

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.008

新型电力系统下母线比率差动保护改进算法

王风光¹, 赵青春¹, 程骁², 丁杰¹, 龚啸¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:新型电力系统下,大量新能源电源及电力电子设备接入交流电网。发生母线区内故障时,受控制策略影响,故障电流幅值受控,角度受控,谐波含量高,母线比率差动保护的動作性能下降,因此文中提出一种适用于新型电力系统的母线比率差动保护改进算法。首先,介绍传统比率差动算法的基本原理,并分析新型电力系统下该算法存在的问题;然后,提出不受故障电流角差及谐波影响的母线比率差动保护改进算法,将相位存在差异的各支路电流相量映射到同一坐标系下,并进行差流和制动电流计算,分析母线比率差动保护改进算法在母线区内外故障及区外故障电流互感器(current transformer, CT)饱和时的動作性能,提出母线比率差动保护改进逻辑;最后,基于实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS),对比传统比率差动保护和改进比率差动保护的動作性能,证明改进比率差动保护能够在不降低保护動作可靠性的前提下提高動作灵敏性。

关键词:新型电力系统;传统比率差动保护算法;改进比率差动保护算法;电流角差;制动电流;电流互感器(CT)饱和

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)01-0083-10

0 引言

新型电力系统是实现双碳目标的重要途径,也是推动能源转型和高质量发展的重要支撑^[1-3]。随着新能源装机占比不断提升,电力系统发生故障时其对外输出特性出现变化,主要体现在电流幅值受限、电流相位受控和波形畸变等方面,影响继电保护動作性能^[4-7]。文献[8]指出,线路两侧故障电流相位差受换流站有功和无功参考值、控制目标等因素影响,柔性直流输电系统的可控性导致交流线路电流差动保护灵敏度降低^[9-10]。

比率差动保护基于基尔霍夫定律实现,功能简单可靠,在母线保护装置中作为主保护功能得到广泛应用。比率差动保护包含差流启动元件、比率差动元件以及电流互感器(current transformer, CT)抗饱和元件。其中,差流启动元件在差流大于设定门槛值时動作,比率差动元件在差流和制动电流的比值大于设定门槛值时動作,CT抗饱和元件的主流方法为异步法和谐波法。异步法利用CT饱和时仍存在线性传变区的特征,通过比较差流和制动电流的動作时刻是否同步来区分区内外故障^[11];谐波法通过差流中谐波电流和基波电流的幅值比来判定CT是否饱和^[12]。比率差动元件与CT抗饱和元件

均動作时,比率差动保护動作。此外,比率差动保护通常还会设置不经CT抗饱和元件闭锁的高值比率差动元件,以保证在发生区内金属性接地故障时差动保护快速動作。

新型电力系统下发生母线区内故障时,电流幅值受限,相位受控,导致差流启动元件和比率差动元件的灵敏度降低,故障电流波形畸变导致差流中的谐波含量升高,进而影响基于谐波法的CT抗饱和元件。虽然基于异步法的CT抗饱和元件不受谐波电流影响,但是异步法在转换性故障尤其是同名相区外转区内故障时不能可靠動作。所以新型电力系统对现有母线比率差动保护的動作可靠性和灵敏度均有一定影响。

针对上述问题,文献[13]提出一种基于双比例补偿系数的电流差动保护方案,通过补偿调整两侧正序电流故障分量的相位和幅值,提高区内故障时电流差动保护灵敏度。文献[14]利用零序电流、负序电流和正序电流突变量构成辅助判据,提高区内接地故障和相间短路时电流差动保护的灵敏度。文献[15]利用线路两侧电流幅值比与相位关系构造虚拟电流,从而提高差动保护灵敏度。文献[16]提出在区内故障时制动电流设定为0,两侧电流角差大于90°时降低制动电流幅值,以提高灵敏度。文献[17]利用母线区内外故障所对应的故障等效模型不同,基于母线电压和差流构建阻抗模型和容抗模型,提出基于时域全量模型识别的母线保护。

收稿日期:2025-06-07;修回日期:2025-08-16

基金项目:国家科技重大专项资助项目“提升受端电网稳定性的主动支撑型柔性直流示范工程”(2024ZD0800900)

上述方法对于双端差动保护来说具有实用性,但是对于母线保护等多端差动保护来说,基于相位差或幅值比设置制动电流调整系数的复杂度较高,固定降低比率制动系数不能同时保证灵敏性和可靠性,实用性略显不足。基于此,文中首先简单分析故障时电流角差的产生原因,然后介绍传统比率差动算法的原理以及新型电力系统对其动作灵敏性和可靠性的影响,提出比率差动保护改进算法,分析其在区内故障和区外故障时的动作特性,最后通过实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)系统进行验证。

1 新型电力系统下故障电流角差分析

以图1所示新能源并网系统为例进行分析。图1中, E 为系统电势; U_m 为故障点电压; I_m 、 I_n 分别为新能源侧和系统侧提供的故障电流。

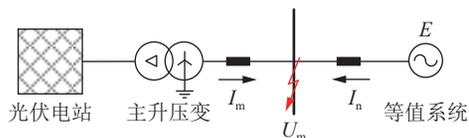


图1 光伏电站并网示意

Fig.1 Schematic diagram of photovoltaic power station grid connection

发生系统故障时,角差 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = (\omega_R - \omega_S)\Delta t + \arg(i_d^* + ji_q^*) - \arg\left(\frac{E_s}{R_{eq} + j\omega_S L_{eq}}\right) \quad (1)$$

式中: ω_R 、 ω_S 分别为新能源支路和常规电源支路的故障电流角频率; Δt 为换流器故障响应时间; i_d^* 、 i_q^* 分别为新能源换流器 d 轴和 q 轴电流参考值; E_s 为系统侧内电势相量; R_{eq} 、 L_{eq} 分别为电源到故障点的等值电阻和电感^[18-19]。

