

基于正序电流的风电接入电网自适应阈值差动保护方案

黄方能¹, 梅勇¹, 周剑¹, 雷傲宇¹, 许琴²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 随着风电渗透率的不断提高, 风电不确定性和间歇性对电网保护方案的影响愈加显著, 基于固定阈值的保护整定方案不再适用于复杂多变的电力系统。基于此, 提出了基于正序电流的风电接入电网自适应阈值差动保护方案。首先, 以含风电场的标准电力系统为例, 剖析了风电“T”型接入对传统电流差动保护的影响机理。在此基础上, 以正序电流为故障信号, 以故障位置和故障发生时间为自变量, 建立了自适应阈值差动保护模型。为了提高求解效率以适应保护控制的要求, 提出了基于 PSO 算法的二阶段求解方法。其中: 阶段 1 以故障位置为优化变量, 得到对阈值影响最高的故障类型; 阶段 2 在阶段 1 的基础上引入故障开始时间, 仅针对阶段 1 得到的故障类型进行二维优化, 可以明显缩短计算时间, 以实现阈值计算的快速性和准确性。最后, 基于 Matlab 仿真分析, 验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 差动保护; 风电; 正序电流; 自适应阈值; 粒子群优化(PSO); 二阶段求解方法

Adaptive threshold differential protection scheme for wind power integration based on positive sequence current

HUANG Fangneng¹, MEI Yong¹, ZHOU Jian¹, LEI Aoyu¹, XU Qin²

(1. CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510663, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the continuous improvement of wind power penetration, the impact of wind uncertainty and intermittence on power grid protection schemes is increasingly significant. A protection setting scheme based on a fixed threshold is no longer suitable for complex and changeable power systems. In view of this, this paper proposes an adaptive threshold differential protection scheme for a power grid with large-scale wind power based on positive sequence current. First, taking the standard power system with a wind farm as an example, the influence mechanism of wind power "T" access on traditional current differential protection is analyzed. Then, taking positive sequence current as the fault signal and taking the fault location and occurrence time as independent variables, an adaptive threshold differential protection model is established. In order to improve the solution efficiency to meet the requirements of protection control, a two-stage solution method based on a PSO algorithm is proposed. In phase 1, the fault type with the highest impact on the threshold is obtained by taking the fault location as the optimization variable; phase 2 introduces the fault start time on the basis of phase 1, and carries out two-dimensional optimization only for the fault types obtained in phase 1. This can significantly shorten the calculation time, so as to realize the rapidity and accuracy of threshold calculation. Finally, the correctness and effectiveness of this method are verified by simulation analysis based on Matlab.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901300).

Key words: differential protection; wind power; positive sequence current; adaptive threshold; particle swarm optimization (PSO); two-stage solution method

0 引言

近年来,为减少碳排放并鼓励绿色能源的发展,

可再生能源接入电力系统的比例逐年升高^[1-5]。由于风能高效清洁且储量丰富,风力发电成为新能源发电的主要方式之一。但是风力发电受地域的限制较大,且风速具有很大的随机性和波动性^[6-11],使得风电功率输出具有较高的不可控性。然而传统继电保护整定方案是基于离线整定的,且阈值保持不变^[12-15],难

基金项目: 国家重点研发计划项目资助“工业园区多元用户互动的配用电系统关键技术研究及示范”(2016YFB0901300)

以适应含大规模风电接入电网的保护控制。

针对上述问题,文献[16-19]提出了考虑大型风电场出力变化的自适应距离保护方案。其中,文献[19]深入研究了风电场参数变化对距离保护整定值的影响,提出了适用于含风电场的输、配线路自适应综合保护方案;然而,距离保护整定过程复杂,当发生远距离以及高阻抗故障时,保护的可靠性会变差^[20]。因此,差动保护方案更适用于含风电接入电网的输电线路保护。文献[21]提出基于暂态电流波形的纵联保护新原理,采用最小二乘法拟合、提取暂态波形主频率,并构造了相应保护判据;文献[22]提出了基于电流微分平面约束区域的自适应控制方法,在传统相量误差分析的基础上,引入动态向量法构造电流差动保护方案,但其保护方案的性能受双馈感应电机的影响较大;文献[23-24]提出了功率差动保护方案,但此类保护方案在功率波动较大的情况下难以运行^[25]。文献[26]提出了基于 Hilbert 变换和 Teager 功率的差动保护方案,同样不能适应功率不确定性的情形。考虑到上述传统方法的缺陷,文献[27]基于深度学习和数据挖掘算法,提出了故障检测和继电保护方案,但存在训练数据复杂、计算量大的缺点。

