

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210202

小电阻接地配电系统集中式接地保护研究

吴海江, 陈锦荣, 廖峰, 黎永豪

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要:为解决小电阻接地配电系统单相高阻接地故障检测困难和两出线同相接地故障时零序电流保护拒动的问题,提出一种基于中性线与各出线零序电流幅值比较的小电阻接地系统集中式接地保护方案。建立小电阻接地配电系统单相接地故障时等效零序网络,结合相量分析法,提取在不同故障位置、过渡电阻和线路对地电容等条件下单出线单相接地故障和两出线同相接地故障的普适性特征。并挖掘两种故障状态下的共性特征,形成适用于单出线或两出线单相接地故障的接地保护判据,准确地进行故障隔离。该方法利用中性线零序电流与各出线零序电流比值的相对差异,明确区分线路或母线侧单相接地故障,过渡电阻高达 $1\ 500\ \Omega$ 时依然成立。该保护算法启动值低,灵敏度高,定值裕度较大,稳定性好,适合配电网灵活运行方式。仿真结果表明接地故障特征分析结果的正确性和该保护方案的有效性。

关键词:小电阻接地配电系统;高阻接地;两出线同相接地;零序电流;集中式接地保护

Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system

WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, LI Yonghao

(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of single-phase high-resistance grounding fault detection in a low-resistance grounding system and the problem of protection rejection when single-phase grounding fault occurs under two feeders, a centralized protection scheme for such a system is proposed based on the comparisons of zero-sequence current amplitudes of the neutral line and each feeder. Combined with phasor analysis, the equivalent zero sequence networks of the system are established for when single-phase grounding faults under a single feeder or two feeders occur. Then the general characteristics under the two fault conditions are analyzed considering the different fault location, transition resistance and line capacitance to ground. The common fault characteristics are extracted to form the grounding protection criterion. This is applicable to single-phase grounding faults under single feeder or two feeders. The faults are isolated accurately. This method can clearly distinguish the single-phase grounding fault of the feeder and the bus side based on the relative difference of the zero-sequence current amplitudes of the neutral line and each feeder. The method remains valid even when the transition resistance is as high as $1\ 500\ \Omega$. The protection algorithm has the advantages of low starting value, high sensitivity, large margin of setting value and good stability. It is suitable for the flexible operation of a distribution network. The simulation results show that the analysis of grounding fault characteristics is correct and the protection scheme is effective.

This work is supported by the Key Project of National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050213) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. 030600KK 52200019[GDKJXM20200486]).

Key words: low-resistance grounding system; high-resistance grounding fault; single-phase grounding fault under two feeders; zero-sequence current; centralized grounding protection

0 引言

随着城市配电网规模扩大和地下电缆的大量采

用,配电网对地电容电流大大增加,中性点采用消弧补偿方式在工程中实施困难^[1]。我国配电网多采用中性点不接地或经过消弧线圈和高阻抗接地方式,单相接地的故障电流较小,给故障诊断带来了困难^[2-7]。小电阻接地方式能够克服不接地系统的铁磁谐振与经消弧线圈接地系统的串联谐振过电压问题,且在发生单相接地故障时故障特征相对明显,

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目资助(2012AA050213);南方电网公司科技项目资助(030600KK 52200019[GDKJXM20200486])

有助于快速检测并及时切除故障，减少对设备甚至人身安全的危害，在部分地区得到广泛应用^[8-10]。

小电阻接地系统现场常采用零序过电流保护作为接地故障保护，按躲过本线路对地电容电流来整定，定值较高，为 40~60 A，保护耐受过渡电阻能力 100 Ω 左右^[11-12]。系统在发生较低电阻的单相接地故障时，保护能可靠动作，但在发生高阻接地故障时，故障线路的零序电流稳态量可能低至几安，而其暂态分量幅值亦较小，且持续时间不到半个工频周期，故障检测困难，保护往往出现拒动，易引发火灾等事故^[13-14]。当发生两条出线同相接地故障时，由于零序电源增加，接地变零序电流增大，各故障出线零序电流幅值愈发减小，导致故障线路零序过电流保护灵敏度明显降低，可能出现拒动，而接地变保护可能误动，这种现象在某些变电站实际运行中已多次出现^[15-16]。

针对小电阻接地系统接地保护技术的这些问题，国内外学者做了广泛的研究。目前提出的高阻接地保护算法，显著提高了高阻故障检测能力，对解决高阻故障问题做出了较大贡献。文献^[17]提出基于各出线零序电流幅值相位综合比较的方法，但信息需同步，高阻故障时相位误差较大；文献^[12]通过判断零序功率方向实现保护，文献^[11]提出基于零序电压比率制动的自适应零序电流保护，这两种方法需采集电压信号，适用性有限制，高阻故障时偏差较大；文献^[18]提出基于中性点电流与零序电流投影量的差动保护算法，每个出线保护都要引入中性点电流；文献^[19]提出反时限零序电流保护算法，但整定计算相对复杂；文献^[10,20]提出基于零序电流波形特征的一类算法，但在噪声较大、非线性特征不明显时可能失效。近年来关于多点接地故障问题引起关注，提出了一些解决措施。文献^[15,21-23]根据多出线接地故障特征对本地零序电流保护提出改进，主要通过提高保护整定值和延长动作时限来保证保护的选择性；文献^[24]利用各出线零序电流幅值与相位之间的关系进行多出线故障识别实现保护，但定量分析过程仅考虑一般情况，结果不具普适性。

