

逆变型分布式电源接入对小电阻接地系统 馈线零序电流保护的影响

杨伟涛¹, 曾德辉¹, 汪隆君¹, 王 钢¹, 吴争荣², 于 力²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 逆变型分布式电源(IIDG)的接入改变了小电阻接地系统的接地故障特性, 不仅使传统零序电流的计算方法不再适用, 而且对馈线零序电流保护造成了不利的影响。通过分析 IIDG 的故障电流特性, 建立了具有低电压穿越能力的 PQ 控制型 IIDG 故障等值模型; 在含 IIDG 小电阻接地系统接地故障分析建模的基础上, 提出了零序电流迭代求解算法, 并利用 MATLAB 编写相应的求解程序, 将计算结果与电力系统实时仿真系统(RTDS)的仿真结果进行比较, 验证了所提算法的有效性和准确性; 基于所建立的故障分析模型, 揭示了 IIDG 的接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响机理, 利用所提零序电流迭代求解算法求解不同故障情况下的馈线零序电流值, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 逆变型分布式电源; 小电阻接地系统; PQ 控制策略; 低电压穿越; 故障分析; 馈线零序电流保护; 继电保护

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.024

0 引言

为了应对化石能源危机和缓解环境压力, 以光伏发电和风力发电为代表的分布式发电技术在我国得到了大力发展, 尤其是逆变型分布式电源 IIDG (Inverter Interfaced Distributed Generator) 在电网中的接入日渐广泛。IIDG 通过逆变器实现并网, 其输出特性主要由逆变器的控制策略决定, 具有较强的非线性^[1]; 而且并网规定要求 IIDG 应具有低电压穿越能力^[2-3], 即在电网发生故障后, 故障相的电压发生跌落时, IIDG 能够优先输出无功以支撑电网电压。IIDG 复杂的故障输出特性改变了配电网的短路电流分布, 可能造成传统配电网的继电保护无法正确动作^[4-5]的情况。

目前我国配电网大多采用中性点经消弧线圈接地的方式^[6-7]。由于土地资源的紧缺以及对供电可靠性要求的提高, 地下电缆输电被我国很多大中型城市所采用。电缆线路因具有较大的对地电容, 导致消弧线圈接地方式很难满足迅速增长的补偿容量需求, 容易造成欠补偿、过电压等危险。由于小电阻接地系统具有较强的故障排除能力, 能够有效地抑制过电压, 越来越多的大型城市开始采用小电阻接地方式^[8]。当小电阻接地系统发生接地故障时, 故障相会出现较大的压降, 在低电压穿越期间 IIDG 将输出较大的故障电流, 极大地改变了馈线零序电

流分布, 因此 IIDG 对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响不可忽略。但是, 目前 IIDG 在小电阻接地系统中的应用尚缺乏完善的理论和经验指导, 含 IIDG 小电阻接地系统的故障分析及继电保护技术成为了亟待研究的课题。

目前关于 IIDG 的接入对配电网故障影响的研究主要集中在相间短路及其保护。文献[9-11]在考虑了 IIDG 的低电压穿越能力后将其等效为适合实时计算的压控电流源模型, 并提出了含 IIDG 配电网相间短路故障分析方法; 文献[12-13]研究了配电网发生相间短路故障时 IIDG 接入对短路电流分布的影响, 并得出了 IIDG 接入会引起配电网保护误动或者拒动的结论; 文献[14-15]提出了含 IIDG 配电网的自适应电流保护新方法。然而, 上述研究都只考虑了配电网发生相间短路故障的情况, 研究结果并不适用于小电阻接地系统发生接地故障的情况。文献[16]研究了旋转型分布式电源对小电阻接地系统接地故障特征的影响, 但是目前 IIDG 因其良好的控制特性在配电网中的应用更加广泛, 而 IIDG 受其控制策略的影响无法等效为恒压源加阻抗的模型, 故该文献所提方法具有较大的局限性。

为此, 本文首先分析了 IIDG 的故障电流特性, 建立了具有低电压穿越能力的 PQ 控制型 IIDG 故障等值模型; 然后, 建立了含 IIDG 小电阻接地系统的接地故障分析模型, 提出了零序电流迭代求解算法, 并利用 MATLAB 编写零序电流迭代求解程序, 将计算结果与电力系统实时仿真系统(RTDS)的仿真结果进行比较; 最后, 基于所提故障分析模型, 揭示了 IIDG 接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的

收稿日期: 2017-08-17; 修回日期: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477057)

影响机理,利用所提零序电流迭代求解算法求解不同故障情况下的馈线零序电流值,验证了理论分析的正确性。本文所提故障分析方法可为含 IIDG 配电网的规划以及含 IIDG 配电网的自适应零序电流保护的研究提供理论支撑。

1 含 IIDG 的小电阻接地系统接地故障分析

1.1 IIDG 的故障输出特性

IIDG 的故障电流输出由其控制策略决定。IIDG 的控制策略主要有 3 种:PQ 控制、下垂控制和 V/f 控制。其中,PQ 控制是通过控制 IIDG 的有功和无功电流输出,使得其输出功率达到参考值。PQ 控制策略可使 IIDG 根据一次能源输入的变化,实现最大有功功率追踪,常用于 IIDG 并网运行的情况。本文仅针对 PQ 控制型 IIDG 进行研究。