假设故障电流频率均为工频, i_q^* 随着电压跌落程度变大而逐渐增加,故 $\arg(i_d^* + ji_q^*)$ 的计算值在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化;而系统侧故障电流相角由系统侧内电势角以及线路和变压器阻抗角决定,一般为 $70^\circ \sim 85^\circ$ 。单相接地故障或三相故障情况下,新能源支路与常规电源支路的角差较小,在新能源支路全部输出有功的情况下,角差约 90° ^[20-23]。

当等值系统为弱系统,发生两相短路故障时,以 BC 两相短路为例,如果换流器控制策略以负序电流抑制为目标,此时新能源侧三相电流相位维持基本平衡,在纯发有功的情况下, B 相电流角差为 $70^\circ \sim 85^\circ$, C 相电流角差最大可达 130° , 相位关系如图2所示^[24-26]。图2中, E_a 、 E_b 、 E_c 为系统三相电势; I_{ma} 、 I_{mb} 、 I_{mc} 为新能源侧三相电流; I_{nb} 、 I_{nc} 分别为

系统侧 B、C 相电流。

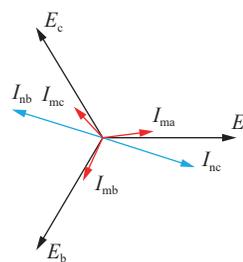


图2 两相短路故障时电流相位关系

Fig.2 Current phase relationship during two-phase short-circuit fault

图3为新能源汇集站母线区内 AB 相间故障的录波波形,系统侧与新能源侧支路电流 A 相角差约 75° , B 相角差约 120° 。

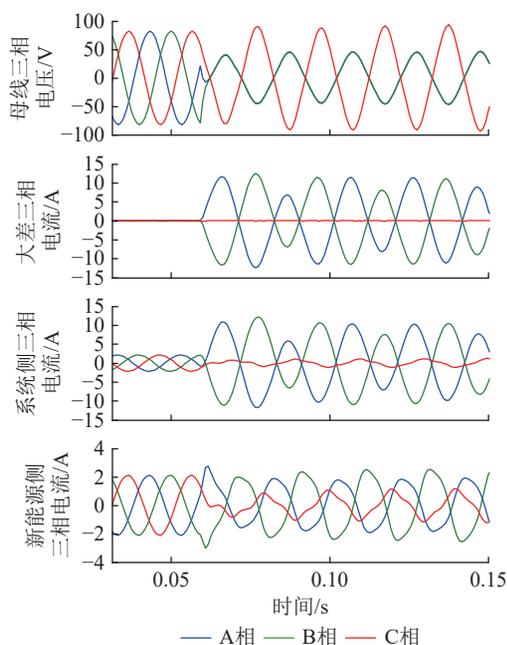


图3 新能源汇集站母线 AB 相间故障录波

Fig.3 Wave record of AB internal fault of the new energy collection station

2 传统比率差动保护算法

传统比率差动保护一般采用标量和制动原理,即差流为各支路电流的相量和,制动电流为各支路电流的标量和,分为常规比率差动和复式比率差动,动作判据分别见式(2)、式(3)^[27]。

$$\begin{cases} I_d > I_{cdzd} \\ I_d > K_1 I_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_d > I_{cdzd} \\ I_d > K_2 (I_r - I_d) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_d 为差流; I_r 为制动电流; I_{cdzd} 为差动启动电流定值; K_1 为常规比率差动制动系数; K_2 为复式比率差动制动系数。

$$\begin{cases} I_d = \left| \sum_{j=1}^M I_j \right| \\ I_r = \sum_{j=1}^M |I_j| \end{cases} \quad (4)$$

式中: M 为计入差动回路的支路个数; I_j 为母线上支路 j 的电流。

当 K_1 和 K_2 满足式(5)时, 常规比率差动和复式比率差动的动作判据等价, 所以文中主要对常规比率差动原理进行分析。

$$K_2 = \frac{K_1}{1 - K_1} \quad (5)$$

对于比率差动保护而言, 比率制动系数 K 的设定既需要考虑差动保护动作的可靠性, 也需要考虑差动保护动作的灵敏性。以应用于双母线接线的母线保护装置为例, 如图 4 所示, 线路 1 和线路 2 为双回线, 电源 1、电源 2 和线路 1 连接于 I 母, 线路 2 连接于 II 母, 母联开关为分位。图中, I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 分别为电源 1、电源 2、线路 1、线路 2 的电流。

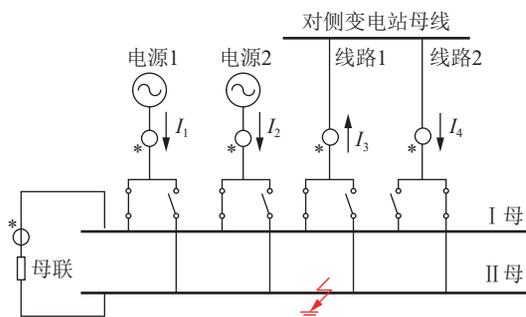


图 4 双母线系统示意

Fig.4 Schematic diagram of double busbar system

当 II 母发生故障时, 如果 $|I_1| = |I_3| = |I_4| = I$, $|I_2| = 0$, 且 I_1 与 I_4 方向相同, 与 I_3 方向相反, 则根据式(4), 可以计算得出差动电流 $I_d = I$, 制动电流 $I_r = 3I$, 差动电流和制动电流的比值 K_{cal} 为 0.33。按此严重情况考虑, 为保证差动保护可靠动作, 比率制动系数 K 一般设定为 0.3^[28]。