本文分析小电阻接地系统单出线单相接地故障和两出线同相接地故障时各出线和中性线零序电流特征，提出一种能够解决高阻故障问题并适用于两出线接地故障的小电阻接地系统集中式保护方案。在Z型变压器侧和各线路出口处采集零序电流，利用其幅值信息的相对差异集中决策，实现Z型接地变、主变受总、母线和线路接地保护有选择性地快速动作，并利用仿真验证其正确性。

1 故障特征分析

图 1 为典型的 10 kV 小电阻接地系统单相接地故障示意图。为了抑制三次谐波进入高压电网，变电站降压变压器采用 Y/D 连接。由于三角形接线无中性点，因此利用 Z 型接地变引出人为中性点，以加装接地电阻 R_n 。Z 型变压器具有较高的正负序阻抗，正常运行时等效阻抗为励磁阻抗。当系统发生接地故障时，零序阻抗只相当于漏抗，其值很小，对零序回路影响较小。为满足人身安全对接触电压和跨步电压的限制，中性点接地电阻值 R_n 适当取小，10 kV 系统通常取 10 Ω。图中线路 I 发生 A 相接地故障， $C_i (i=1, \dots, n)$ 为各出线对地电容，其容抗远大于线路阻抗和中性点接地电阻值， R_g 为故障点过渡电阻。

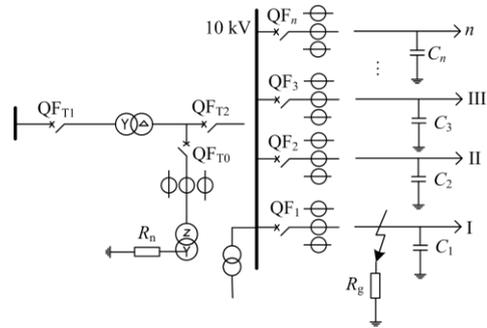


图 1 小电阻接地系统单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phased grounding fault in low-resistance grounding system

利用对称分量法分析故障点零序电流。根据图 1 绘制故障后复合序网图如图 2 所示。

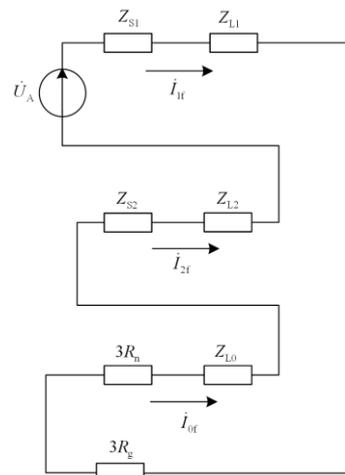


图 2 单相接地故障复合序网

Fig. 2 Complex sequence network of single-phased grounding fault

由于非故障线路对地容抗较大, 因此可忽略其对故障点零序电流的贡献; 而对于故障线路来说, 相较于系统和线路等效阻抗, 线路对地容抗较大, 而接地变压器零序阻抗很小, 为分析计算简便, 亦忽略其影响, 这不影响对故障点零序电流变化规律的粗略分析。图 2 中, Z_{S1} 和 Z_{S2} 分别为电源侧等值正序和负序阻抗; Z_{L1} 、 Z_{L2} 和 Z_{L0} 分别为故障点到母线的线路正序、负序和零序阻抗; \dot{U}_A 为正常运行时电源侧 A 相电压幅值。电源侧和线路的正序与负序阻抗基本相等, 则故障点零序电流有效值 $3I_{0f}$ (与工程现场一致, 一般取其 3 倍值) 可表示为

$$3I_{0f} = \frac{3\dot{U}_A}{\sqrt{2Z_{S1} + 2Z_{L1} + Z_{L0} + 3R_n + 3R_g}} \quad (1)$$

假设 10 kV 小电阻接地系统接地电阻值为 10Ω , 配电线路单位正序阻抗为 $(0.27 + j0.08) \Omega/\text{km}$, 单位零序阻抗为 $(2.7 + j0.348) \Omega/\text{km}$ 。根据式(1)得出系统发生单相金属性短路时故障点零序电流 ($3I_{0f}$) 与故障距离 x 和过渡电阻 R_g 之间的关系为

$$3I_{0f}(x) = \frac{18}{\sqrt{10.76x^2 + 194.4x + 900 + R_f(x)}} \quad (2)$$

式中, $R_f(x) = (180 + 19.44x)R_g + 9R_g^2$ 。线路出口金属性接地时 ($x=0$, $R_g=0$), 故障点零序电流为 600 A, 且随着故障距离的增加, 零序电流值单调下降; 线路出口故障, $R_g=50 \Omega$ 时, 零序电流下降到 100 A, 而过渡电阻一定, 故障距离从 0 增大到 1 km 时零序电流略微降低, 不超过 2 A; 过渡电阻大到 1 500 Ω 时, 零序电流几乎不受故障距离的影响, 幅值约为 3.8 A。

