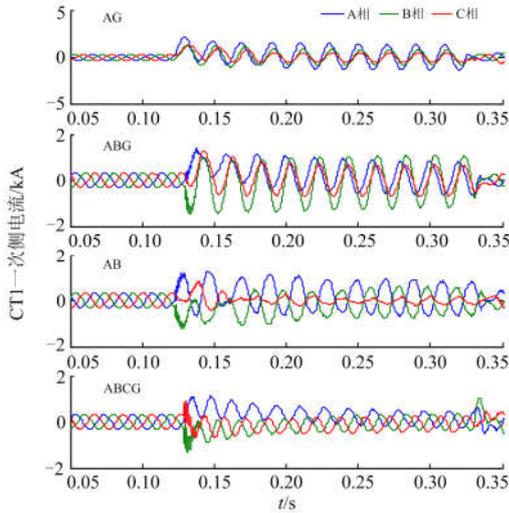


图 4 不同故障类型下 CT1 的一次侧电流

Fig. 4 Primary current of CT1 under different fault types

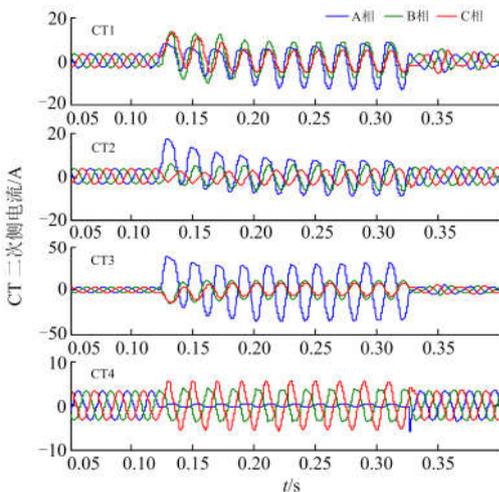


图 5 发生 A 相接地故障时 CT 二次侧电流波形

Fig. 5 Secondary side current waveform of CT in the case of A-phase grounding fault

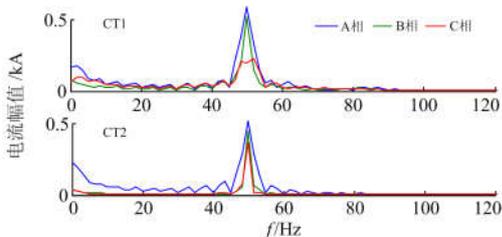


图 6 发生 A 相接地故障时傅里叶频谱分析

Fig. 6 Fourier spectrum analysis when A-phase ground fault occurs

通过傅里叶分析, 火电机组和双馈机组在系统故障期间, 两者提供的故障相电流中直流分量是近似相等的。但在非故障相电流中双馈机组侧提供的直流分量要明显大于火电机组侧提供的直流分量。对于风场接入侧 CT1 来说, 由于 A 相本身的故障相电流略大于非故障相电流, 再加上 CT 受非周期分量影响, 致使 CT1 的二次侧电流出现故障相电流小于非故障相电流情况。

### 2.3 双馈机组的无功优化策略对故障电流的影响

以母线 1 发生三相短路故障情况为例, 对双馈机组在系统故障期间分别采用未进行无功优化和进行无功优化两种控制方案进行仿真实验。实验结果中 CT1 的二次侧电流波形如图 7 所示。

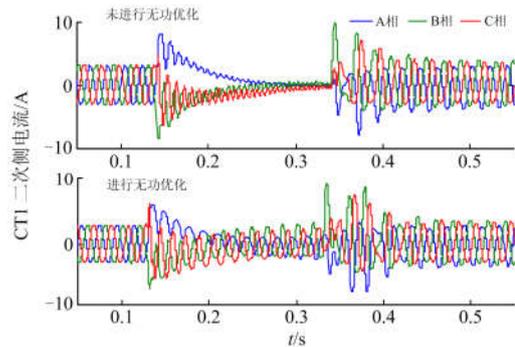


图 7 发生三相短路故障时 CT1 二次侧电流波形

Fig. 7 Secondary side current waveform of CT1 when a three-phase short circuit fault occurs