新型电力系统下, 由于故障时各支路电流角度受控及穿越性电流的存在, 差动电流计算值可能进一步降低。

仍以图 4 为例, 当 II 母发生故障时, 如果故障电流幅值满足 $\sqrt{2}|I_1| = \sqrt{2}|I_2| = |I_3| = |I_4| = I$, 且 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 的相位关系如图 5 所示, 则根据式(4), 可以计算得出差动电流 $I_d = I$, 制动电流 $I_r = (2 + \sqrt{2})I$, K_{cal} 值为 0.293, 小于比率制动系数 K 的设定值 0.3, 导致比率差动保护拒动^[29]。

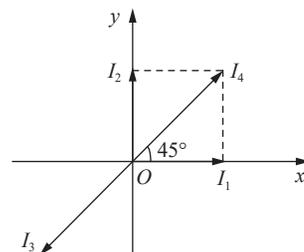


图 5 故障电流的幅值相位关系

Fig.5 The amplitude phase relationship of fault current

各侧故障电流角差的存在同样会使高值比率差动元件的灵敏性降低, 若此时因故障电流波形畸变导致 CT 抗饱和和元件闭锁, 则比率差动保护可能慢动甚至拒动。

以图 3 所示波形为例, 由于各侧故障电流存在角差, 且新能源侧电流波形存在畸变, 导致高值比率差动元件不能动作, CT 抗饱和元件动作速度变慢, 最终使比率差动保护在故障后约 58 ms 动作, 如图 6 所示。

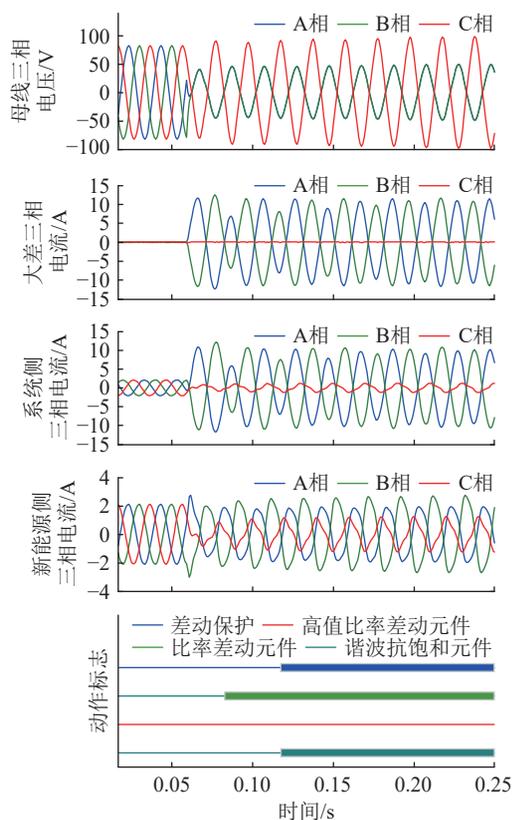


图 6 传统比率差动保护动作波形

Fig.6 Waves of traditional ratio differential protection

综上所述, 新型电力系统下故障电流角度受控和波形畸变的特征使得传统比率差动保护的動作性能有所下降, 因此需要研究不受故障电流角差及谐波电流影响的比率差动改进算法, 在不降低比率差动保护动作可靠性的前提下提高其灵敏性。

3 比率差动保护改进算法

3.1 算法原理

傅里叶算法是数字信号处理的一个重要工具,广泛应用于比率差动保护。对于含有直流分量、基波分量和各次谐波量的输入电流信号 $\dot{I}(t)$,可以表示如下:

$$\dot{I}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{cn} \cos(n\omega t) + jA_{sn} \sin(n\omega t)) \quad (6)$$

式中: n 为谐波次数; ω 为基波角频率; A_{cn} 为 n 次电流谐波实部; A_{sn} 为 n 次电流谐波虚部。

在微机继电保护中,基于全波傅里叶算法的 A_{cn} 与 A_{sn} 的计算公式为:

$$\begin{cases} A_{cn} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} I_k \cos \frac{2nk\pi}{N} \\ A_{sn} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} I_k \sin \frac{2nk\pi}{N} \end{cases} \quad (7)$$

式中: N 为采样点数; I_k 为第 k 个采样点的电流瞬时值。

考虑输入电流以基波电流为主,基于基波电流实部 A_{c1} 和虚部 A_{s1} ,可以计算得到支路电流幅值,如式(8)所示。

$$|\dot{I}(t)| = \sqrt{A_{c1}^2 + A_{s1}^2} \quad (8)$$

传统比率差动算法下的差流 I_{d_four} 和制动电流 I_{r_four} 为:

$$\begin{cases} I_{d_four} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^M A_{c1_j}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^M A_{s1_j}\right)^2} \\ I_{r_four} = \sum_{j=1}^M \sqrt{A_{c1_j}^2 + A_{s1_j}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: A_{c1_j} 为支路 j 基波电流实部; A_{s1_j} 为支路 j 基波电流虚部。

将支路电流相位差异计入制动电流幅值计算,即将相位存在差异的各支路电流相量映射到同一坐标系下的 x 轴和 y 轴,再进行差流和制动电流计算,得到改进后的制动电流 I_{r_new} 。

$$I_{r_new} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^M |A_{c1_j}|\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^M |A_{s1_j}|\right)^2} \quad (10)$$