1.1 单出线单相接地故障特征

图 3 为小电阻接地系统单出线接地故障等效零序网络。为对比分析故障后各出线零序电流特征, 图中各非故障线路零序回路没有忽略。但在经非故障线路对地电容形成的零序回路中, 由于对地容抗远大于线路阻抗, 因此忽略非故障区段阻抗。中压配电网一般经 Δ/Y_0 或 Y/Y_0 接线方式的配电变压器与低压负荷连接, 因此零序网络不经过负荷。故障区段等效为 π 型等值电路, Z_{01f} 和 C_{1f} 分别为故障点到母线的线路零序阻抗和对地电容, C_{1h} 为故障点下游线路对地电容, \dot{U}_0 为母线零序电压, \dot{I}_{0i} ($i=1, \dots, n$) 为变电站各出线零序电流, \dot{I}_{0f} 为故障点零序电流, \dot{I}_{0R_n} 为中性线零序电流。

故障点零序电流经故障点处等效对地电容分流后, 流过线路阻抗 Z_{01f} 的电流 \dot{I}_{01f} 为

$$\dot{I}_{01f} = \frac{\frac{1}{j\omega\left(\frac{C_{1f}}{2} + C_{1h}\right)} \times \dot{I}_{0f}}{\left[3R_n \parallel \frac{1}{j\omega\left(\frac{C_{1f}}{2} + C_2 + \dots + C_n\right)}\right] + Z_{01f} + \frac{1}{j\omega\left(\frac{C_{1f}}{2} + C_{1h}\right)}} \quad (3)$$

式(3)分母中 Z_{01f} 远小于故障点处等效对地容抗, 分析计算中可忽略, 即图 3 中可去除 Z_{01f} , 进一步得母线零序电压 \dot{U}_0 为

$$\dot{U}_0 = \left(3R_n \parallel \frac{1}{j\omega C_\Sigma}\right) \dot{I}_{0f} \quad (4)$$

式中, C_Σ 为系统总的对地容抗。

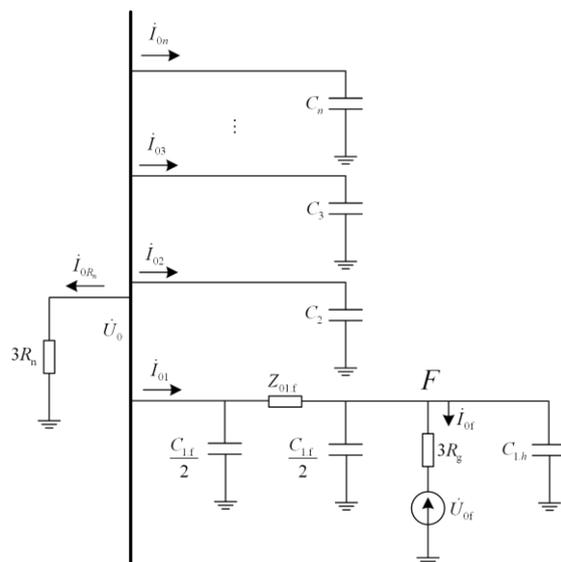


图 3 小电阻接地系统单相接地零序网络

Fig. 3 Zero-sequence network of single-phase grounding fault in low-resistance grounding system

系统一旦确定, 式(4)中 \dot{U}_0 与 \dot{I}_{0f} 成正比。结合前面的分析可知母线零序电压与故障距离和过渡电阻成反比。当变电站出线总长度为 200 km, 单位长度对地电容取 $0.17 \mu\text{F}/\text{km}$ 时, \dot{U}_0 与故障距离和过渡电阻的关系如图 4 所示。过渡电阻较小时, 母线零序电压较大, 并随故障距离的增大而单调下降; 随着过渡电阻的增加, 零序电压快速下降, 且随故障距离增大变化微小^[25]。过渡电阻约 1 000 Ω 时, 母线零序电压(电压互感器开口三角形侧值)将下降至 1 V 左右。值得注意的是, 系统正常运行时, 考虑全部出线的不对称度, 架空线路通常为 0.5%~1.5%, 电缆线路中约为 0.2%~0.5%, 结合现场采集正常运行时电压互感器开口三角形侧电压, 母线零序电压也约为 1 V^[26-27]。

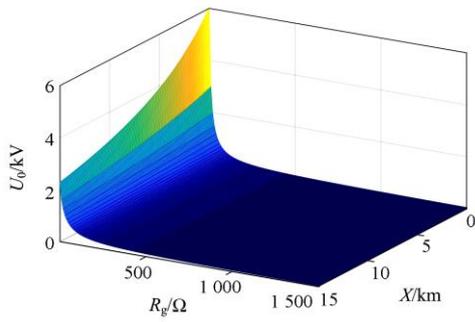


图 4 零序电压随故障距离和过渡电阻变化曲线

Fig. 4 Zero sequence voltage varying with fault distance and transition resistance

非故障线路零序电流为本线路对地电容电流

$$3\dot{i}_{0i} (i = 2, \dots, n) = 3j\omega C_{0i} \dot{U}_0 \quad (5)$$

中性线零序电流

$$3\dot{i}_{0R_n} = 3\dot{U}_0 / R_n \quad (6)$$

中性线零序电流 \dot{i}_{0f} 与任一非故障线路 i 的零序电流幅值之比满足

$$\left| \frac{3\dot{i}_{0R_n}}{3\dot{i}_{0i}} \right| = \frac{1}{R_n \cdot 3\omega C_{0i}} \quad (7)$$