在低电压穿越阶段,IIDG 不脱网持续运行,并优先输出无功,以补偿电压的跌落量。PQ 控制型 IIDG 输出的无功参考电流可表达为^[12]:

$$I_{DGq,f} = \frac{Q_{ref}}{U_{PCC,f}} + K(U_{PCC0} - U_{PCC,f}) \quad (1)$$

其中, Q_{ref} 为 IIDG 的无功参考功率; $U_{PCC,f}$ 为发生故障时公共连接点 PCC (Point of Common Coupling) 的电压; U_{PCC0} 为发生故障前 PCC 的电压; K 为无功支撑比例系数。

值得注意的是:①当 IIDG 正常运行时,为了充分利用可再生能源,通常将 Q_{ref} 假设为 0;②IIDG 的输出电流具有最大限值 I_{max} (约为额定电流的 2 倍);③当电网发生不对称故障时,如果采取普通的控制策略,IIDG 将输出负序电流,这不仅会影响逆变器的性能,还会加剧电网的不对称程度,不利于故障恢复。故 IIDG 的控制系统通常采用消除负序电流的控制策略^[17],即将 PCC 正序电压作为参考,并将 IIDG 的负序电流参考值设为 0。因此,基于上述因素,当系统发生故障时,采用消除负序电流控制策略的 PQ 控制型 IIDG 输出的有功和无功参考电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} I_{DGq,f} = \min \{ K(U_{PCC0} - U_{PCC,f}^+), I_{max} \} \\ I_{DGd,f} = \min \left\{ \frac{P_{ref}}{U_{PCC,f}^+}, \sqrt{I_{max}^2 - I_{q,f}^2} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{ref} 为 IIDG 的有功参考功率; $U_{PCC,f}^+$ 为发生故障时 PCC 的正序电压; $\min$ 为取最小值函数; $I_{q,f}$ 为 IIDG 实际输出的无功电流,实际上 IIDG 实际输出的无功电流往往与其无功参考电流相等。由式(2)可知,IIDG 的故障电流输出主要由有功参考功率和 PCC 正序电压共同决定,而有功参考功率可视为发生故障前 IIDG 的出力,因此,在故障分析中可将 IIDG 等效为由 PCC 正序电压控制的压控电流源。

若以系统电压 U_s 作为参考相量, δ 为 PCC 的电压相量与系统电压相量的夹角,可得 IIDG 的故障电流输出为:

$$I_{DG,f} = (I_{DGd,f} \cos \delta + I_{DGq,f} \sin \delta) + j(I_{DGd,f} \sin \delta - I_{DGq,f} \cos \delta) \quad (3)$$

对于大容量 IIDG 而言,其一般经并网变压器直接接入 10 kV 配电网中;对于 380 V 电压等级的小容量 IIDG 而言,其通常由多个 IIDG 形成集群,再通过升压变压器经 PCC 统一接入 10 kV 配电网中,该 IIDG 集群可等值为一个大容量的 PQ 控制型 IIDG^[18]。

1.2 单相接地故障

小电阻接地系统的馈线保护一般配置为:当发生单相接地故障时,由零序电流保护动作;当发生两相短路及两相接地故障时,由相电流保护动作。因此,本文仅针对单相接地故障的情况进行分析研究。图 1 为含 IIDG 的小电阻接地系统,图中, M 和 N 为母线; L_1 为母线 M 至 IIDG₁ 的线路; L_2 为 IIDG₁ 至故障点的线路; L'_2 为故障点至母线 N 的线路;IIDG₁ 和 IIDG₂ 为逆变型分布式电源; R_0 为中性点接地小电阻。

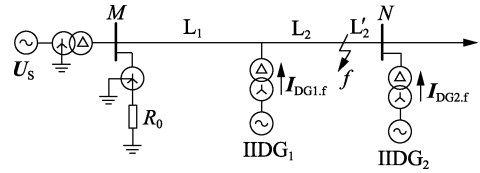


图 1 含 IIDG 的小电阻接地系统

Fig.1 Low resistance grounding system with IIDG

当图 1 中 IIDG₁ 下游线路某点发生 A 相接地故障时,由正序等效定则可得相应的各序序网,如附录中图 A1 所示。图中,上标“+”、“-”和“0”分别表示正序、负序和零序; Z_s 为系统阻抗; Z_{L1} 、 Z_{L2} 和 Z'_{L2} 分别为 IIDG₁ 上游、IIDG₁ 到故障点及故障点下游的线路阻抗; Z_{LD} 为负荷阻抗; Z_Δ 为附加阻抗; $I_{m,f}$ 为母线 M 出口处馈线电流; I_f 为故障点电流。因此,系统电压、PCC 正序电压及故障点正序电压为:

$$\begin{cases} U_s = I_{m,f}(Z_s^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+ + Z'_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + I_{DG1,f}(Z_{L2}^+ + Z'_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + I_{DG2,f}Z_{LD}^+ - I_f(Z'_{L2}^+ + Z_{LD}^+) \\ U_{PCC1,f}^+ = (I_{m,f}^+ + I_{DG1,f}^+)(Z_{L2}^+ + Z'_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + I_{DG2,f}Z_{LD}^+ - I_f^+(Z'_{L2}^+ + Z_{LD}^+) \\ U_{PCC2,f}^+ = (I_{m,f}^+ + I_{DG1,f}^+ + I_{DG2,f}^+ - I_f^+)Z_{LD}^+ \\ 0 = I_{m,f}^+(Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + I_{DG1,f}^+(Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + I_{DG2,f}Z_{LD}^+ - I_f^+(Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+ + Z_\Delta) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $Z_\Delta = Z_{ff}^- + Z_{ff}^0 + 3R_f$, Z_{ff}^- 和 Z_{ff}^0 分别为负序序网和零序序网的等效阻抗, R_f 为过渡阻抗。

$$\begin{cases} Z_{ff}^- = \frac{(Z_S^- + Z_{L1}^- + Z_{L2}^-)(Z_{L2}'^- + Z_{LD}^-)}{Z_S^- + Z_{L1}^- + Z_{L2}^- + Z_{L2}'^- + Z_{LD}^-} \\ Z_{ff}^0 = Z_S^0 + Z_{L1}^0 + Z_{L2}^0 \end{cases} \quad (5)$$

由于单相接地故障的短路点处存在 $I_f^+ = I_f^- = I_f^0$ 的关系,且有 $I_f^0 = I_{m,f}^0$,联立式(4)、(5),可得母线 M 出口处的馈线零序电流 $I_{m,f}^0$ 为:

$$I_{m,f}^0 = \frac{U_S + I_{DG1,f}(Z_S^+ + Z_{L1}^+) + I_{DG2,f} \frac{Z_{LD}^+(Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+)}{Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+}}{Z_{\Delta}^+(Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+ + Z_{L2}'^+ + Z_{LD}^+) + Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+} \quad (6)$$

2 零序电流迭代求解算法及其验证

2.1 零序电流迭代求解算法

由式(6)可知,计算含 IIDG 的小电阻接地系统馈线零序电流的重点是 IIDG 故障电流输出的计算。受控制策略的影响,PCC 电压和 IIDG 电流之间的关系是非线性的,因此 IIDG 的故障电流输出无法通过线性变换直接求解,但可以通过高斯迭代法求解。为了使计算公式具有通用性,本节采用节点电压方程作为迭代方程,若整条馈线中接有 n 个 IIDG,则迭代方程如下:

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_{DG1,f}^{(k)} \\ \vdots \\ I_{DGn,f}^{(k)} \\ I_f^{(k)} \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} U_{m,f}^{(k)} \\ U_{PCC1,f}^{(k)} \\ \vdots \\ U_{PCCn,f}^{(k)} \\ U_f^{(k)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,上标 (k) 表示当前迭代次数; I_S 为系统电源的等值电流源,且 $I_S = U_S / Z_S^+$; $U_{m,f}^+$ 为母线 M 处的正序电压; $I_{DG1,f}^{(k)} - I_{DGn,f}^{(k)}$ 和 $U_{PCC1,f}^{(k)} - U_{PCCn,f}^{(k)}$ 分别为各个 IIDG 的故障电流和并网点电压; $I_f^{(k)}$ 为故障节点的注入电流,若故障点无电源,则 $I_f^{(k)} = 0$; $U_f^{(k)}$ 为故障节点的正序电压; Y 为节点导纳矩阵,可根据配电网接地故障的正序复合序网生成。对于附录中图 A1 所示的单相接地故障复合序网而言, $n = 2$, $I_f^{(k)} = 0$, Y 可表示为:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_S^+ + Y_{L1}^+ & -Y_{L1}^+ & 0 & 0 \\ -Y_{L1}^+ & Y_{L1}^+ + Y_{L2}^+ & 0 & -Y_{L2}^+ \\ 0 & 0 & Y_{L2}^+ + Y_{LD}^+ & -Y_{L2}^+ \\ 0 & -Y_{L2}^+ & -Y_{L2}^+ & Y_{L2}^+ + Y_{L2}'^+ + Y_{\Delta}^+ \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,各导纳参数为相应线路、负荷和附加阻抗的等值导纳。

由式(2)和(3)可得到修正方程如下:

$$\begin{cases} I_{DG1,f}^{(k)} = \min \{ K(U_{PCC1,0} - U_{PCC1,f}^{+(k)}), I_{maxi} \} \\ I_{DGid,f}^{(k)} = \min \{ P_{refi} / U_{PCC1,f}^{+(k)}, \sqrt{I_{maxi}^2 - (I_{DGiq,f}^{(k)})^2} \} \\ I_{DGif}^{(k)} = (I_{DGid,f}^{(k)} \cos \delta_i^{(k)} + I_{DGiq,f}^{(k)} \sin \delta_i^{(k)}) + \\ \quad j(I_{DGid,f}^{(k)} \sin \delta_i^{(k)} - I_{DGiq,f}^{(k)} \cos \delta_i^{(k)}) \end{cases} \quad (9)$$