改进算法后,差流和制动电流比值 K_{new} 为:

$$K_{new} = \frac{I_{d_four}}{I_{r_new}} \quad (11)$$

以2个支路电流 $I_1 e^{j\phi_1}$ 和 $I_2 e^{j\phi_2}$ 为例,根据式(9)和式(10),得出差流、传统制动电流和改进制动电流的计算公式:

$$\begin{cases} I_{d_four} = |I_1 e^{j\phi_1} + I_2 e^{j\phi_2}| = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 (\cos \phi_1 \cos \phi_2 + \sin \phi_1 \sin \phi_2)} \\ I_{r_four} = |I_1 e^{j\phi_1}| + |I_2 e^{j\phi_2}| = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} + 2I_1 I_2 \\ I_{r_new} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 (|\cos \phi_1 \cos \phi_2| + |\sin \phi_1 \sin \phi_2|)} \end{cases} \quad (12)$$

以支路1为基准, $\phi_1 = 0, \phi_2 = \delta$,则:

$$\begin{cases} I_{d_four} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \delta} \\ I_{r_four} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} + 2I_1 I_2 \\ I_{r_new} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 |\cos \delta|} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可以得出以下结论:

- (1) $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ 时, I_{r_new} 幅值随着 δ 增加逐渐变小, I_{d_four} 与 I_{r_new} 比值始终为1;
- (2) $90^\circ < \delta < 180^\circ$ 时, I_{r_new} 幅值随着 δ 增加逐渐变大, I_{d_four} 与 I_{r_new} 比值逐渐变小;
- (3) $\delta = 180^\circ$ 时, I_{r_four} 与 I_{r_new} 幅值相同。

3.2 区内故障动作特性

以2个电源支路为例,发生区内故障时,在 I_1 和 I_2 的电流夹角 α 满足 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时, K_{cal} 计算值和 K_{new} 计算值如图7所示。 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时, K_{new} 固定为1, $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时, K_{new} 逐渐减小,但仍大于 K_{cal} ,即改进比率差动的动作灵敏度高于传统比率差动,在高值比率制动系数 K_T 固定的情况下,新增动作区域如图7中红色区域所示。

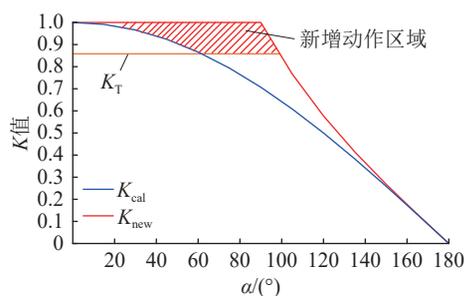


图7 传统比率差动算法与比率差动改进算法的 K 值
Fig.7 The ratio K of traditional ratio differential algorithm and improved ratio differential algorithm

以图8所示相位关系为例,支路电流 $|I_1| = |I_2| = I$,相位差为 90° ,按传统比率差动算法得到差流计算值 $I_d = \sqrt{2}I$,制动电流计算值 $I_r = 2I$, $K_{cal} = 0.71$,按比率差动改进算法得到差流计算值和制动电流计算值均为 $\sqrt{2}I$, $K_{new} = 1$,差动保护灵敏度提高41%。

以图3所示波形为例,A、B两相的改进比率差动元件的灵敏性显著大于传统比率差动元件,如图9所示,不经CT抗饱和和闭锁的高值比率差动元件满足动作条件,比率差动保护快速动作出口。

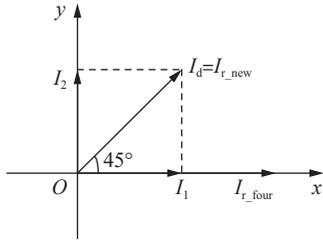


图 8 区内故障电流的幅值相位关系

Fig.8 The amplitude phase relationship of internal fault current

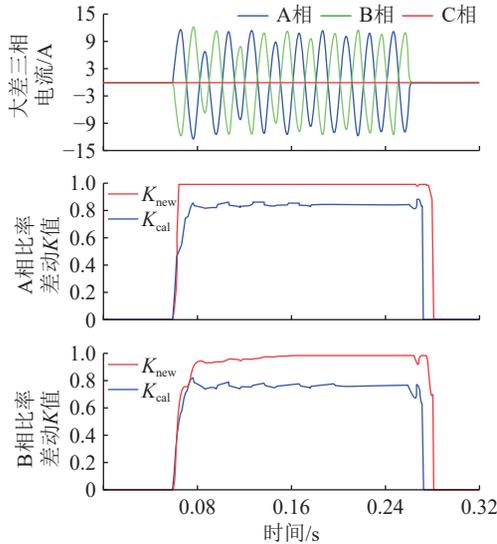


图 9 改进比率差动元件和传统比率差动元件性能对比

Fig.9 Performance comparison between improved ratio differential components and traditional ratio differential components

3.3 区外故障动作特性

以 2 个电源支路为例, 当发生区外故障时, 区外故障电流的幅值相位关系如图 10 所示, 此时 $|i_1|=|i_2|=I$, 相位差 α 为 180° , 则传统比率差动算法和比率差动改进算法的差流计算值均为 0, 制动电流计算值均为 $2I$, 即区外故障时制动性能未降低, 差动保护可靠不动作。

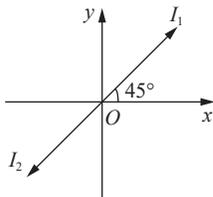


图 10 区外故障电流的幅值相位关系

Fig.10 The amplitude phase relationship of external fault current

当发生区外故障伴随故障支路 CT 饱和时, 因为比率差动改进算法和传统比率差动算法的差流和制动电流计算值一致, 所以并未降低差动保护动作的可靠性。

3.4 具体实现逻辑

基于比率差动改进算法的差动保护具体实现逻辑包含以下步骤:

(1) 当母线差动保护启动时, 选取电流幅值最大的支路作为相位基准支路, 差动保护启动判据可采用电压变化量判据或制动电流变化量判据, 如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \Delta u > \Delta U_T + 0.05U_N \\ \Delta s > \Delta S_T + 0.5I_N \end{cases} \quad (14)$$

