

灵活接地系统小电阻退出暂态特征及对暂态故障选线方法影响

王小帅¹, 薛永端¹, 刘萃萃¹, 田君杨², 徐丙垠³

1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东省青岛市 266580;
2. 广西电网电力调度控制中心, 广西壮族自治区南宁市 530023;
3. 山东理工大学智能电网研究院, 山东省淄博市 255049)

摘要: 灵活接地系统发生高阻接地故障时,中性点小电阻并联阶段保护往往拒动,仍需考虑小电阻退出时的暂态特征对已有暂态故障选线方法的影响。并联小电阻退出时伴随一定的暂态过渡过程,文中针对此过程建立灵活接地系统单相接地故障暂态等值电路。分析了并联小电阻退出时系统各暂态电气量特征、不同故障情况对暂态电气量幅值的影响、暂态零序电流与暂态零序电压的约束关系,明确并联小电阻退出后暂态量对暂态故障选线方法稳定性的影响。当灵活接地系统高阻接地故障小电阻退出时,产生的暂态电气量将导致暂态幅值比较法、暂态极性选线法、暂态功率方向法误动,但暂态零序电流投影法选线正确,仿真验证了分析结果的正确性。

关键词: 灵活接地系统; 单相接地故障; 暂态故障特征; 故障选线

0 引言

配电网采用灵活接地方式(中性点经消弧线圈并联小电阻接地)的初衷是降低瞬时性故障跳闸率和永久接地时可靠切除故障^[1-3],已在中国部分地区进行推广应用^[4-5]。其原理是在故障初始阶段,凭借消弧线圈补偿电流,使瞬时性故障熄弧;当故障持续一定时间被判定为永久性接地故障时,通过在系统中性点投入并联小电阻,以期增大故障线路零序电流,启动线路零序保护切除故障;不论保护是否正确动作,为避免中性点接地电阻过热,经过一段时间后并联小电阻退出运行,系统恢复为谐振接地方式。

目前,利用故障暂态信号进行故障定位与选线的小电流接地故障暂态选线法已在现场得到广泛应用^[6-7]。但是,对于灵活接地系统单相接地故障各个阶段的暂态特征分析及保护方法研究仍有不足,特别是系统发生高阻接地故障时小电阻并联阶段保护拒动后^[8],小电阻退出时的暂态特征可能使已有小电流接地故障暂态选线方法误动,需进一步明确。

针对现有配电网接地保护方法在灵活接地方式下适应性不足的问题^[9],一些学者就小电阻投入前后的电气量变化规律展开研究。文献^[10]分析了小电阻投入前后负序电压的变化规律,提出基于负序

电压变化量的故障定位方法,文献^[11]提出基于小电阻投入后扰动量标定的灵活接地系统定位方法,上述两种方法精度较高,但计算方法复杂,对通信要求较高。文献^[12-14]通过分析故障线路与健全线路零序电流幅值比、零序功率比及零序导纳模值比在并联小电阻投入前后的变化规律来确定故障线路,这些方法耐过渡电阻能力较强,但当系统发生高阻接地故障时,并联小电阻的投入将导致零序电压的稳态分量急剧减小,现有互感器精度可能无法满足检测要求。此外,还有学者对灵活接地系统接地故障暂态过程进行了研究。文献^[15]提出基于过渡电阻评估的灵活接地系统高阻接地故障暂态选线方法,但只建立了并联小电阻投入时的暂态等值电路,并没有分析并联小电阻退出时的暂态,相关暂态分析内容仍处于空白。

本文通过建立灵活接地系统单相接地故障暂态等值电路,对并联小电阻退出时刻的暂态过程进行分析,明确各暂态电气量的变化规律,并给出暂态零序电流与暂态零序电压的解析式,进一步明确小电阻退出后的暂态电气量对已有暂态选线法的影响,完善灵活接地系统接地故障暂态保护理论。

1 灵活接地系统单相接地故障小电阻投切分析模型

本文建立的灵活接地系统单相接地故障并联小电阻投切分析模型如图1所示。灵活接地系统发生

收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2024-03-25。
上网日期: 2024-06-04。
国家自然科学基金资助项目(52077221)。

永久性单相接地故障后,中性点并联小电阻延时投入,即此时产生暂态过程的虚拟电源位于中性点处,相当于中性点发生接地故障。因此,并联小电阻投入后,灵活接地系统永久性单相接地故障可近似看作两点相继接地故障:先发性故障虚拟电源即故障点电源 u_{f1} ,后发性虚拟电源即中性点虚拟电源 u_{f2} 。