其中,下标 i 为 IIDG 的编号。收敛判据为:

$$\max \{ |I_{DGif}^{(k)} - I_{DGif}^{(k-1)}| \} < \varepsilon \quad (10)$$

其中, $\max$ 为取最大值函数。由于 IIDG 的最大故障电流输出最大不超过其额定电流的 2 倍,因此迭代时可以取 IIDG 的额定电流作为故障电流输出的迭代初值。矩阵 Y 为正定矩阵,所以该算法必定收敛。零序电流迭代求解算法流程图如图 2 所示。

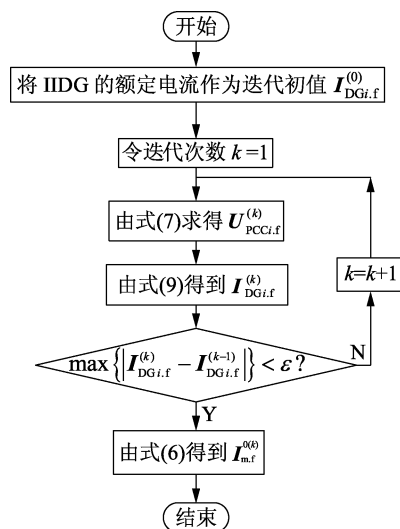


图 2 零序电流迭代求解算法流程图

Fig.2 Flowchart of iterative solution algorithm for zero-sequence current

2.2 算法验证

为了验证所提含 IIDG 的小电阻接地系统零序电流迭代求解算法的有效性和准确性,在电力系统 RTDS 上搭建如图 1 所示的小电阻接地系统模型,并利用 MATLAB 编写所提零序电流迭代求解算法程序,将计算结果与仿真结果进行比较。

图 1 所示小电阻接地系统的参数如下: IIDG₁ “T”接入线路、IIDG₂ 接入母线 N ,两者额定容量均为 5 MW,无功支撑系数 K 均取 2;系统等值电势 $U_S = 10.5$ kV,系统等值阻抗为 $j0.5 \Omega$;中性点接地电阻为 10Ω ,接地变压器的零序阻抗为 $10 \Omega/\text{相}$;线路全长 6 km,单位长度阻抗为 $0.13 + j0.35 \Omega/\text{km}$,单位长度零序阻抗为 $0.39 + j1.05 \Omega/\text{km}$;负荷阻抗为 $8 + j3 \Omega$;故障过渡电阻为 1Ω 。

a. 算法的有效性和准确性。

IIDG₁ 接于线路中点,2 个 IIDG 的出力均为 2.5 MW,当线路末端处发生单相接地故障时,计算结果和仿真结果如表 1 所示。

表 1 单相接地故障计算结果与仿真结果比较

Table 1 Comparison between calculative results and simulative results when single-phase grounding fault occurs

变量	计算结果	仿真结果
$I_{m.f}^0/\text{kA}$	$0.366 \angle -30.66^\circ$	$0.364 \angle -31.29^\circ$
$U_{PCC1.f}^+/ \text{kV}$	$7.549 \angle -6.83^\circ$	$7.542 \angle -7.13^\circ$
$I_{DG1.f}^+/ \text{kA}$	$0.228 \angle -20.94^\circ$	$0.228 \angle -21.00^\circ$
$U_{PCC2.f}^+/ \text{kV}$	$6.706 \angle -14.05^\circ$	$6.706 \angle -14.31^\circ$
$I_{DG2.f}^+/ \text{kA}$	$0.281 \angle -41.90^\circ$	$0.282 \angle -42.17^\circ$

由表 1 可知,当系统发生单相接地故障时,计算结果和仿真结果基本一致。母线 M 出口处馈线零序电流幅值相对误差为 0.55%,相角误差为 0.63° ; PCC 正序电压幅值最大相对误差为 0.09%,最大相角误差为 0.30° ; IIDG 故障电流输出幅值最大相对误差为 0.36%,最大相角误差为 0.27° 。

b. 算法的收敛性。

当线路末端 f 处发生单相接地故障时,零序电流迭代求解算法的迭代误差与迭代次数的关系如附录中图 A2 所示。其中,迭代误差 $\mu^{(k)}$ 为:

$$\mu^{(k)} = \max \{ |I_{DG1.f}^{(k)} - I_{DG1.f}^{(k-1)}| \} \quad (12)$$

由附录中图 A2 可见,随着迭代次数的增加,迭代误差迅速减小,计算结果收敛迅速,故本文所提零序电流迭代求解算法具有良好的收敛性。

c. 算法的用途。

本文所提算法可以实现含 IIDG 的小电阻接地配电网的接地故障分析和零序短路电流的准确计算,可应用于含 IIDG 配电网零序保护的灵敏性校验,以及指导配电网中 IIDG 的选址定容等。

本文所提算法也可用于零序保护的整定计算。此时需根据含 IIDG 的配电网拓扑,利用本文所提迭代求解算法计算当线路末端发生接地故障时线路出口处的零序电流,保护定值按照躲开该零序电流的原则整定。在整定计算时,可将过渡电阻设为 0,即按最大零序电流进行整定,或者根据需要设定所能容忍的最大过渡电阻 $R_{f,\max}$,从而减小过渡电阻对保护灵敏性的影响。