式中: Δu 为电压变化量; Δs 为制动电流变化量; $0.05U_N$ 、 $0.5I_N$ 为固定门槛值; ΔU_T 、 ΔS_T 为浮动门槛值, 随着变化量输出变化而逐步自动调整。

(2) 根据其他支路与基准支路的电流相位差计算基波电流实部 A_{c1j} 和基波电流虚部 A_{s1j} 。

(3) 根据式 (4) 计算差流 I_d , 根据式 (10) 计算制动电流 I_{r_new} 。

(4) 计算差流 I_d 和制动电流 I_{r_new} 的比值 K_{new} , 如果 K_{new} 大于内部固定门槛 0.95, 则不经 CT 饱和判别动作出口, 如果 $K_{new} \leq 0.95$, 但大于常规比率差动制动系数 K_1 , 则经 CT 饱和判别动作出口, 如果 $K_{new} \leq K_1$, 则不动作。

具体实现逻辑如图 11 所示。

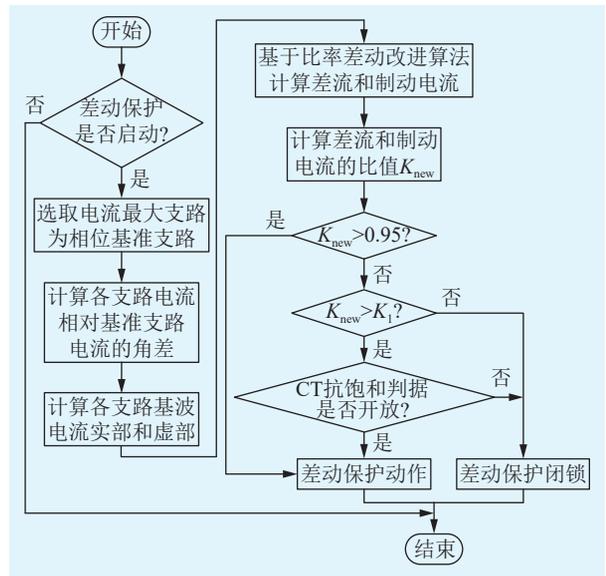


图 11 改进比率差动保护流程

Fig.11 Flow chart of improved ratio differential protection program

4 逻辑验证

为验证改进比率差动保护的动作为, 搭建图 12 所示双母双分段接线 RTDS 试验系统, 其中支路 1 为母联 SK3, 支路 2、4、23、24 分别对应支路 SK1、SK2、SK4、SK5。

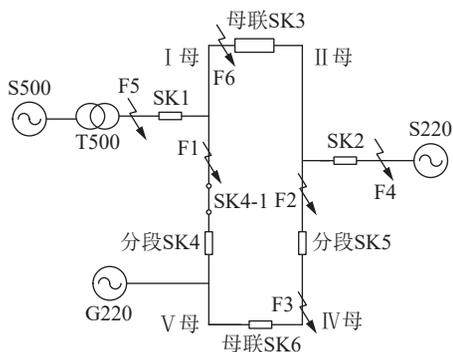


图 12 RTDS 试验系统

Fig.12 RTDS test system

发电机机组容量为 850 MW, 功率因数为 0.85, 暂态电抗为 0.316 Ω, 次暂态电抗为 0.251 Ω, 变压器参数和等值系统参数如表 1、表 2 所示。试验项目如表 3 所示。

表 1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

参数	数值
容量	333 MV·A/333 MV·A/100 MV·A
电压比	550 kV/220 kV/35 kV
短路电抗	高中(H-M): 0.18 Ω; 高低(H-L): 0.62 Ω; 中低(M-L): 0.40 Ω
绕组连接方式	YN/a0/d11

表 2 等值系统参数

Table 2 Parameters of the equivalent system

等值电源	等值阻抗/Ω	
	正序	零序
S220	3.03+j23.15	4.69+j49.34
S500	0.47+j8.99	0.84+j15.95

表 3 试验项目

Table 3 Test item

试验内容	改进差动保护 动作时间	传统差动保护 动作时间
区内故障	12 ms	23 ms
I 母区内转 II 母区内故障	12 ms	23 ms
区外故障CT饱和	不动作	不动作
新能源区内故障	12 ms	不动作

4.1 区内故障

模拟母线区内 AC 相间故障, 图 13 为故障录波, 图 14 为 K_{cal} 和 K_{new} 计算值。因为故障时各支路电流存在相位差, 所以 $K_{cal} < K_{new}$ 。因为 $K_{new} > 0.95$, 根据 3.4 节实现逻辑, 改进比率差动保护不经 CT 抗饱和判据闭锁快速动作出口。图 13 显示改