针对上述问题,本文提出了基于正序电流的风电接入电网自适应阈值差动保护方案。首先,剖析了风电“T”型接入对传统电流差动保护的影响机理,在此基础上,以正序电流为故障信号,以故障位置和故障发生时间为自变量,建立了自适应阈值差动保护模型,并提出了基于 PSO 算法的二阶段求解方法,提高了求解效率,可以满足保护控制的要求。

1 风电“T”型接入对传统电流差动保护的影响

含风电场标准电网模型如图 1 所示。图 1 中,母线 M 和 P 之间的线路长 30 km,容量为 9 MW (6×1.5 MW)的双馈感应发电机采用常用的“T”型接入并网方式^[28-30]。图中, E_M 和 E_P 分别为节点 M 和 P 处的电压源, Z_{SM} 和 Z_{SP} 分别为节点 M 和 P 处的源阻抗, Z_{LM} 和 Z_{LP} 分别为节点 M 和 P 处的线路阻抗, Z_F 为接地阻抗, I_M 和 I_P 分别为流经节点 M 和 P 处的故障电流, I_F 为流经故障点 F 的故障电流, R_M 和 R_P 分别为节点 M 和 P 处安装的继电保护装置,Yg/D11、D1/Yg 为变压器绕组接线方式。

通过测量 M、P 两节点的电流,从而估计正序差动电流。对于 M、P 节点之间的线路故障,其等效正序网络如图 2 所示。其中, E_{AM} 和 E_{AP} 分别为节点 M 和 P 处的正序电压源, I_S 和 I_P 是流经节点 M

和节点 P 的故障正序电流, I_W 为风电电流, I_N 为中间回路电流。

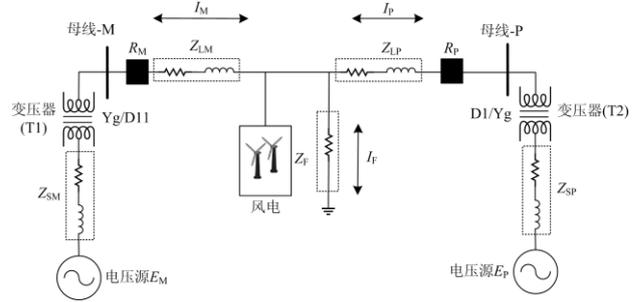


图 1 含风电的标准电力系统

Fig. 1 A standard power system with wind power

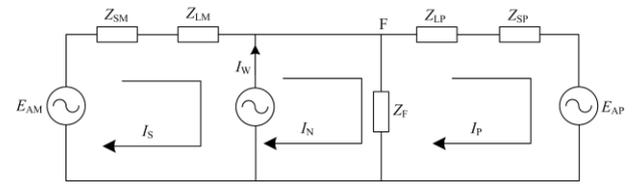


图 2 故障状态下的正序网络

Fig. 2 Positive sequence network under fault state

基于 Kirchhoff 电压定律(KVL),对图 2 采用回路电流法,可得

$$\begin{cases} E_{AM} = I_S(Z_{SM} + Z_{LM}) + Z_F(I_N - I_P) \\ -E_{AP} = I_P(Z_{SP} + Z_{LP}) + Z_F(I_P - I_N) \\ I_W = I_N - I_S \end{cases} \quad (1)$$

联立求解可得

$$\begin{cases} I_P = \frac{Z_F E_{AM} - Z_1 E_{AP} + Z_1 Z_F - Z_F^2}{Z_3} I_W \\ I_S = \frac{Z_2 E_{AM} - Z_F E_{AP} + Z_F^2 - Z_2 Z_F}{Z_3} I_W \end{cases} \quad (2)$$

式中, Z_1 、 Z_2 和 Z_3 的计算公式分别为

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{SM} + Z_{LM} + Z_F \\ Z_2 = Z_{SP} + Z_{LP} + Z_F \\ Z_3 = Z_1 Z_2 - Z_F^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, Z_{LM} 和 Z_{LP} 与故障位置有关,其余均为不变量。

由式(2)可知,含风电系统故障状态下的正序差动电流为

$$|I_P - I_S| = \left| \frac{(Z_F - Z_2) E_{AM} + (Z_F - Z_1) E_{AP} + Z_4 I_W}{Z_3} \right| \quad (4)$$