3 IIDG 对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响

3.1 IIDG 对馈线零序电流保护的影响

由式(2)和(6)可知,IIDG 对馈线零序电流 $I_{m.f}^0$ 的影响不仅取决于其控制策略,还与其接入位置和故障点有关。以 IIDG₁ 为例,根据式(6),其相量关系如图 3 所示,图中 φ 为阻抗角。

由式(6)和图 3 可见,若 $I_{DG1.f}(Z_s^+ + Z_{L1}^+)$ 与 U_s 的夹角小于 90° ,则 IIDG₁ 的输出电流将对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用。由于 PCC 电压滞后系统电压,即 $-90^\circ < \delta < 0^\circ$,且系统和线路阻抗呈感性,即 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$,所以 $I_{DG1.f}$

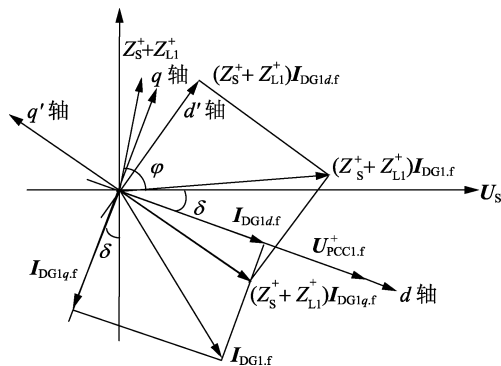


图 3 相量关系图

Fig.3 Diagram of phasor relationship

必定对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用;而 $I_{DG1.f}$ 仅在 $|\delta| > \varphi$ 时才有可能对 $I_{m.f}^0$ 起助减作用。对于小电阻接地系统而言,系统和线路正序阻抗呈强感性,即 $\varphi \gg 0^\circ$ 且 $\varphi > |\delta|$,因此 IIDG₁ 输出的无功电流对 $I_{m.f}^0$ 势必也起助增作用。

由式(2)和(6)可知,在 IIDG 输出电流尚未达到最大值 $I_{\max}$ 的情况下,其有功电流取决于一次能源输入的大小,一次能源输入越大,则输出的有功电流越大,对 $I_{m.f}^0$ 的助增作用也越大;IIDG 的无功电流输出取决于 PCC 的故障正序电压,即取决于 IIDG 的接入位置和故障点。以 IIDG₁ 为例,当其越远离系统电源且越接近故障点时,不仅 $Z_s^+ + Z_{L1}^+$ 变大、 Z_{L2}^+ 变小,同时 PCC 正序电压跌落也越严重,为了支撑电网电压,IIDG₁ 输出的无功电流也会越大。即 IIDG₁ 越远离系统电源且越接近故障点, $I_{DG1.f}$ 和 $Z_s^+ + Z_{L1}^+$ 将同时增大,式(6)分母不变, $I_{m.f}^0$ 变得越大,IIDG 的助增作用越大。IIDG 的助增作用必将造成馈线零序电流保护范围的越限,甚至误动。

3.2 算例验证

为了验证 IIDG 接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护影响的理论分析结论,本文在 MATLAB 中实现所提零序电流迭代求解算法,计算在不同故障情况下馈线零序电流值,并进行分析。故障分析模型采用图 1 所示的小电阻接地系统模型,模型参数和 2.2 节所述的一致。

3.2.1 IIDG 无功电流输出对馈线零序电流 $I_{m.f}^0$ 的影响

由于 IIDG 有功电流输出必定对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用,因此只需分析 IIDG 无功电流输出对 $I_{m.f}^0$ 的影响,就可知道 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 是否必定助增。设 IIDG₁ 和 IIDG₂ 均不出力;IIDG₁ “T” 接于线路中点,IIDG₂ 的接入位置为母线 N;分别在距离母线 M 3 km 处和 6 km 处发生单相接地故障。在 $I_{m.f}^0$ 的计算公式中,令 U_s 和 $I_{DG2.f}$ 为 0, $I_{DG1.f}$ 取迭代完成时的值,所求 $I_{m.f}^0$ 的幅值即为 IIDG₁ 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量,同理可得 IIDG₂ 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量,表达式如式(13)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta I_{m1.f}^0 &= \frac{I_{DG1.f} (Z_S^+ + Z_{L1}^+)}{Z_{\Delta} (Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+ + Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+} \\ &\quad \frac{Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+}{Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+} \\ \Delta I_{m2.f}^0 &= \frac{I_{DG2.f} (Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+)}{Z_{\Delta} (Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+ + Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+) + Z_S^+ + Z_{L1}^+ + Z_{L2}^+} \\ &\quad \frac{Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+}{Z_{L2}^+ + Z_{LD}^+} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

其中, $\Delta I_{m1.f}^0$ 和 $\Delta I_{m2.f}^0$ 分别为 IIDG₁ 和 IIDG₂ 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量。当单位长度线路电阻变化、电抗恒定为 0.35 Ω 时, 利用所提零序电流迭代求解算法计算单位长度线路电阻与电抗的比值从 0~4 变化过程中各 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量, 结果如图 4 所示。