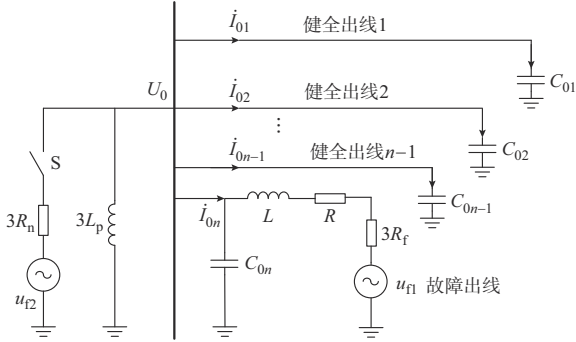


图1 灵活接地系统单相接地故障并联小电阻投切分析模型

Fig. 1 Analysis model of single-phase grounding fault with parallel small resistor switching for flexible grounding system

图1中: n 为系统出线数量; $\dot{I}_{01} \sim \dot{I}_{0n-1}$ 为各健全线路出口处的零序电流; \dot{I}_{0n} 为故障线路出口处的零序电流; $C_{01} \sim C_{0n}$ 为各线路的单相对地电容; U_0 为母线零序电压幅值; L_p 为消弧线圈电感; L 为故障线路故障点上游的线模电感与零模电感之和; R_f 为过渡电阻; R 为故障线路故障点上游的线模电阻与零模电阻之和; R_n 为中性点并联小电阻(下文简称小电阻); S 为小电阻投切开关; u_{f1} 为故障点虚拟电源, $u_{f1} = -U_{f1} \sin(\omega_0 t + \varphi)$,其中, U_{f1} 为故障相故障时电源电动势幅值, ω_0 为工频频率, φ 为故障发生瞬间电动势相角; u_{f2} 为中性点虚拟电源, $u_{f2} = -U_{f2} \sin(\omega_0 t + \phi)$,其中, U_{f2} 为并联小电阻投入之前即谐振接地阶段发生接地故障后的系统稳态零序电压幅值, ϕ 为小电阻投入时刻的零序电压相位。 U_{f2} 和 ϕ 可由谐振接地阶段单相接地故障等效电路求得^[16]。因故障发生引起的暂态过程持续时间较短,可认为并联小电阻投入前接地故障已进入稳态。

当开关 S 断开时,图1即为并联小电阻退出阶段等效电路。小电阻退出后的稳态电气量即为 u_{f1} 单独作用时的稳态电气量(谐振接地系统故障时的稳态电气量),暂态电气量为中性点虚拟电源 u_{f2} 退出时的暂态电气量。

2 灵活接地系统单相接地故障小电阻退出暂态特征分析

因为本文要分析灵活接地系统保护拒动后小电

阻退出时的电气量暂态分量,故需单独提炼暂态分量的分析模型。根据第1章分析可得,小电阻投退暂态过程仅由中性点虚拟电源引起。因此,分析灵活接地系统小电阻退出暂态特征时,只需涉及中性点虚拟电源单独作用时的等值电路。由电路叠加原理可知,灵活接地系统单相接地故障小电阻退出全电气量等值电路,可以是仅反映稳态量的等值电路与仅反映暂态量的等值电路的叠加,如图2所示。图中: C_Σ 为系统对地电容之和; i_{L_p} 为流经消弧线圈的零序电流; i_f 为故障点零序电流; u_c 为母线零序电压; $u_{c,P}$ 、 $i_{L_p,P}$ 和 $i_{f,P}$ 分别为 u_{f1} 单独作用时的稳态零序电压、消弧线圈稳态零序电流和故障点稳态零序电流; $u_{c,T}$ 、 $i_{L_p,T}$ 和 $i_{f,T}$ 分别为 u_{f2} 退出时的暂态零序电压、消弧线圈暂态零序电流和故障点暂态零序电流。

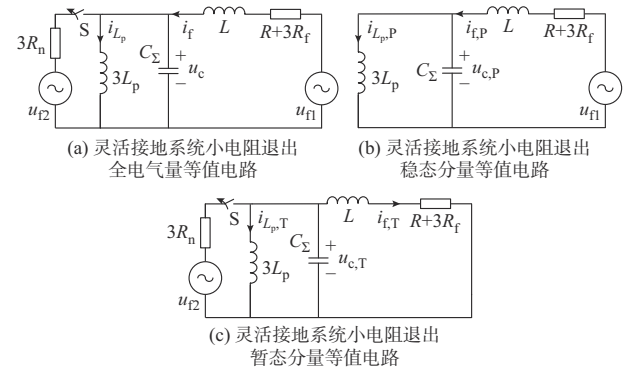


图2 灵活接地系统单相接地故障小电阻退出时刻状态分解
Fig. 2 State decomposition at the moment of small resistor exit for single-phase grounding fault in flexible grounding system