式中, Z_4 的计算公式为

$$Z_4 = \frac{(Z_1 + Z_2) Z_F - 2Z_F^2}{Z_3} \quad (5)$$

同理,可得不含风电时,系统故障状态下的正序差动电流为

$$|I'_P - I'_S| = \left| \frac{(Z_F - Z_2)E_{AM} + (Z_F - Z_1)E_{AP}}{Z_3} \right| \quad (6)$$

式中, I'_P 、 I'_S 为不含风电系统故障时线路两端的正序差动电流。

当上述正序差动电流满足式(7)时, 即大于某一阈值时, 判定为内部故障。

$$|I_P - I_S| > \varepsilon \quad (7)$$

式中, ε 为保护阈值。

由式(6)可知, 不含风电时, 故障状态下的正序差动电流仅与故障位置和正序电压源有关, 只要根据最严重故障情况进行整定即可, 因此, 电流差动保护的阈值可以设为定值。然而, 风电接入系统后, 正序差动电流中增加了 $Z_4 I_W$ 项, 正序差动电流与风电的输出电流密切相关, 不再是一定值, 若仍按照固定值整定, 则可能导致差动保护误动或拒动。因此, 需要自适应整定保护阈值才能保证保护装置动作的正确性。

2 自适应阈值差动保护模型

由式(4)可知, 含风电系统故障状态下的正序差动电流可以看作 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 和风电 I_W 的函数, 即

$$|I_P - I_S| = \left| \frac{(Z_F - Z_2)E_{AM} + (Z_F - Z_1)E_{AP}}{Z_3} + Z_4 I_W \right| = \psi(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, I_W) \quad (8)$$

由于 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 的值主要与 Z_{LM} 和 Z_{LP} 有关, 即主要取决于故障位置, 风电 I_W 主要是时间的序列, 因此, 可以将故障位置 L_x 和故障发生时间 t_s 作为阈值变化的自变量, 以降低阈值优化的维度。基于此, 式(8)可进一步简化为

$$|I_P - I_S| = \psi(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, I_W) = \psi(L_x, t_s) \quad (9)$$

考虑所有故障类型, 包括单相对地故障、相间故障以及两相接地故障、三相接地故障, 以最严重故障类型下、最严重故障位置和故障时刻的差动电流作为阈值, 即式(9)的最小值作为阈值, 可以保证差动保护装置不会误动。

为了方便叙述, 不妨设故障类型对应符号如表 1 所示。

则式(9)对应的最优阈值优化可以分解为 11 个子优化, 对应 11 种故障类型, 如下:

$$\varepsilon = \min \left\{ \begin{array}{l} g_{AG}(L_x, t_s), g_{BG}(L_x, t_s), g_{CG}(L_x, t_s) \\ g_{AB}(L_x, t_s), g_{BC}(L_x, t_s), g_{CA}(L_x, t_s) \\ g_{ABG}(L_x, t_s), g_{BCG}(L_x, t_s), g_{ACG}(L_x, t_s) \\ g_{ABC}(L_x, t_s), g_{ABCG}(L_x, t_s) \end{array} \right\} \quad (10)$$

表 1 故障类型对应符号

Table 1 Corresponding symbols of fault types

符号	故障类型	符号	故障类型
AG	A 相接地故障	ABG	AB 两相接地故障
BG	B 相接地故障	BCG	BC 两相接地故障
CG	C 相接地故障	ACG	AC 两相接地故障
AB	AB 相间短路故障	ABC	ABC 三相短路故障
AC	AC 相间短路故障	ABCG	ABC 三相接地故障
BC	BC 相间短路故障	—	—

上述目标函数中的每个子函数都是故障位置 L_x 和故障发生时间 t_s 的函数, 其中故障位置 L_x 的变化情况为

$$0 \leq L_x \leq L \quad (11)$$

式中, L 为线路总长度, 单位为 km。不考虑线路的极限长度, 在上限和下限值处都有小的偏差 ξ , 因此, 故障位置 L_x 的变化情况为

$$\xi \leq L_x \leq L - \xi \quad (12)$$

故障开始时间 t_s 的约束为

$$t_{\min} \leq t_s \leq t_{\max} \quad (13)$$

式中, t_{\min} 和 t_{\max} 分别为故障起始时间的最小值和最大值。由于本文所提的差动保护阈值与风电有关, 因此, 故障起始时间的范围为一个风电预测周期, 本文取 5 min, 即在 5 min 内, 差动保护均采用一个阈值, 下一个周期将根据风电的预测值重新计算阈值, 实现阈值自适应更新。