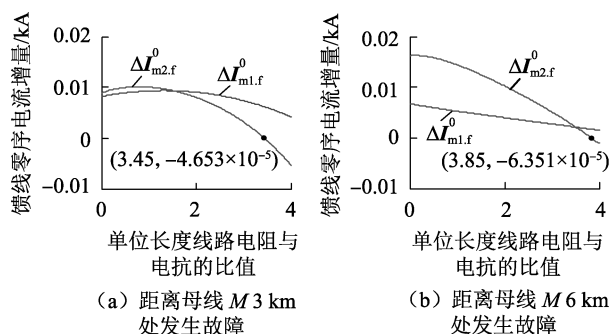


图4 单位长度线路电阻变化情况下馈线零序电流增量

Fig.4 Increment of zero-sequence current in feeder when line resistance in per unit length changes

由于 2 个 IIDG 均不出力, 因此二者都只输出无功电流。由图 4 可见, 仅当单位长度线路电阻与电抗的比值达到 3.4 以上时, IIDG₂ 输出的无功电流才有可能对 $I_{m.f}^0$ 起助减作用。对于小电阻接地系统而言, 不论是电缆线路还是架空线路, 其单位长度线路电阻与电抗的比值都无法达到该数值, 因此可认为 IIDG 的无功电流输出必定对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用。

3.2.2 IIDG 对馈线零序电流 $I_{m.f}^0$ 的助增情况

设 IIDG₁ 和 IIDG₂ 的出力均为 5 MW; IIDG₂ 接入位置为母线 N; IIDG₁ 并网点发生单相接地故障。利用所提零序电流迭代求解算法计算 IIDG₁ 并网点与故障点同时从母线 M 处移动至母线 N 处整个过程中各 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量, 结果如图 5 所示。

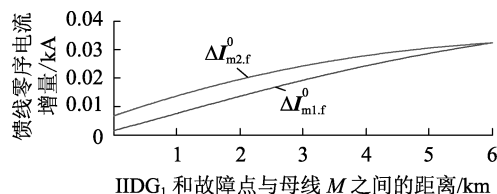
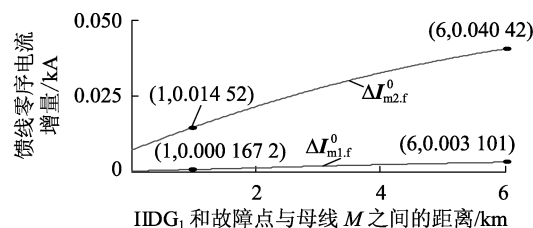


图5 IIDG 接入位置和故障点变化情况下馈线零序电流增量

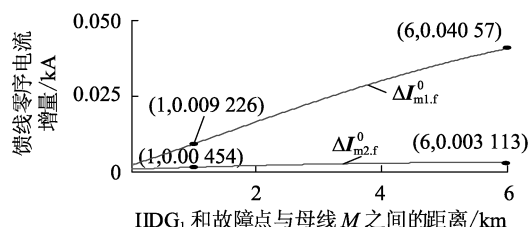
Fig.5 Increment of zero-sequence current in feeder when fault location and interconnected location of IIDG change

由图 5 可见, 不仅 IIDG₁ 对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用, IIDG₂ 虽位于故障点下游, 也始终对 $I_{m.f}^0$ 起助增作用。当 IIDG₁ 并网点与故障点同时向远离系统电源的方向移动时, IIDG₁ 对 $I_{m.f}^0$ 的助增作用越大; IIDG₂ 与系统电源位置关系不变, 故障点越靠近 IIDG₂, IIDG₂ 对 $I_{m.f}^0$ 的助增作用越大。这与 IIDG 越远离系统电源且越接近故障点对 $I_{m.f}^0$ 助增作用越显著的理论分析结论相一致。

容量不同的 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增作用也不同, 进而对馈线零序电流保护具有不同的影响程度, 因此有必要分析不同容量的 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的影响。设 2 个 IIDG 具有不同的额定容量, 其中一个 IIDG 的额定容量为 5 MW, 另外一个为 380 V 电压等级的 IIDG, 经过升压变压器直接接入 10 kV 馈线, 其额定容量为 380 V 电压等级分布式电源的最大准入容量, 即 0.4 MW^[19]。2 个 IIDG 有功出力均为其额定容量, 利用所提零序电流迭代求解算法计算 IIDG₁ 并网点与故障点同时从母线 M 处移动至母线 N 处的整个过程中各 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量, 结果如图 6 所示。



(a) IIDG₁ 有功出力为 0.4 MW、IIDG₂ 有功出力为 5 MW



(b) IIDG₁ 有功出力为 5 MW、IIDG₂ 有功出力为 0.4 MW

图6 不同容量 IIDG 的接入位置和故障点变化情况下馈线零序电流增量

Fig.6 Increment of zero-sequence current in feeder when fault location and interconnected location of IIDGs with different capacities change

由图 6 可见, 由于 2 个 IIDG 的额定容量相差很大, 其对 $I_{m.f}^0$ 的助增作用也相差很大。额定容量为 0.4 MW 的 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量约为额定容量为 5 MW 的 IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量的 1/10, 当接入数量不大时, 其对馈线零序电流保护的影响可忽略不计, 可通过可靠性系数消除零序保护误动的可能。