假设单条线路最大电容电流为 50 A(极端情况下可能达到), 则线路最小容抗幅值约 115 Ω, R_n 为 10 Ω, 代入式(7)可得中性线零序电流和最大非故障线路零序电流幅值之比为 11.5。故障线路零序电流 \dot{i}_{0f} 为所有非故障线路和中性线零序电流矢量和的反向相量。根据式(5)和式(6)可知, 非故障线路零序电流和中性线零序电流相位相差 90°; 因此, 合成矢量幅值大于其中任一分量, 即故障线路零序电流幅值大于中性线零序电流幅值, 进一步可得故障线路零序电流幅值为任一非故障线路的 11.5 倍及其以上, 且母线出线数越多, 相差越大。但总地来说, 对地电容电流幅值相对中性线零序电流幅值仍相对较小, 根据现场和近似计算数据, 故障线路零序电流与中性线零序电流比值接近于 1^[15-16]。

1.2 两出线同相接地故障特征

图 3 网络中线路 I 和 II 同时发生 A 相接地故障时的等效零序网络如图 5 所示。分析母线零序电压和各出线零序电流, 同样可忽略线路等效阻抗。

由叠加原理可知, 中性线零序电流和对地电容电流由两个电源提供。比起单出线故障, 中性线零序电流有所增加, 母线零序电压升高, 增大幅度与过渡电阻大小成反比。对于故障线路, 由于母线电压升高, 导致故障点零序电流减小, 同时故障线路对地电容分流增大, 进而使故障线路零序电流减小,

可能导致故障线路保护拒动, 而接地变保护可能误动作, 造成母线失压。

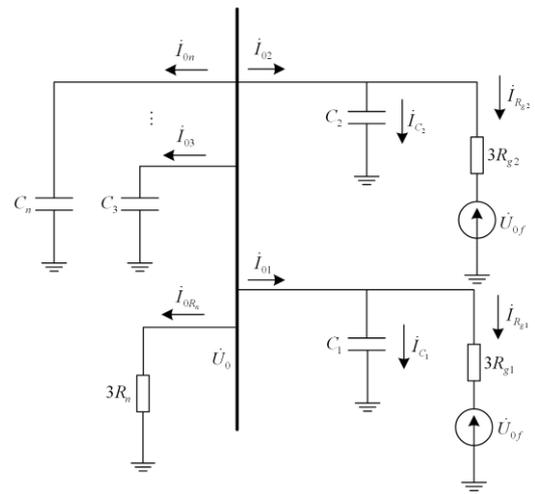


图 5 两出线接地故障时系统等效零序网络

Fig. 5 Zero-sequence equivalent network of two-outlet single-phase grounding faults

根据单出线接地故障特征分析结果, 两出线接地故障时依然存在中性线零序电流与任一非故障线路零序电流幅值之比 $\left| \frac{3\dot{i}_{0R_n}}{3\dot{i}_{0i}} \right| > 11.5$ 。另外, 由图 5

可得, 故障线路 I 和 II 的零序电流矢量和满足:

$$\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02} = -(\dot{i}_{03} + \dots + \dot{i}_{0n} + \dot{i}_{0R_n}),$$

两故障点电流矢量和满足:

$$\dot{i}_{R_{g1}} + \dot{i}_{R_{g2}} = \dot{i}_{01} + \dot{i}_{02} - (\dot{i}_{C1} + \dot{i}_{C2}),$$

对应相量在图 6 中表示。由于线路电容电流值很小, 因此, 两故障线路零序电流矢量和与两故障点零序电流矢量和的幅值将稍大于中性线零序电流幅值, 但差异较小。由于两故障点等效零序电压均等于故障前线路相电压, 因此故障线路 I 和 II 故障点零序电流 $\dot{i}_{R_{g1}}$ 与 $\dot{i}_{R_{g2}}$ 的方向相同, 均与其矢量和的方向一致, 而其值大小与各线路对地电容和故障点过渡电阻大小有关。进一步地, 故障线路零序电流 \dot{i}_{01} 与 \dot{i}_{02} 等于各自的故障点零序电流及线路对地电容电流矢量差, 可得相量 \dot{i}_{01} 的端点将落在图 6 点划线上, 相量 \dot{i}_{02} 的端点将落在图 6 点线上, 并且由于两相量和为 $\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}$, 则必然存在其中一个相量超前于 $\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}$, 另一个滞后于 $\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}$ 。若两故障线路对地电容电流和故障点过渡电阻完全相同, 则相量 \dot{i}_{01} 与 \dot{i}_{02} 的方向相同, 均落在 $\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}$ 的方向上。

因此可得 $|\dot{i}_{01}| + |\dot{i}_{02}| \geq |\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}|$, 而 $|\dot{i}_{01} + \dot{i}_{02}| > |\dot{i}_{0R_n}|$, 则 $|\dot{i}_{01}| + |\dot{i}_{02}| > |\dot{i}_{0R_n}|$, 即至少有一条故障线路

的零序电流幅值大于等于 1/2 倍的中性线零序电流, 进而大于任一非故障线路零序电流幅值的 5 倍以上。

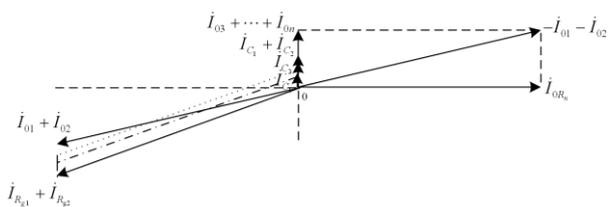


图 6 两出线同相接地故障时系统零序电流相量图

Fig. 6 Zero-sequence current phasor diagram of two-outlet in-phase grounding fault