研究表明(如图 7 所示), 双馈风机在低电压穿越期间, 对双馈机组不进行无功优化调节时, 定子的三相电流会持续衰减, 直至衰减为零值左右。当故障电流持续变小会使得故障电流和制动电流同时变小, 此时制动电流乘以比例系数的数值和差动电流数值区别不大, 会使母线采样值保护拒动。而对双馈机组进行无功优化调节时, 定子的三相电流会维持在一个恒定值。从电流幅值方面分析, 双馈机组采用无功优化控制策略对采样值差动保护有利。

图 8 是对图 7 中描述的三相电流分别进行傅里叶频谱分析的结果。

通过傅里叶分析可以发现, 在母线发生三相短路故障时, 采用无功优化控制策略的双馈机组其定子电流会增大 60 Hz 左右频率的电流分量。该分量是由于 Crowbar 电路投入后, 定子电流中含有转子转速角频率分量造成(风机转子转速角频率约为 1.2 p.u.)<sup>[20]</sup>。而电流频率发生偏移会使采样值差动保护灵敏度下降或拒动。从电流频率方面分析, 双馈机组在低电压穿越期间采用无功优化控制策略会对采样值差动保护产生不利的影响。

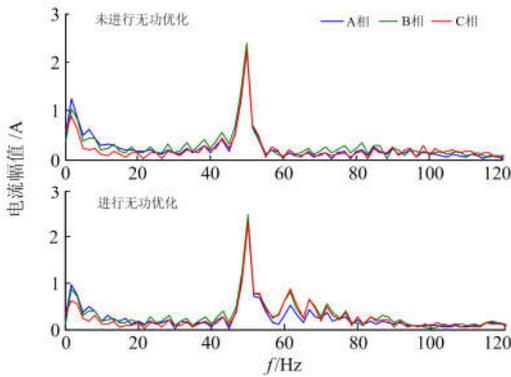


图 8 发生三相短路故障时傅里叶频谱分析  
Fig. 8 Fourier spectrum analysis when a three-phase short circuit fault occurs

### 3 区内外故障时母线保护的動作情况

#### 3.1 区内故障时母线保护的動作情况

首先，设定母线采样值差动保护采用传统保护控制策略(固定数据窗  $R=18, S=16$ )。研究了在母线 1 发生不同故障类型时母线采样值差动保护满足动作判据的次数情况(如图 9 所示)。

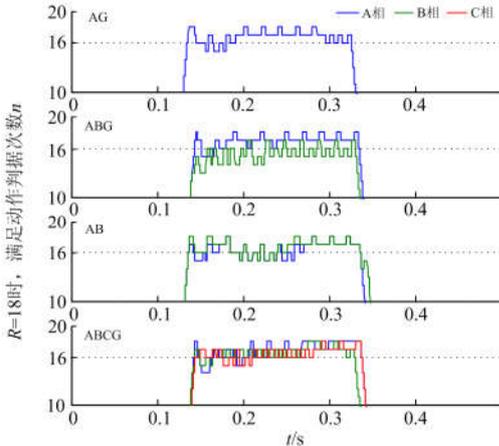


图 9  $R=18$  时，区内故障时满足动作判据次数  
Fig. 9 When  $R=18$ , the number of action criteria is met when the fault occurs in the zone

通过图 9 可知，当母线发生单相接地故障时，在故障初期母线采样值差动保护呈现出为数不多的几次未能在规定的窗口内满足 16 次动作判据的现象，而故障后期均可以满足 16 次保护判据。这表明在发生单相接地故障时母线采样值差动保护是比较可靠的。