3.2.3 IIDG 对馈线零序电流保护的影响

设馈线零序电流瞬时速断保护定值按躲开下一条线路出口处单相接地故障时可能出现的最大零序

电流整定,且可靠系数取 1.2。由计算可得:当系统不含 IIDG 时,线路末端发生单相接地故障,馈线零序电流为 0.330 kA。因此,馈线零序电流瞬时速断保护定值为 0.396 kA,保护范围为线路全长的 77.3%,即保护范围末端与母线 M 相距 4.4 km。同时设 IIDG₁“T”接于线路中点,IIDG₂的接入位置为母线 N;距离母线 M 5.5 km 处发生单相接地故障。利用零序电流迭代求解算法计算 IIDG 不同出力情况下馈线零序电流 $I_{m.f}^0$,结果如图 7 所示,图中曲面为 $I_{m.f}^0$ 值,平面为保护定值。

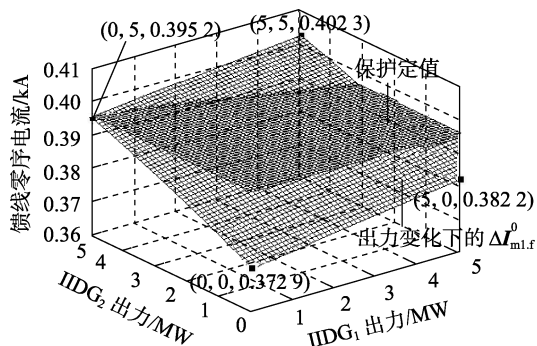


图7 IIDG 出力变化条件下 5.5 km 处发生单相接地故障时馈线零序电流

Fig.7 Zero-sequence current in feeder when output of IIDG changes and single-phase grounding fault occurs at distance of 5.5 km

由图 7 可见:当系统不含 IIDG 时,发生单相接地故障, $I_{m.f}^0=0.351$ kA;当 2 个 IIDG 出力均为 5 MW 时,IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增量达 14.62%;IIDG 对 $I_{m.f}^0$ 的助增将使馈线零序电流保护范围越限,当 IIDG 出力达到一定值时保护误动。

综合图 4—7 可知,当小电阻接地系统接有 IIDG 时,不论是在 IIDG 上游还是 IIDG 下游发生接地故障,IIDG 对馈线零序电流总是起助增作用。IIDG 离故障点越近、系统电源越远、出力越大,其对馈线零序电流的助增作用越显著。IIDG 的接入将造成小电阻接地系统馈线零序电流保护范围越限,并可能导致保护误动。

4 结论

为了研究 IIDG 接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护造成的不可避免的不良影响,本文提出了具有低电压穿越能力的 PQ 控制型 IIDG 接入的小电阻接地系统零序电流迭代求解算法,通过仿真证明了该算法的有效性和准确性。从理论研究出发,揭示了 IIDG 接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响机理:IIDG 越靠近故障点、越远离系统电源、出力越大,其对馈线零序电流的助增作用越大,将造成馈线零序电流保护范围越限,并可能导致保护误动。通过算例验证了理论研究的正确性。本

文所提故障分析方法可用于含 IIDG 配电网的规划以及自适应零序保护的研究,进而为分布式能源在配电网中的广泛应用提供理论支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] BARAN M E, ISMAIL E M. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [2] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW 617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 鲍薇, 胡学浩, 何国庆, 等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 46-52.
BAO Wei, HU Xuehao, HE Guoqing, et al. Study on standard for grid-integration of distributed resources[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 46-52.
- [4] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [5] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 10-17.
LI Bin, YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 10-17.
- [6] 薛永瑞, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.
XUE Yongrui, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problem of neutral grounding mode in active distributed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136.
- [7] 刘渝根, 王建南, 米宏伟, 等. 10 kV 配电网中性点接地方式的优化研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3355-3362.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MI Hongwei, et al. Optimization research on neutral grounding mode of 10 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3355-3362.
- [8] 刘明岩. 配电网中性点接地方式选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
LIU Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.
- [9] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [10] WANG Qianggang, ZHOU Niancheng, YU Ling. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1532-1542.
- [11] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations

- based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):555-561.
- [12] 谭会征,李永丽,陈晓龙,等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8):31-37.
- TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):31-37.
- [13] MOZINA C J. Impact of green power distributed generation [J]. IEEE Industry Application Magazine, 2010, 16(4):55-62.
- [14] KHEZRI R, SOOKOOHI S, GOLSHANNAVAZ S, et al. Intelligent over-current protection scheme in inverter-based microgrids[C]// Smart Grid Conference. Tehran, Iran; IEEE, 2017:53-59.
- [15] 陈晓龙,李永丽,谭会征,等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):107-112.
- CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):107-112.
- [16] 郭丽伟,薛永瑞,张林利,等. 含分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20):116-123.
- GUO Liwei, XUE Yongrui, ZHANG Linli, et al. Analysis of single-phase earth fault in low resistance grounded distribution network containing DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20):116-123.
- [17] TIMBUS A V, RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, et al. Control strategies for distributed power generation systems operating on faulty grid[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal, Quebec City, Canada; IEEE, 2007:1601-1607.
- [18] 曹相芹,鞠平,蔡昌春,等. 微电网仿真分析与等效化简[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5):94-98.
- CAO Xiangqin, JU Ping, CAI Changchun, et al. Simulative analysis and equivalent reduction for micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5):94-98.
- [19] 国家电网公司. 分布式电源接入电网技术规定:Q/GDW 1480—2015[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.