3 基于 PSO 算法的二阶段求解方法

3.1 PSO 算法

所提优化模型可以采用多种智能算法进行求解, 其中粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法操作简单、收敛速度快, 在求解函数、随机规划及最优控制方面都有大量应用^[31-33], 因此, 本文采用 PSO 进行求解。假设迭代过程中, 每个粒子的位置为 p_i^k , 速度为 v_i^k , 最佳位置为 p_{best_i} , 所有粒子的最佳位置为 g_{best_i} 。通过比较新旧适应值来更新粒子的位置, 如式(14)、式(15)所示。

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}_i} - p_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}_i} - p_i^k) \quad (14)$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + v_i^{k+1} \quad (15)$$

式中: c_1 、 c_2 为加速度常数; r_1 、 r_2 为 0~1 的随机数; ω 是惯性权重系数。为避免算法早熟, 陷入局部最优解, 惯性权重系数可采用:

$$\omega^{k+1} = \omega^k \omega_{\text{damp}} \quad (16)$$

式中, ω_{damp} 为惯性常数的阻尼比。

利用粒子群算法的参数，即种群数和迭代数，在变量约束范围内随机产生大量样本，从而对模型进行模拟求解，以寻找最合理的阈值。

根据式(10)可知，本文阈值优化模型中包含 11 个子优化问题，并且每个子优化问题都是二维优化模型，采用 PSO 算法进行求解时，针对每个子优化问题都要在二维平面搜索最优解，无疑计算较慢，可能无法满足保护控制的要求。众所周知，一维优化的速度远远快于二维优化，并且 11 个故障类型中必然存在相对较弱的故障类型，因此，本文提出了二阶段求解方法。其中，阶段 1 以故障位置为优化变量，得到对阈值影响最高的故障类型；阶段 2 在阶段 1 的基础上引入故障开始时间，仅针对阶段 1 得到的故障类型进行二维优化，可以明显缩短计算时间，以实现阈值计算的快速性，满足差动保护控制的要求。

3.2 二阶段求解方法

(1) 阶段 1: 单变量优化

由实际运行过程发现，风电在 5 min 时间尺度内的变化率相对较小，因此，故障距离对阈值优化的影响强于故障发生时间的影响，故在单变量优化阶段，可假定风电不变，仅将故障距离 L_x 作为优化变量。式(10)可简化为

$$\varepsilon = \min \left\{ \begin{array}{l} g_{AG}(L_x), g_{BG}(L_x), g_{CG}(L_x), g_{AB}(L_x) \\ g_{BC}(L_x), g_{CA}(L_x), g_{ABG}(L_x), g_{BCG}(L_x) \\ g_{ACG}(L_x), g_{ABC}(L_x), g_{ABCG}(L_x) \end{array} \right\} \quad (17)$$

为了量化故障类型对阈值优化的影响，需首先定义量化指标，考虑到目标函数为正序差动电流的最小值，因此，本文以正序差动电流(Positive sequence Differential Current, PDC)作为量化指标，该指标越小，阈值越接近该故障类型下的正序差动电流，该故障类型对阈值优化的影响也就越大。

以图 1 所示的网络进行仿真分析，得到各故障类型下的 PDC 指标及对应的故障位置如图 3 所示。

由图 3 可知，A 相接地故障、B 相接地故障和 C 相接地故障对应的 PDC 指标明显小于其他故障类型，说明这三种单相接地故障类型对阈值影响最大，差动保护阈值大概率就是这三种故障类型下正序差动电流的最小值，因此，可忽略其他故障类型的影响，故式(17)可进一步简化为