1.3 单相接地故障特征

根据以上分析, 小电阻接地系统单出线或两出线单相接地故障特征总结如下:

1) 小电阻接地系统(中性点接地电阻 10 Ω)发生单相接地故障时, 接地电流较小, 不超过 600 A, 且随故障距离和过渡电阻的增加而减小。

2) 过渡电阻 50 Ω 以上时, 零序电流随故障距离的增加下降幅度已明显减小, 单位长度下降不到 2 A; 过渡电阻高达 1 500 Ω 时, 零序电流几乎不受故障距离的影响, 其值约为 3.8 A。

3) 系统发生单出线接地故障时, 母线零序电压与故障距离和故障点过渡电阻成反比; 过渡电阻约 1 000 Ω 时, 母线零序电压将下降至 1 V 左右。

4) 系统发生单出线接地故障时, 故障线路零序电流大于任一健全出线零序电流幅值的 11.5 倍以上, 且故障线路零序电流与中性线零序电流比值接近于 1。

5) 系统发生两出线同相接地故障时, 母线零序电压升高, 中性线零序电流增大, 故障线路零序电流减小, 但至少有一条故障线路的零序电流大于等于中性线零序电流的 1/2, 并大于任一非故障线路零序电流 5 倍以上。

2 集中式接地保护方案

2.1 保护原理

集中式接地保护采集各出线及中性线零序电流, 并进行集中比较确定故障位置。区别于本地保护, 该保护启动电流无需躲过其他线路故障时流过本线路的对地电容电流, 仅躲过线路最大不平衡电流, 之后通过各线路之间和中性线零序电流的相对值进行比较判断, 而非仅利用流过本线路的零序电流绝对值。因此, 即使保护启动电流低, 但绝不误

动, 且在高阻接地故障情况下, 零序电流相对大小关系依然成立, 保护灵敏度大大提高。但需要注意的是, 系统正常运行时, 考虑线路参数或负荷不对称产生的母线零序电压值与发生单相接地故障过渡电阻 1 000 Ω 左右时的母线零序电压基本相同, 此时中性线零序电流值均为 5.8 A, 而系统正常运行时各线路不平衡电流值远小于此值^[28-29], 因此, 将中性线零序电流启动值和线路零序电流启动值设计为不同值可提高保护灵敏度。

针对两出线同相接地故障, 由于故障线路零序电流值与两故障位置和线路电容关系复杂, 零序电流值很难确定, 本地保护易拒动。集中式保护思路利用故障线路与非故障线路及中性线零序电流的相对关系, 理论上高阻接地情况下仍能够确定至少一条故障线路, 当一条切除后故障特征更加明显, 另一条故障线路也可快速切除。

2.2 保护判据

根据 1.3 节的接地故障特征和上述保护原理, 适用于小电阻接地系统单出线单相接地和两出线同相接地故障的保护判据如下:

1) 任一出线 i 零序电流超过启动电流定值 I_{s1} 或中性线零序电流超过启动电流定值 I_{s2} 时保护启动。

2) 若出线 m 零序电流超过线路最大电容电流值 I_c , 即判断该出线为故障出线, 保护立即动作, 出线开关跳闸切除故障。

3) 仅中性线零序电流超过 I_c , 即判断母线及其至主变压器系统侧故障, 下转 6)。

4) 任一出线零序电流介于 I_{s1} 和 I_c 之间或中性线零序电流介于 I_{s2} 和 I_c 之间时, 则计算中性线零序电流与各出线零序电流最大值的比值, 若比值大于 α , 则判断为母线及其至主变压器系统侧故障, 下转 6); 若比值小于 α , 则判断零序电流最大的出线 n 为故障线路, 保护动作, 出线开关立即跳闸切除故障。

5) 若一条线路跳闸后, 仍存在中性线零序电流与其他出线零序电流最大值的比值小于 α , 则判断零序电流最大的出线 j 为另一故障线路, 保护动作, 该故障线路出线开关立即跳闸切除故障。

6) 判定母线及其至主变压器系统侧故障时, 母线分段开关首先跳闸。若延时 0.3 s 后故障特征依然满足条件, 则主变受总开关跳闸; 若开关动作后中性线零序电流仍大于 I_{s2} , 持续 0.3 s 后, 变压器总出口开关跳闸切除故障。