对于母线发生两相接地故障或两相相间故障时，采样值差动保护在固定数据窗内满足保护判据的次数是比较低的。以母线发生 AB 两相接地故障为例，A 相差动保护可以快速地满足差动保护所要

求的判据次数 16，B 相差动保护则延迟几毫秒才能满足保护规定的动作判据次数。这说明双馈风场进线对母线采样值差动保护的快速性造成了延迟。

其次，设置母线采样值差动保护采用本文优化保护策略。即利用时差法判断故障发生位置是在母线保护区内，则采用短数据窗算法( $R=11, S=6$ )实现保护功能。在母线 1 发生不同故障类型时，采样值差动保护满足动作判据次数情况如图 10 所示。

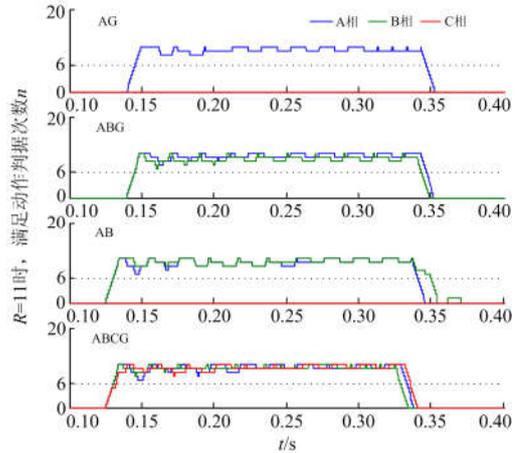


图 10  $R=11$  时，区内故障时满足动作判据次数  
Fig. 10 When  $R=11$ , the number of action criteria is met when the fault occurs in the zone

通过图 10 可以看出，在发生母线区内故障时通过缩短保护数据窗方式可以提高母线采样值差动保护的快速性和可靠性。同时也证明了本文提出的自适应数据窗的母线采样值差动保护判据具有可行性。

#### 3.2 区外故障时母线保护動作情况

当母线发生区外故障时，对母线采样值差动保护的動作情况进行了如下分析。首先，设置区外故障点在 L1 或 L2 上；然后，通过改变故障位置和故障类型来观测母线采样值差动保护在  $R=18$  的数据窗内满足动作判据的次数。在线路 L2 上(距离母线 1 的 100 m 处)发生三相短路故障时，采样值差动保护满足动作判据的次数如图 11 所示。

通过图 11 可以发现，A 相差动保护有多次在  $R=18$  的数据窗内满足动作判据的次数达到了 11 次。若改变故障发生时刻，如在 B 相电压过零点时发生三相短路故障，则会出现 B 相差动保护有多次满足动作判据情况。侧面证明采样值差动保护性能与故障发生时刻的电流相位有一定关系。经重复多次母线区外故障实验，发现采样值差动保护满足动作判据的次数均小于 16 次，母线保护不误动。

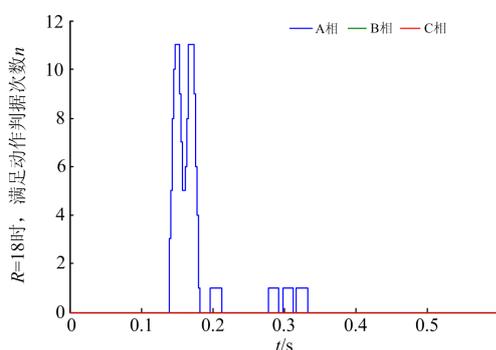


图 11  $R=18$  时, 区外故障时满足动作判据次数

Fig. 11 When  $R=18$ , the number of action criteria is satisfied when out of zone fault

#### 4 结论

首先, 在母线发生单相接地故障时, 双馈机组提供的故障相电流与非故障相电流差别不大。加上受 CT 饱和因素影响, 会存在测得的故障相电流小于非故障相电流现象。

其次, 当双馈机组在低电压穿越期间采用无功优化控制策略时, 从电流幅值大小变化这个角度分析, 有利于母线采样值差动保护正确动作; 从电流频率发生变化这个角度分析, 则不利于差动保护正确动作。