$$\varepsilon = \min \{ g_{AG}(L_x), g_{BG}(L_x), g_{CG}(L_x) \} \quad (18)$$

值得注意的是，上述影响最大的故障类型在每个 5 min 时间尺度都需要更新，并非所有的计算周期都是三种单相接地故障类型的影响最大。

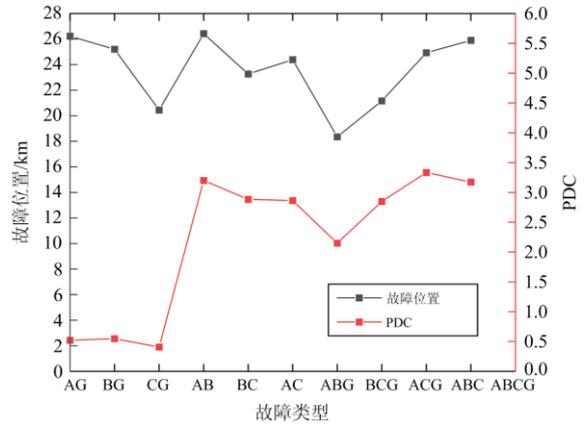


图 3 阶段 1 不同故障的最优指标

Fig. 3 Optimal indices for different faults under stage-1

(2) 阶段 2: 多变量优化

在单变量优化阶段，已经得到了对阈值影响最大的故障类型，但仅考虑故障距离的影响，没有考虑故障开始时间 t_s 的影响(即风电变化的影响)，所得到的正序差动电流并非最小。为了提高阈值计算的正确性和准确性，在式(18)的基础上，引入故障开始时间 t_s ，形成二维优化模型，如下：

$$\varepsilon = \min \{ g_{AG}(L_x, t_s), g_{BG}(L_x, t_s), g_{CG}(L_x, t_s) \} \quad (19)$$

根据式(19)进一步仿真分析，得到三类接地故障类型下的 PDC 指标如表 2 所示。

表 2 阶段 2 LG 故障的最优指标

Table 2 Optimal indices obtained for LG faults under stage-2

故障类型	故障位置/km	故障起始时间/s	PDC
AG	18.3307	5.7888	0.5103
BG	21.5921	12.3921	0.5318
CG	20.7164	9.5089	0.3793

由表 2 可知，当 C 相发生接地故障时，PDC 的值最小，为 0.3793，因此，保护阈值应定为 0.3793。

为了进一步验证二阶段求解方法的合理性，即二阶段求解与直接二维优化的结果是否等价，在引入故障开始时间 t_s 前后，将所有故障类型下的 PDC 指标及 PDC 误差进行统计，结果如图 4 所示。

由图 4 可知，引入故障开始时间 t_s 后，所有故障类型的 PDC 指标值变化不是很大，变化率一般不会超过 5%，说明在 5 min 时间尺度内风电的影响确实较小，阶段 1 的假设是合理的；并且三种接地故障类型的 PDC 与其他故障类型的 PDC 的最小差异也显著大于 5%，说明即使引入故障开始时间 t_s ，也不会改变对阈值影响严重的故障类型，阶段 1 得到的严重故障类型是正确的，阈值一定是在该严重故障类型下取得。因此，在阶段 2 仅对严重故障类型

进行二维优化与全部故障类型直接进行二维优化的结果等价。

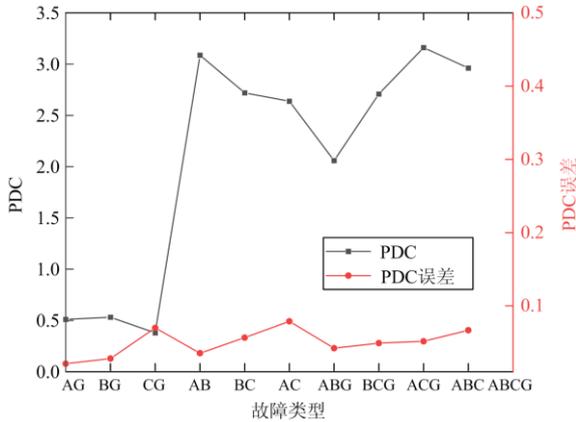


图4 阶段2不同故障的PDC及PDC误差

Fig. 4 PDC and PDC errors for different faults under stage-2

4 仿真分析

对所提自适应阈值差动保护算法进行仿真验证, 采样频率为 1.2 kHz, 利用电力系统仿真工具箱进行建模和仿真, 并利用 Matlab R2016a 软件对算法进行求解。为了得到最优阈值, 采用二阶段求解方法进行求解。

4.1 自适应阈值仿真验证

4.1.1 二阶段求解

(1) 阶段1: 单变量优化

所提自适应差动保护模型的目标函数包括 11 种故障类型的子函数, 如式(17)。利用 PSO 对每个子函数进行优化, 设置种群规模为 100, 迭代次数为 50 次, 故障开始时间 t_s 为 0 s, 故障阻抗为 1Ω , 仅考虑故障位置变量 L_x , L_x 的约束设置为

$$1 \leq L_x \leq 29 \quad (20)$$

所有故障类型的最优 PDC 如图 3 所示, 根据式(17)可得

$$\varepsilon = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5212, 0.5471, 0.4078, 3.2005, 2.8834 \\ 2.8633, 2.1498, 2.8481, 3.3333, 3.1731 \end{array} \right\} = 0.4087 \quad (21)$$