进比率差动保护动作时间约 12 ms, 传统比率差动保护动作时间约 23 ms, 改进比率差动保护的速动性优于传统比率差动保护。

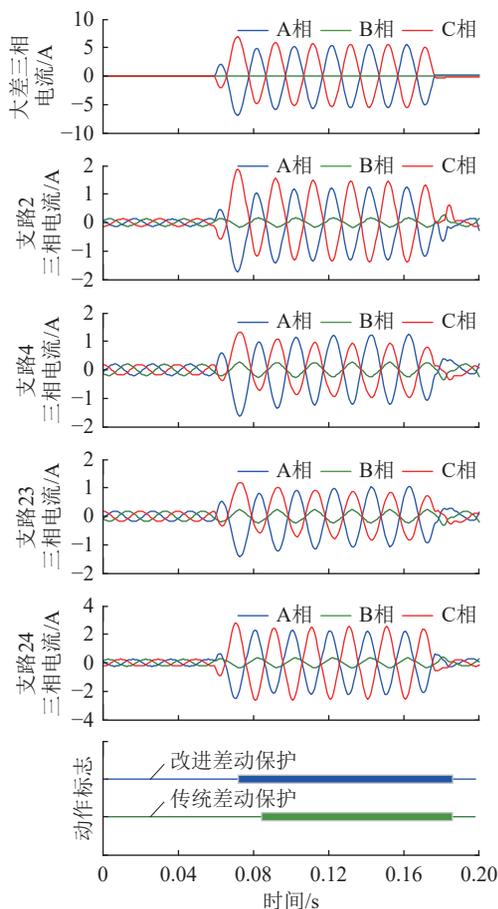


图 13 区内故障录波

Fig.13 Wave record of internal fault

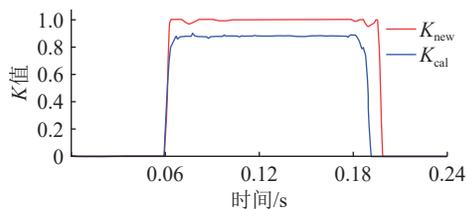


图 14 区内故障时差流与制动电流比值

Fig.14 The ratio of differential current to restraint current of internal fault

4.2 I 母区内转 II 母区内故障

模拟 I 母区内 AC 两相接地故障转 II 母区内三相故障, 图 15 为故障录波, 图 16 为 K_{cal} 和 K_{new} 计算值, K_{new} 值为 1, 证明多点接地故障对 K_{new} 计算值未产生影响, 改进比率差动保护动作时间比传统比率差动保护动作时间快了约 12 ms, 改进比率差动保护的速动性优于传统比率差动保护。

4.3 区外故障 CT 饱和

模拟母线区外故障, 以及母线区外故障同时 CT 饱和的情况, 图 17 为支路 2 A 相接地故障同时

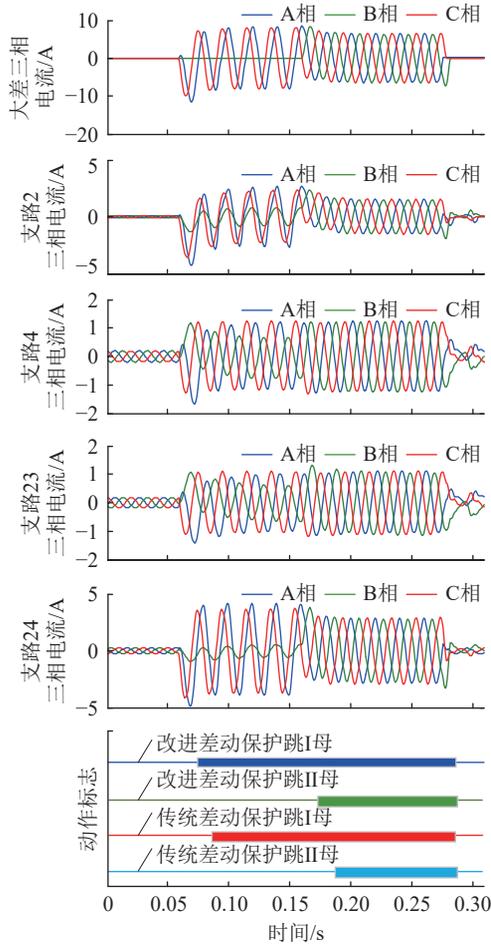


图 15 区内多点故障录波

Fig.15 Wave record of multi-point internal fault

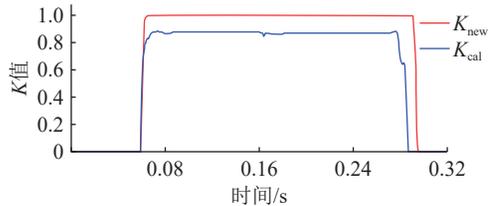


图 16 区内多点故障时差流与制动电流比值

Fig.16 The ratio of differential current to restraint current of multi-point internal fault

CT饱和(CT线性转变时间 3 ms)时的故障录波。
图 18 为 K_{cal} 和 K_{new} 计算值, 两者均小于 0.3, 差动保护可靠不动作, 说明改进比率差动保护不受区外故障 CT 饱和的影响。

4.4 新能源故障波形回放

通过 RTDS 回放现场新能源厂站的母线区内故障录波, 如图 19 所示, 图 20 为 K_{cal} 和 K_{new} 计算值。区内故障时, 故障电流中的谐波电流含量较高, 传统比率差动保护的 CT 抗饱和判据闭锁差动保护动作, 改进比率差动保护的 K_{new} 值接近于 1, 不经 CT 抗饱和判据闭锁快速动作出口, 动作时间约 12 ms。