最后, 双馈风场高比例接入母线会造成母线采样值差动保护在区内故障时保护动作时间延迟。而采用自适应变数据窗的采样值差动保护判据可以提高区内故障时母线保护的快速性, 同时可以保证在母线区外故障时采样值差动保护不误动。

#### 参考文献

- [1] 王风光, 杜兴伟, 吕航, 等. 母线采样值差动保护数据窗选取方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 112-117.  
WANG Fengguang, DU Xingwei, LÜ Hang, et al. Research of data window selection for busbar current sampled value differential protection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 112-117.
- [2] 黄继东, 倪传坤, 郭文利, 等. 母线差动保护区外转区内故障再动作判据[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 120-124.  
HUANG Jidong, NI Chuankun, GUO Wenli, et al. Re-tripping discrimination of busbar differential protection when external fault transforms to internal fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 120-124.
- [3] 杨经超, 尹项根, 陈德树, 等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 71-77.  
YANG Jingchao, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Study on the operating characteristic of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 71-77.
- [4] 杨恒坤, 邓祥力, 王传启, 等. 采样值差动保护安全性及灵敏度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 107-113.  
YANG Hengkun, DENG Xiangli, WANG Chuanqi, et al. Research on security and sensitivity of sampled-value differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 107-113.
- [5] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷, 等. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-54.  
LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei, et al. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-54.
- [6] 吴崇昊, 陆于平, 刘小宝. 基于电流互感器线性传变区检测的母线采样值差动保护[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 70-74.  
WU Chonghao, LU Yuping, LIU Xiaobao. Busbar sampled value differential protection based on linear transfer section checking of TA[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 70-74.
- [7] 董新涛, 康小宁, 步梦琼, 等. 基于动态虚拟磁通分析的 CT 饱和和识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 126-130.  
DONG Xintao, KANG Xiaoning, BU Mengqiong, et al. Research on the method to identify CT saturation based on dynamic virtual magnetic flux[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 126-130.
- [8] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [9] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.  
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [10] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.

- BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.
- [11] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
- ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.
- [12] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响\_三\_风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [13] 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.
- [14] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Analytical study of grid-fault response of wind turbine doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1081-1091.
- [15] 熊小伏, 齐晓光, 欧阳金鑫. 电压不对称跌落下双馈感应发电机转子低频谐波电流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6467-6475.
- XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, OUYANG Jinxin. Analysis on characteristics of low-frequency rotor currents of double fed induction generators under asymmetric voltage drops[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6467-6475.
- [16] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.
- JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 87-92.
- [17] 姜惠兰, 范中林, 陈娟. 动态调整转子撬棒阻值的双馈风电机组低电压穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 125-131.
- JIANG Huilan, FAN Zhonglin, CHEN Juan. Low voltage ride-through method of DFIG based wind turbines by dynamically adjusting crowbar resistance of rotor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 125-131.
- [18] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.
- WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [19] 蔡文超, 杨炳元, 李超, 等. Crowbar 优化控制策略下的双馈风机无功调节能力研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 140-144.
- CAI Wenchao, YANG Bingyuan, LI Chao, et al. Study on reactive power regulation of double-fed induction generator under Crowbar optimization control strategy[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 140-144.
- [20] 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 wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.

收稿日期: 2018-08-03; 修回日期: 2018-10-29

作者简介:

宋杰辉(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2642750300@qq.com

杨炳元(1967—), 男, 通信作者, 本科, 教授, 研究方向为电力系统继电保护及系统安全控制, 智能电网下的继电保护及控制; E-mail: yangbingyuan@imut.edu.cn

吴俊杰(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 461967263@qq.com

(编辑 魏小丽)