由于三个单相接地故障的 PDC 最小, 故给出所有单相接地故障最优阈值指标识别过程, 如图 5 所示。图 5 表明在阈值搜索过程中, PSO 的收敛速度快、求解精度高。

(2) 阶段2: 多变量优化

由阶段 1 的仿真可知, 在 11 个子函数中, 只有三个子函数(AG、BG 和 CG)对应的 PDC 较小, 因此, 为了提高算法的运行效率, 在阶段 2 中仅考虑 AG、BG 和 CG 故障。对于阶段 2 的约束条件, 除

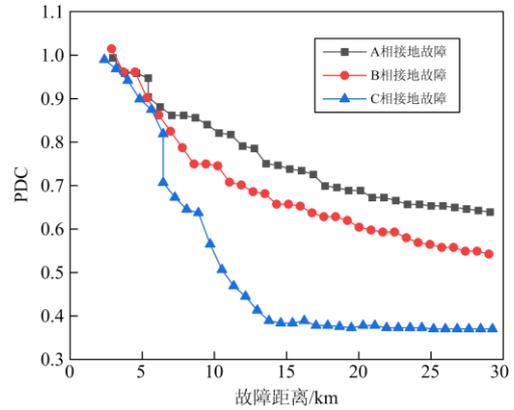


图5 PSO 最优阈值搜索过程(阶段 1)

Fig. 5 Optimal threshold searching process using PSO for LG faults in stage-1

了式(20)所示约束外, 还包括故障开始时间约束。

$$0 \leq t_s \leq 5 \text{ min} \quad (22)$$

对于所有单相接地故障, 最优 PDC 对应的故障位置、故障开始时间如表 2 所示, 可知, CG 故障在距离母线 M 约 20.716 4 km 处得到了最优解, 起始时间为 9.508 9 s, 最优 PDC 为 0.379 3, 因此, 保护阈值应定为 0.379 3。

4.1.2 自适应阈值更新计算

为了验证本文所提自适应阈值更新能力, 以 24 h 为例进行仿真分析, 按 5 min 时间尺度, 总计 288 个时间间隔, 均会根据相应的风电预测值更新差动保护阈值, 风电预测曲线及对应的阈值曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 差动保护阈值会随着风电功率波动而变化, 近似成正相关。传统差动保护阈值为固定值, 当风电有功出力较大时, 可能造成误动, 当风电有功出力较小时, 可能造成拒动, 本文所提阈值自适应更新, 可提高差动保护装置动作的正确性, 更适用于大规模风电接入电力系统。

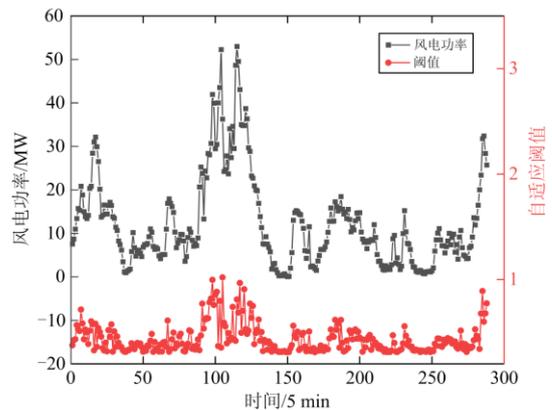


图6 自适应阈值

Fig. 6 Adaptive threshold

4.2 高阻接地的影响分析

为研究高阻接地故障对所提保护方案的影响,分别采用 5~100 Ω 故障电阻进行测试。故障开始时间设为 0 s,故障距离为 25 km。不同 LG 故障的 PDC 计算结果如图 7 所示。

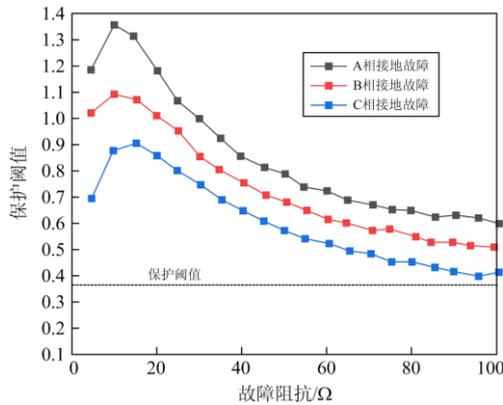


图 7 不同 LG 故障的阈值结果

Fig. 7 Threshold results of different LG faults

由图 7 可知,故障电阻增加会导致 PDC 值相应减小,但是仍能处于阈值之上,并且 PDC 随故障阻抗增大趋于平缓。因此,高阻接地并不会影响所提方案的有效性。

4.3 算法仿真时间分析

由于在线整定对于实时性要求较高,因此对所提方案的计算速度进行测试,仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同方案的仿真用时