根据保护判据, 绘制小电阻接地配电系统集中式接地保护流程图, 如图 7 所示。

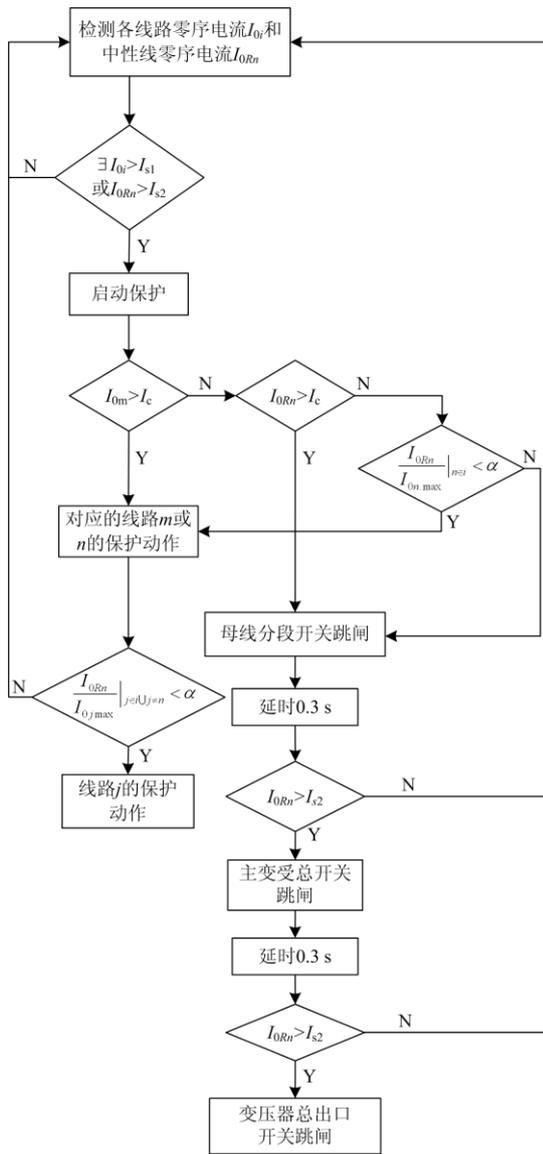


图 7 小电阻接地配电系统集中式接地保护流程图

Fig. 7 Protection flow chart of centralized protection for low-resistance grounding system

采用专用零序电流互感器时，保护启动电流躲过最大不平衡电流，并考虑零序电流互感器测量误差，因此，线路启动电流定值 I_{s1} 为 $3.4 \text{ A}^{[19,30]}$ ，中性线零序电流为 6 A 。线路故障过渡电阻达 1500Ω 时，故障线路零序电流约为 3.8 A ，保护能可靠启动。但母线故障过渡电阻约 950Ω 以上时，保护将拒动。线路最大电容电流不超过 50 A ，可靠系数取 1.2 ，则 I_c 可确定为 60 A 。根据 1.1 节分析结果：单条出线故障时，中性线与故障线路零序电流比值接近于 1 ；当两出线同相故障时，中性线零序电流与各出线零序电流最大值的比值最大为 2 。因此，考虑可靠系数为 1.2 ，保护判据中 α 取 2.4 。

3 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 软件工具建立 10 kV 小电阻接地系统，仿真模型结构如图 1 所示。变电站 5 条出线，线路 I—V，其长度分别为 3 km 、 8 km 、 12 km 、 5 km 和 10 km 。为反映故障时线路距离与容性电流的关系，仿真时所采用的线路模型为贝瑞隆模型，设置 f_1 (线路 II 上距离出口 3.5 km 处)、 f_2 (母线上)、 f_3 (主变受总开关到变压器低压侧出口之间) 分别发生 A 相接地故障，过渡电阻分别为 10Ω 、 100Ω 、 500Ω 和 1500Ω ，不同故障位置和不同过渡电阻时母线零序电压和各线路及中性线零序电流幅值如表 1 所示。设置 f_1 和 f_4 (线路 I 上距离出口 2 km 处) 同时发生 A 相接地故障，且两故障位置过渡电阻不同，母线零序电压和各线路及中性线零序电流幅值如表 2 所示。

表 1 不同故障位置和过渡电阻时各位置零序电压电流值
Table 1 Zero-sequence voltage and currents while faults occur with different transition resistances at different locations

故障位置	过渡电阻/ Ω	$3I_{01}/\text{A}$	$3I_{02}/\text{A}$	$3I_{03}/\text{A}$	$3I_{04}/\text{A}$	$3I_{05}/\text{A}$	$3I_{0n}/\text{A}$	$3U_0/\text{V}$
f_1	10	2.19	284.3	8.76	3.65	7.30	283.50	8 504
	100	0.40	52.3	1.6	0.67	1.34	52.20	1 565
	500	0.09	11.3	0.35	0.15	0.29	11.30	338.2
	1500	0.03	3.82	0.12	0.05	0.10	3.81	114.3
f_2	10	2.23	5.94	8.92	3.71	7.43	288.60	8 657
	100	0.40	1.08	1.62	0.68	1.35	51.57	1 570
	500	0.09	0.23	0.35	0.15	0.29	11.26	338.4
	1500	0.03	0.08	0.12	0.05	0.10	3.81	114.3
f_3	10	2.23	5.94	8.92	3.71	7.43	288.60	8 657
	100	0.40	1.08	1.62	0.68	1.35	51.57	1 570
	500	0.09	0.23	0.35	0.15	0.29	11.26	338.4
	1500	0.03	0.08	0.12	0.05	0.10	3.81	114.3

从表 1 中可以看出线路 II 中 f_1 处发生单相接地故障：过渡电阻为 10Ω 时，其出口零序电流值超过 60 A ，即可确定线路 II 为故障线路；当过渡电阻较大时，母线零序电压受过渡电阻影响较大，大幅降低，中性线零序电流和线路中零序电流最大值的比值接近于 1 ，可确定零序电流最大的线路，即线路 II 为故障线路；过渡电阻达 1500Ω 时，线路 II 零序电流仍大于电流启动值，保护启动，判据依然成立。母线上 f_2 处故障；过渡电阻为 10Ω 时，中性线零序电流超过 60 A ，即可确定母线及其至主变压器系统侧故障，根据不同延时跳开相应断路器；过渡电阻较大时，中性线零序电流和线路中零序电流