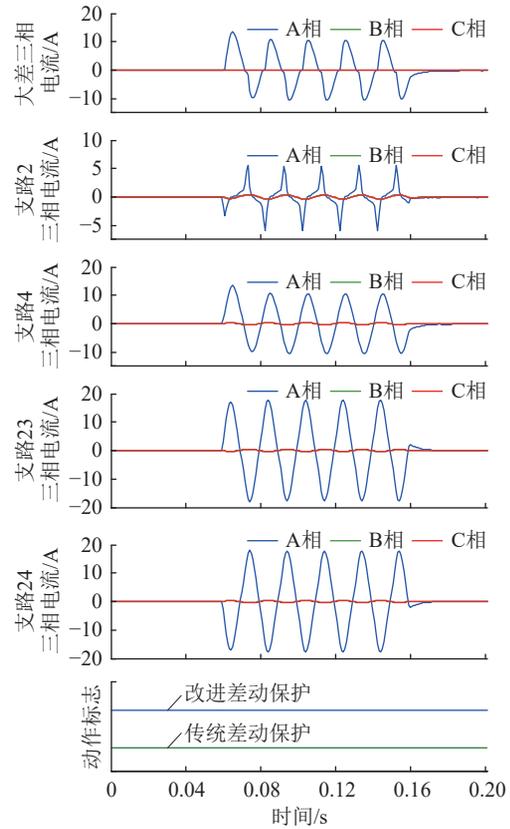


图 17 区外故障 CT 饱和录波

Fig.17 Wave record of external fault with CT saturation

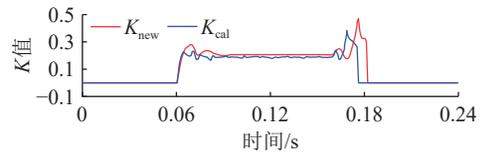


图 18 区外故障 CT 饱和时差流与制动电流比值

Fig.18 The ratio of differential current to restraint current of external fault with CT saturation

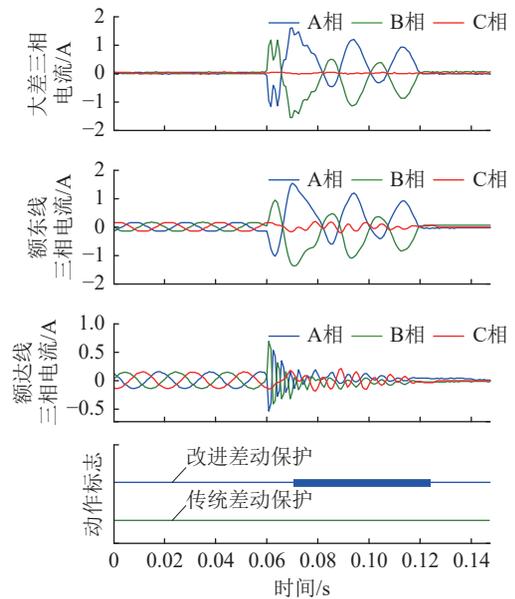


图 19 新能源区内故障录波

Fig.19 Wave record of new energy internal fault

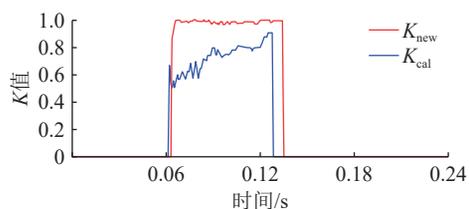


图 20 新能源区内故障时差流与制动电流比值

Fig.20 The ratio of differential current to restraint current of new energy internal fault

5 结论

新型电力系统下发生故障时,由于故障电流角差及谐波电流影响,传统比率差动保护的动作可靠性、速动性及灵敏性均受到影响,改进比率差动保护基于傅里叶算法计算各支路电流的实部和虚部,进而对制动电流的算法进行改进,以降低故障电流角差及谐波电流对差动保护动作性能的影响。

分析表明,大部分情况下故障电流角差在 90° 以内,此时改进比率差动保护的動作性能不受角差影响,差流计算值和制动电流计算值相同,可以不经CT抗饱和元件直接出口,提高了差动保护动作速度,并解决了因故障电流波形畸变导致CT饱和抗元件无法开放差动保护的问题,即使在故障电流最大角差大于 90° 时,改进比率差动保护的動作灵敏性也较传统比率差动保护有一定程度的提高。发生区外故障CT饱和时,由于制动电流计算值与传统比率差动保护的計算值相同,所以保护动作可靠性不会受到影响,RTDS试验结果及新能源故障波形回放结果均证明了改进比率差动保护動作性能的优越性。

比率差动保护改进算法可应用于线路保护、变压器保护或母线保护等继电保护装置,实现方法简单,工程实用性强,对于保障新型电力系统的安全稳定运行具有重要作用。

参考文献:

[1] 李健,张钧,韩新阳,等.新型电力系统形态量化推演方法的总体框架与功能设计[J].中国电力,2025,58(3):1-7,97.
LI Jian, ZHANG Jun, HAN Xinyang, et al. Overall framework and function design of quantified gaming method for new power system forms[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 1-7,97.

[2] 黄河,王建学,肖云鹏,等.新型电力系统电力电量平衡分析关键技术与研究框架[J].电力建设,2024,45(9):1-12.
HUANG He, WANG Jianxue, XIAO Yunpeng, et al. Key technologies and research framework for the power and energy balance analysis in new-type power systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 1-12.

[3] 华昊辰,张洲赫,邹奕群,等.新型电力系统需求侧灵活性资源低碳协同优化研究综述[J].电力建设,2025,46(6):60-75.

HUA Haochen, ZHANG Zhouhe, ZOU Yiqun, et al. Review of low-carbon co-optimization research on demand-side flexibility resources for new power systems[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 60-75.

[4] 郑玉平,吕鹏飞,李斌,等.新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J].电力系统自动化,2023,47(22):3-15.
ZHENG Yuping, LYU Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3-15.

[5] 王增平,林一峰,王彤,等.电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.

[6] 刘清泉,杨鹏,李铁成,等.应对继电保护多场景的数字仿真测试方法[J].中国电力,2025,58(2):118-125.
LIU Qingquan, YANG Peng, LI Tiecheng, et al. Digital simulation test method for multiple scenarios relay protection[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 118-125.

[7] 赵宇东,代宇,孙长春,等.基于改进比率制动和负序相继判据的有源配电网差动保护方法[J].电测与仪表,2025,62(11):129-136.
ZHAO Yudong, DAI Yu, SUN Changchun, et al. Integrated differential protection method for active distribution network based on improved ratio braking and negative sequence successive criterion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 129-136.