Table 3 Simulation time of different schemes

求解方法		时间/ms
粒子群算法(PSO)	二阶段求解(本文方法)	7.04
	整体优化	89.16
遗传算法(GA)	整体优化	125.73
蚁群算法(ACO)	整体优化	109.58

由表 3 可知,相对于遗传算法和蚁群算法,粒子群优化算法的计算用时最少,分别降低了 36.57 ms 和 20.42 ms,但用时依然较长,本文通过二阶段求解方法,将计算用时降低至 7.04 ms,具有较高的计算效率,能有效满足在线整定需求。

5 结论

针对固定阈值保护方案难以有效适应复杂多变的风电接入电力系统的问题,本文提出了基于正序电流的风电接入电网自适应阈值差动保护方案,其保护阈值可以根据风电变化自适应更新,避免保护装置发生误动和拒动,得到的主要结论如下:

(1) 风电“T”型接入电力系统后,故障状态下

的正序差动电流不仅与故障位置和正序电压源有关,还与风电的输出电流密切相关,需要自适应整定保护阈值才能保证保护的正确性;

(2) 本文所提差动保护的自适应阈值与风电近似成正相关,可避免传统固定阈值导致的保护误动或拒动,提高保护动作的正确率;

(3) 所提出的基于 PSO 算法的二阶段求解方法可将自适应阈值的计算用时降低至 7.04 ms,具有较高的计算效率,能有效满足在线整定需求。

需要注意的是,本文仅以风电作为案例进行研究,本文方法适用于任何形式不确定电源“T”型接入电力系统的差动保护整定,具有广泛的适应能力。

参考文献

[1] 胡迪,丁明,毕锐,等. 光伏和风电互补性对高渗透率可再生能源集群接入规划影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 821-836.
 HU Di, DING Ming, BI Rui, et al. Impact analysis of PV and WT complementarity on access planning of high penetrated renewable energy cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 821-836.

[2] 白浩,袁智勇,周长城,等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 66-73.
 BAI Hao, YUAN Zhiyong, ZHOU Changcheng, et al. Dispatching method of maximum power supply capacity of a power distributed network considering fluctuation and correlation of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 66-73.

[3] 钱振宇,王泉,魏建民,等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 35-39, 60.
 QIAN Zhenyu, WANG Quan, WEI Jianmin, et al. Flexible optimization model for new energy access capacity considering the method of electricity reduction and maximum acceptance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 35-39, 60.

[4] 裴善鹏,朱春萍. 高可再生能源比例下的山东电力系统储能需求分析及省级政策研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 29-35.
 PEI Shanpeng, ZHU Chunping. Research of energy storage demand and province class policy in Shandong electric power system in a setting of high proportion renewable energy[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 29-35.