最大值的比值远大于 2.4, 亦可确定母线及其至主变压器系统侧故障; 当过渡电阻为 1 500 Ω 时, 线路零序电流和中性线零序电流均小于其启动电流值, 保护拒动。主变受总开关到变压器低压侧出口之间 f3 处故障, 各线路和中性线零序电流与 f₂ 故障时基本相同。

图 8 所示为 f₁ 处故障, 过渡电阻为 1 500 Ω 时各线路及中性线零序电流。从图中可以看出, 中性线零序电流与线路 II 出口零序电流幅值基本相等, 且远大于(超过 11.5 倍)其他线路零序电流幅值, 判定线路 II 为故障线路。

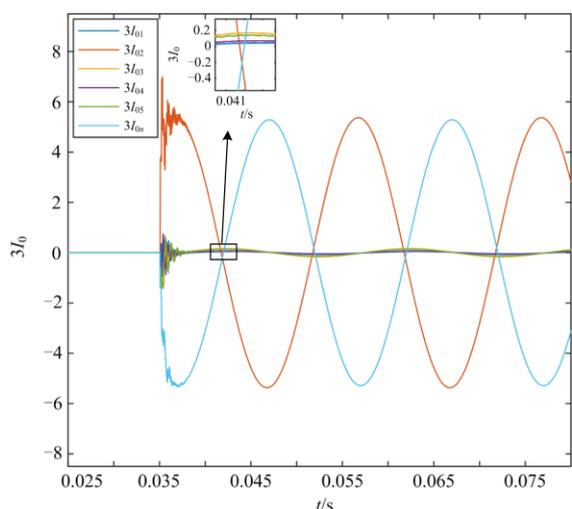


图 8 f₁ 处经 1 500 Ω 接地时各线路及中性线零序电流
Fig. 8 Zero-sequence currents while single-phase grounding fault occurs at f₁ with transition resistance 1 500 Ω

从表 2 中可看出, 当发生两出线同相接地故障时, 母线零序电压比单点故障时有所升高, 增大程度与过渡电阻大小成反比。当两点过渡电阻差异较小时, 两故障线路零序电流均大于其他健全线路零序电流, 且其中一条线路零序电流大于中性线电流的 1/2, 可首先判断该条线路为故障线路; 当两点过渡电阻差异较大时, 仅过渡电阻较小的线路零序电流大于其他健全线路, 且大于中性线电流的 1/2, 根据保护判据, 仍可首先判断该条线路为故障线路。

表 2 线路两点接地故障时各位置零序电压电流值

Table 2 Zero-sequence voltage and currents while two-point ground faults occur with different transition resistances

R_{g2}/Ω	R_{g1}/Ω	$3I_{01}/A$	$3I_{02}/A$	$3I_{03}/A$	$3I_{04}/A$	$3I_{05}/A$	$3I_{0n}/A$	$3U_0/V$
10	30	245.90	82.40	10.11	4.21	8.43	327.30	9 820
1 000	30	4.36	142.10	4.51	1.88	3.76	146.00	4 381
10	600	284.30	7.25	8.90	3.71	7.41	288.10	8 642
1 200	1 500	4.74	3.78	0.26	0.11	0.22	8.50	255

4 结论

利用小电阻接地系统发生单相接地故障或两出线同相接地故障后中性线零序电流与各出线零序电流比值的相对差异, 提出了一种集中式接地保护算法。理论和仿真分析可知: 单相接地故障时故障线路零序电流远大于非故障线路, 而中性线零序电流与故障线路零序电流几乎相同; 两出线同相接地故障时, 至少有一条故障线路零序电流远大于其余非故障线路, 且其值大于中性线零序电流的一半。因此, 集中式接地保护利用中性线零序电流与线路零序电流最大值的比值比较确定线路或母线侧故障。

保护启动电流只需躲过最大不平衡电流, 灵敏度大大提高; 线路单相接地故障过渡电阻高达 1 500 Ω 判据依然成立, 两出线接地故障时不受故障位置、过渡电阻差异和线路对地电容影响, 保护可靠性高; 另外保护不受线路参数或负荷不对称影响, 互感器测量误差的影响也考虑在内, 保护定值裕度较大, 稳定性好; 保护整定容易、运维简单、更适合配电网灵活运行方式。

参考文献

- [1] 郝越峰. 主动干预式消弧装置故障选线方法[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 184-188.
HAO Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 184-188.
- [2] 秦威南, 方玉群, 潜力群, 等. 超/特高压架空输电线路短路接地线烧伤分析[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 110-117.
QIN Weinan, FANG Yuqun, QIAN Liqun, et al. Research on electricity burn of shorting grounding wires in EHV and UHV transmission lines[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 110-117.
- [3] 李文明, 苏亮. 园区直流微电网的故障分析及保护配置方案研究[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 119-126.
LI Wenming, SU Liang. Fault Analysis and protection allocation research of park DC microgrid[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 119-126.
- [4] 高俊青, 李题印, 胡晓琴, 等. 考虑频段筛选的配电网单相接地选线方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 92-97, 118.
GAO Junqing, LI Tiying, HU Xiaoqin, et al. Line detection methods for single-phase grounding fault in distribution network considering frequency band selecting[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 92-97, 118.
- [5] 王磊, 张贺军, 徐铭铭, 等. 基于同步波形与关联规则