[8] 梁莹玉,李武林,卢正杰,等.MMC-HVDC对交流线路电流相位差动保护的影响分析[J].电力自动化设备,2019,39(9):95-101.
LIANG Yingyu, LI Wulin, LU Zhengjie, et al. Influence of MMC-HVDC on current phase differential protection of AC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 95-101.

[9] 肖超,韩伟,李琼林,等.柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J].智慧电力,2020(4):1-8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines[J]. Smart Power, 2020(4): 1-8.

[10] 张璞,王钢,李海锋,等.直流馈入下的输电线路电流差动保护动作特性分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(10):1-5.
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Performance of current differential protection for transmission lines in HVDC/AC interconnected system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 1-5.

[11] 沈全荣,严伟,梁乾兵,等.异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J].电力系统自动化,2005,29(16):84-86.

- SHEN Quanrong, YAN Wei, LIANG Qianbing, et al. Asynchronous method for the recognition of current transformer saturation and its application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(16): 84-86.
- [12] 王志鸿, 郑玉平, 贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2000, 12(5): 19-24.
- WANG Zhihong, ZHENG Yuping, HE Jiali. A algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2000, 12(5): 19-24.
- [13] 吴振杰, 胡晨, 陈海燕, 等. 基于双比例补偿系数的有源配电网电流差动保护[J]. *浙江电力*, 2024, 43(12): 104-113.
- WU Zhenjie, HU Chen, CHEN Haiyan, et al. Differential current protection for active distribution networks with dual proportional compensation coefficients[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(12): 104-113.
- [14] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 145-154.
- LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 145-154.
- [15] 李会新, 王兴国, 谢俊, 等. 一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(9): 75-79.
- LI Huixin, WANG Xingguo, XIE Jun, et al. A transmission line current differential protection based on virtual brake current[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(9): 75-79.
- [16] 刘一民, 王书扬, 李彬, 等. 逆变型新能源场站柔性直流送出系统交流线路差动保护灵敏度优化方案[J]. *电力建设*, 2022, 43(1): 63-69.
- LIU Yimin, WANG Shuyang, LI Bin, et al. Sensitivity optimization scheme of AC line differential protection in MMC-HVDC system of inverter new energy station[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(1): 63-69.
- [17] 宋国兵, 高校平, 张晨浩, 等. 海上风电低频输电系统快速母线保护[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(2): 29-36.
- SONG Guobing, GAO Xiaoping, ZHANG Chenhao, et al. Fast busbar protection for low-frequency transmission system of offshore wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(2): 29-36.
- [18] 郑黎明. 大规模新能源送出线路纵联保护新原理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- ZHENG Liming. Study on novel pilot protection of transmission line with large-scale renewable energy power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [19] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 20-32.
- ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 20-32.
- [20] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(12): 100-105.
- LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 100-105.
- [21] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3230-3236.
- LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3230-3236.
- [22] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Cosine similarity based line protection for large-scale wind farms[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(7): 5990-5999.
- [23] TAO R F, LI F T, CHEN W W, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generator based wind farms with low voltage ride through capability[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(3): 1-9.
- [24] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 新能源电源控制故障响应与交流线路距离保护影响分析[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3834-3843.
- WANG Xingguo, YU Su, ZHOU Zexin, et al. Action analysis of AC line distance protection considering new energy power control response[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3834-3843.
- [25] 常鹏, 宋国兵, 侯俊杰, 等. 传统交流线路保护在换流器并网系统中的适应性分析[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 57-66.
- CHANG Peng, SONG Guobing, HOU Junjie, et al. Adaptability analysis of traditional AC line protection in inverter-interfaced system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 57-66.
- [26] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 54-59.
- LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 54-59.
- [27] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- ZHU Shengshi. Principle and technology of relay protection for high voltage power network[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

tric Power Press, 2005.

[28] 杜丁香, 周泽昕, 王兴国, 等. 克服母线差动保护汲出电流的对策[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 86-90.

DU Dingxiang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Countermeasures to overcome outflow current for bus differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 86-90.

[29] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 柔性低频输电系统的主变稳态负序差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 168-177.

GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LÜ Hang, et al. Steady state negative sequence differential protection of a transformer in a

flexible low-frequency transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 168-177.

作者简介:



王风光

王风光(1981), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电力系统继电保护相关工作(E-mail: wangfg@nrec.com);

赵青春(1981), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电力系统继电保护相关工作;

程骁(1978), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电力系统继电保护相关工作。

Improved algorithm for ratio differential protection under the new power system

WANG Fengguang¹, ZHAO Qingchun¹, CHENG Xiao², DING Jie¹, GONG Xiao¹

(1. Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Nanjing Nari-relays Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In the new power system, a large number of new energy sources and power electronic equipment are connected to the AC power grid. When a fault occurs in the busbar area, affected by the control strategy, the amplitude and angle of the fault current are controlled, and the harmonic content is high. As a result, the operating performance of the ratio differential protection declines. The basic principle of the traditional ratio differential algorithm is introduced, and the problems of the traditional ratio differential algorithm in the new power system are analyzed. An improved algorithm for ratio differential protection for busbar protection is proposed, which is not affected by the angle difference and harmonics of the fault currents. The current phasors of each bay with different angles are mapped to the same coordinate system. Then, the differential current and restraint current are calculated. The operating performance of the improved ratio differential algorithm is analyzed under internal and external faults of the busbar area and current transformer (CT) saturation during external faults. An improved logic for the ratio differential protection is proposed. The real time digital simulation (RTDS) test results compare the operating performance of the traditional ratio differential protection and the improved ratio differential protection. It is proved that the improved ratio differential protection enhances the operating sensitivity without reducing the reliability of protection.

Keywords: new power system; traditional ratio differential protection algorithm; improved ratio differential protection algorithm; angle difference; restraint current; current transformer (CT) saturation

(编辑 方晶)