作者简介:



杨伟涛

杨伟涛(1993—),男,广东东莞人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统控制与保护(E-mail:epddalen@mail.scut.edu.cn);

曾德辉(1988—),男,河南焦作人,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统控制与保护(E-mail:danielzdh@126.com);

汪隆君(1982—),男,福建邵武人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性分析及最优化技术(E-mail:wlj_scut@126.com);

王 钢(1966—),男,福建连江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统控制、保护与自动化、规划与可靠性分析(E-mail:wangg@scut.edu.cn);

吴争荣(1978—),男,湖南永州人,工程师,博士,主要研究方向为含分布式电源的智能配电网保护(E-mail:wzrhn@163.com);

于 力(1983—),男,江西上饶人,工程师,博士,主要研究方向为智能配电网和微电网(E-mail:yuli@csg.cn)。

Influence of inverter interfaced distributed generators on zero-sequence current protection for feeder of low resistance grounding system

YANG Weitao¹, ZENG Dehui¹, WANG Longjun¹, WANG Gang¹, WU Zhengrong², YU Li²

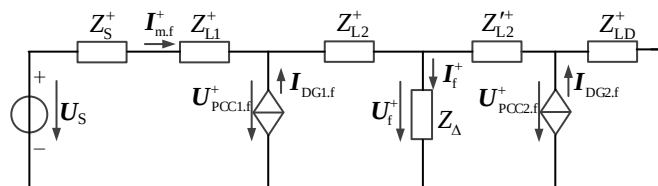
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

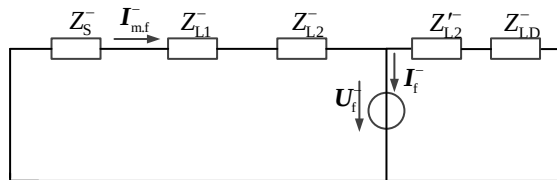
Abstract: The access of IIDG (Inverter Interfaced Distributed Generator) changes the grounding fault characteristics of low resistance grounding system, which not only makes the traditional calculation method of zero-sequence current no longer applicable, but also has a negative impact on the zero-sequence current protection of feeder. A PQ control strategy-based IIDG fault equivalent model with low voltage ride-through capability is established by analyzing the fault current characteristics of IIDG. Based on the analysis and modeling of grounding fault in the low resistance grounding system with IIDGs, an iterative solution algorithm of zero-sequence current is proposed. The solving procedure is compiled with MATLAB, and the calculative results are compared with the simulative results of the power system RTDS (Real-Time Digital Simulator) to verify the effectiveness and accuracy of the proposed algorithm. Based on the established fault analysis model, the influence mechanism of the IIDG access on the zero-sequence current protection of low resistance grounding system feeder is revealed. The zero-sequence currents of feeder under different fault conditions are calculated using the proposed iterative solution algorithm, which verifies the validity of the theoretical analysis.

Key words: inverter interfaced distributed generators; low resistance grounding system; PQ control strategy; low voltage ride-through; failure analysis; zero-sequence current protection of feeder; relay protection

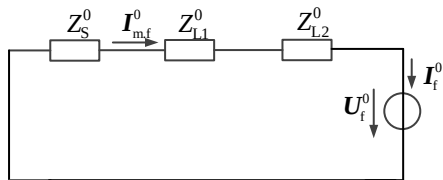
附录



(a) 复合序网



(b) 负序序网



(c) 零序序网

图 A1 单相接地故障各序序网

Fig.1 Sequence networks for single-phase grounding fault

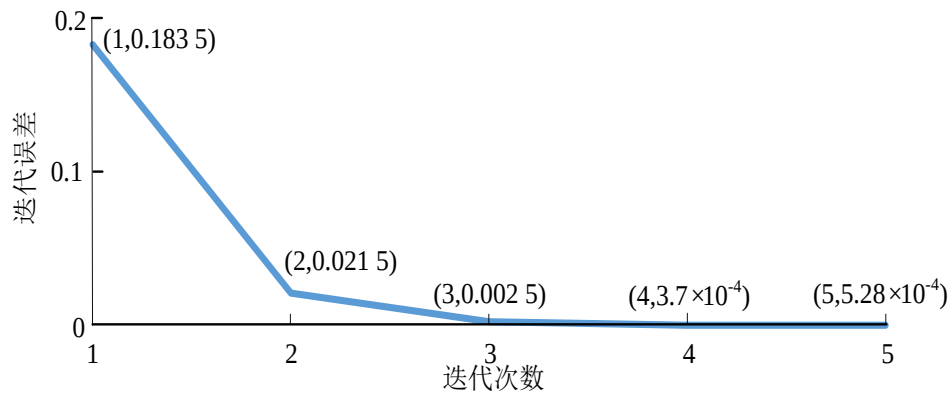


图 A2 迭代误差与迭代次数的关系

Fig.2 Relationship between iteration error and iteration times