- [5] 胡伟, 戚宇辰, 张鸿轩, 等. 风光水多能源电力系统互补智能优化运行策略[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 9-18.
HU Wei, QI Yuchen, ZHANG Hongxuan, et al. Complementary intelligent optimization operation strategy of wind-solar-hydro multi-energy power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 9-18.
- [6] 王浩, 王艳, 纪志成. 基于SAIGM-KELM的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 78-87.
WANG Hao, WANG Yan, JI Zhicheng. Short-term wind power forecasting based on SAIGM-KELM[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 78-87.
- [7] 胡帅, 向月, 沈晓东, 等. 计及气象因素和风速空间相关性的风电功率预测模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 28-36.
HU Shuai, XIANG Yue, SHEN Xiaodong, et al. Wind power prediction model considering meteorological factor and spatial correlation of wind speed[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 28-36.
- [8] 王伟胜, 王铮, 董存, 等. 中国短期风电功率预测技术现状与误差分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 17-27.
WANG Weisheng, WANG Zheng, DONG Cun, et al. Status and error analysis of short-term forecasting technology of wind power in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 17-27.
- [9] 孙伟卿, 宋赫, 秦艳辉, 等. 考虑灵活性供需不确定性的储能优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4486-4497.
SUN Weiqing, SONG He, QIN Yanhui, et al. Energy storage system optimal allocation considering flexibility supply and demand uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4486-4497.
- [10] LIN C, BIE Z, PAN C, et al. Fast cumulant method for probabilistic power flow considering the nonlinear relationship of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2537-2548.
- [11] CHEN J J, QI B X, PENG K, et al. Conditional value-at-credibility for random fuzzy wind power in demand response integrated multi-period economic emission dispatch[J]. Applied Energy, 2020, 261.
- [12] 成和祥. 基于双馈风机短路特性的风电场集电线路继电保护整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 93-99.
CHENG Hexiang. Discussion on setting scheme of collecting line relay protection in wind farm based on a DFIG short-circuit characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 93-99.
- [13] 龚永智, 陶晔, 许传敏, 等. 考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 128-135.
GONG Yongzhi, TAO Ye, XU Chuanmin, et al. Relay protection setting calculation of wind farm collector lines considering wind turbine increased short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 128-135.
- [14] 谢志远, 胡斌俞, 张卫民, 等. 基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 34-42.
XIE Zhiyuan, HU Binyu, ZHANG Weimin, et al. A novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 34-42.
- [15] 张岚, 张悦, 白瑞. 直驱风力发电机风电场故障特征分析及对继电保护影响研究[J]. 山西电力, 2014(5): 1-4.
ZHANG Lan, ZHANG Yue, BAI Rui. Research on fault characteristics analysis of direct-driven wind generator and its impact on relay protection[J]. Shanxi Electric Power, 2014(5): 1-4.
- [16] 洪树斌, 范春菊, 陈实. 考虑双馈异步风机特性的自适应接地距离保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 124-133.
HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi. Adaptive ground distance protection considering doubly-fed induction generator characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [17] 范小红, 孙士云, 王春又, 等. 适用于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 82-91.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, et al. Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 82-91.
- [18] MA J, ZHANG W, LIU J, et al. A novel adaptive distance protection scheme for DFIG wind farm collector lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 234-244.
- [19] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines connected to induction generator-based wind farms during balanced faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1193-1203.

[20] YANG G, DONG M, ZHOU Z, et al. The influences and countermeasures of wind farm access to transmission line differential protection[C] // 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, July 16-18, 2012, Denver, CO, USA.

[21] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
LÜ Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.

[22] ASGHARIGOVAR S, SEYEDI H. Adaptive CWT-based transmission line differential protection scheme considering cross-country faults and CT saturation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(9): 2035-2041.

[23] KAWADY T A, TAALAB A, AHMED E S. Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(5): 390-397.

[24] WEN M, CHEN D, YIN X. An energy differential relay for long transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55: 497-502.

[25] JENA M K, SAMANTARAY S R, TRIPATHY L. Decision tree-induced fuzzy rule-based differential relaying for transmission line including unified power flow controller and wind-farms[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 2144-2152.

[26] BISWAL S, BISWAL M, MALIK O P. Hilbert Huang transform based online differential relay algorithm for shunt compensated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2803-2811.

[27] GOPALAN S A, SREERAM V, IU H H C. A review of coordination strategies and protection schemes for microgrids[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 222-228.

[28] GHORBANI A, MEHRJERDI H, AL-EMADI N A. Distance-differential protection of transmission lines connected to wind farms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 89: 11-18.

[29] CH D, BISWAL M, ABDELAZIZ A Y. Adaptive differential protection scheme for wind farm integrated power network[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 1-11.

[30] MALATHI V, MARIMUTHU N S, BASKAR S, et al. Application of extreme learning machine for series compensated transmission line protection[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(5): 880-887.

[31] 王育飞, 付玉超, 孙路, 等. 基于混沌-RBF神经网络的光伏发电功率超短期预测模型[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1110-1116.
WANG Yufei, FU Yuchao, SUN Lu, et al. Ultra-short term prediction model of photovoltaic output power based on chaos-RBF neural network[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1110-1116.

[32] 宋雨妍, 王渝红, 刘天宇, 等. 基于多目标离散粒子群算法的电容隔直装置优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 266-274.
SONG Yuyan, WANG Yuhong, LIU Tianyu, et al. Optimal configuration of capacitor blocking devices based on multi-objective discrete PSO[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 266-274.

[33] 宋雪玮, 赵吉文, 董菲, 等. 基于PSO-LSSVM的永磁同步直线电机局部退磁故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2426-2435.
SONG Xuewei, ZHAO Jiwen, DONG Fei, et al. Local demagnetization fault recognition of permanent magnet synchronous linear motor based on PSO-LSSVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2426-2435.

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2022-10-18

作者简介:

黄方能(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制等;

梅勇(1980—), 男, 工学硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制等;

周剑(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制等。

(编辑 魏小丽)