- 的单相接地故障诊断[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 112-119.
- WANG Lei, ZHANG Hejun, XU Mingming, et al. Single phase to ground fault diagnosis based on synchronous waveforms and association rules[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 112-119.
- [6] 贺晓, 陈洁羽, 张志华, 等. 含有主动干预防消弧装置的变电站消弧线圈动作特性[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 1-7, 12.
- HE Xiao, CHEN Jieyu, ZHANG Zhihua, et al. Action behaviors of the arc suppression coil of the substation containing the active intervention arc suppression device[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 1-7, 12.
- [7] 于游, 田景辅, 李涛. 平行双回线对反时限零序电流保护的影响及改进算法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 64-68, 74.
- YU You, TIAN Jingfu, LI Tao. Influence of parallel double circuits on inverse time-sequence zero-sequence current protection and the improved algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 64-68, 74.
- [8] 熊卫红, 毛兴华, 李景禄, 等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 166-172.
- XIONG Weihong, MAO Xinghua, LI Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 166-172.
- [9] 张健, 马伟, 朱亚奇, 等. 10 kV 配网中性点小电阻接地系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 109-115.
- ZHANG Jian, MA Wei, ZHU Yaqi, et al. Research and design of neutral grounding resistance system for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 109-115.
- [10] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
- GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [11] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.
- XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [12] 许庆强, 许杨, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94.
- XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94.
- [13] 杨帆, 李广, 沈煜, 等. 中压配电网单相接地故障熄弧后的电气特征分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 134-141.
- YANG Fan, LI Guang, SHEN Yu, et al. Electrical characteristics of medium voltage distribution network with single-phase-to-ground fault after arc extinction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 134-141.
- [14] 廖颖欢. 小电阻接地系统故障保护方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- LIAO Yinghuan. Protection method of low-resistance grounding system fault[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] 王英民. 10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序保护误动原因分析[J]. 华北电力技术, 2009(1): 24-26, 29.
- WANG Yingmin. Cause of malfunction of grounding transformer zero-sequence current protection in 10 kV low resistance grounding system[J]. North China Electric Power, 2009(1): 24-26, 29.
- [16] 潘艳, 李晓明, 袁勇, 等. 10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序保护误动机理研究[J]. 继电器, 2003, 31(1): 30-33.
- PAN Yan, LI Xiaoming, YUAN Yong, et al. Study on the misoperation mechanism of zero sequence protection of grounding transformer on low resistance grounded 10 kV system[J]. Relay, 2003, 31(1): 30-33.
- [17] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 15-21.
- LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 15-21.
- [18] 盛亚如, 丛伟, 卜祥海, 等. 基于中性点电流与零序电流投影量差动的小电阻接地系统高阻接地故障判断方

- 法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 17-22.
- SHENG Yaru, CONG Wei, BU Xianghai, et al. Detection method of high impedance grounding fault based on differential current of zero-sequence current projection and neutral point current in low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 17-22.
- [19] 汪洋, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电阻接地系统接地故障反时限零序过电流保护[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 150-157.
- WANG Yang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Zero-sequence inverse-time overcurrent protection in low resistance grounding system with grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 150-157.
- [20] SAMANTARAY S R, PANIGRAHI B K, DASH P K. High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2008, 2(2): 261-270.
- [21] 赵伟祺. 提高配网小电阻接地零序保护可靠性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- ZHAO Weiqi. Research of improving the reliability in zero-sequence protection of small resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [22] 黄俊恺. 小电阻接地系统复杂故障分析及保护新原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- HUANG Junkai. Study on complex fault analysis and new relaying principles in low resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [23] 张维. 小电阻接地系统分布式零序保护原理及装置[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- ZHANG Wei. Protection principle and device of the distributed zero-sequence protection in a low-resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [24] 林志超, 刘鑫醒, 王英民, 等. 适应多点接地故障的小电阻接地系统集中式保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 67-73.
- LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Centralized protection for low-resistance grounding system under multi-point grounding fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 67-73.
- [25] 袁超, 薛永端, 梅睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.
- YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [26] 于建龙, 陈忠仁, 张勤, 等. 自动补偿消弧装置运行问题探讨[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 80-81.
- YU Jianlong, CHEN Zhongren, ZHANG Qin, et al. Study on abnormal operation of auto compensation arc-suppression device[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 80-81.
- [27] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-0156-w.
- [28] 邓杰文, 卢彦西, 赵军. 不对称电网馈线零序电流分布特征分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 100-106.
- DENG Jiewen, LU Yanxi, ZHAO Jun. Analysis on distribution characteristics of zero sequence current of feeders in asymmetric grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 100-106.
- [29] 徐皓远, 刘波, 叶开, 等. 基于零序电流分布特性的配电网故障区段辨识[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 110-117, 164.
- XU Haoyuan, LIU Bo, YE Kai, et al. Identification of fault zones in distribution network based on zero sequence current distribution characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 110-117, 164.
- [30] 刘战磊, 曾祥君, 喻锟, 等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.
- LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 41-49.

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-07-08

作者简介:

吴海江(1972—), 男, 工程硕士, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为电力调度控制与系统运行、电力系统继电保护; E-mail: whj3310@163.com

陈锦荣(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及自动化;

廖峰(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 葛艳娜)