由图2(b)可知,小电阻退出后的稳态分量等效电路即为谐振接地系统等效电路,其详细分析可参见文献^[16]。

图2(c)所示暂态电路为三阶电路,无法得到解析解,故将其分为低阻、高阻两种情况进行降阶。

2.1 低阻接地暂态计算

当故障点过渡电阻较小、电容充电速度快、主谐振频率较大时,图2中消弧线圈等效阻抗远大于系统对地分布电容容抗^[16],消弧线圈对故障暂态的影响可以忽略不计,即当系统发生低阻接地故障时,等效电路可简化为图3所示的二阶RLC串联电路。

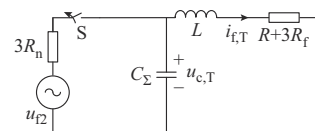


图3 简化后的低阻接地故障暂态等效电路
Fig. 3 Simplified transient equivalent circuit of low-resistor grounding fault

记 $R_a = R + 3R_f$, 设 $t=0$ 时投入小电阻, $t=t_1$ 时退出小电阻。依据图 3 建立微分方程:

$$\begin{cases} R_a i_{f,T} + L \frac{di_{f,T}}{dt} - u_{c,T} = 0 \\ i_{f,T} = -C_\Sigma \frac{du_{c,T}}{dt} \\ u_{c,T}(t_1) = u_{02}(t_1) \\ i_{f,T}(t_1) = i_{f2}(t_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{02}(t_1)$ 和 $i_{f2}(t_1)$ 分别为 u_{f2} 单独作用时, 小电阻退出时刻的零序电压瞬时值和故障点电流瞬时值。

求解式(1)可得零序电压 $u_{c,T}$ 为:

$$u_{c,T} = e^{-\partial_1 t} \left[u_{02}(t_1) \cos \omega_h t + \left(\frac{i_{f2}(t_1)}{\omega_h C_\Sigma} + \frac{\partial_1 u_{02}(t_1)}{\omega_h} \right) \sin \omega_h t \right] \quad (2)$$

式中: ∂_1 为衰减因子, $\partial_1 = R_a / (2L)$; ω_h 为主谐振频率, $\omega_h = \sqrt{1/(LC_\Sigma) - R_a^2/(4L^2)}$ 。

为简便计算, 令 $A_1 = u_{02}(t_1)$, $A_2 = i_{f2}(t_1) / (\omega_h C_\Sigma) + \partial_1 u_{02}(t_1) / \omega_h$, 求得故障点电流 $i_{f,T}$ 为:

$$i_{f,T} = -C_\Sigma \frac{du_{c,T}}{dt} = -C_\Sigma e^{-\partial_1 t} [(-\partial_1 A_1 + \omega_h A_2) \cdot \cos \omega_h t - (\partial_1 A_2 + \omega_h A_1) \sin \omega_h t] \quad (3)$$

第 j 条健全线路出口处零序电流 $i_{j,T}$ 即为线路自身对地零序电容电流:

$$i_{j,T} = C_j e^{-\partial_1 t} [(-\partial_1 A_1 + \omega_h A_2) \cos \omega_h t - (\partial_1 A_2 + \omega_h A_1) \sin \omega_h t] \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

式中: C_j 为第 j 条健全线路的单相对地电容。

第 n 条故障线路出口处零序电流 $i_{n,T}$ 为:

$$i_{n,T} = i_{cn,T} + i_{f,T} = (C_n - C_\Sigma) \frac{du_{c,T}}{dt} = - \sum_{j=1}^{n-1} C_j \frac{du_{c,T}}{dt} \quad (5)$$

式中: $i_{cn,T}$ 为故障线路自身对地电容电流; C_n 为第 n 条故障线路的单相对地电容。

由式(2)一式(5)可得, 母线零序电压和各线路出口处零序电流均为自由分量(衰减振荡分量)。故障线路出口处零序电流与健全线路出口处零序电流极性相反, 且故障线路出口处零序电流幅值远大于健全线路出口处零序电流幅值。由于衰减因子均为 ∂_1 , 上述电气量在经过 $t = 1/\partial_1$ 后会衰减为零。

考虑系统对地电容、故障点过渡电阻及故障点上游电感的一般取值范围^[17], 计算得到衰减因子的取值范围为 $24.87 \text{ s}^{-1} < \partial_1 < 6\,900.65 \text{ s}^{-1}$ 。衰减因子

的大小表征了暂态过程持续时间的长短。在低阻接地故障范围内, 当故障点上游电感为定值时, 故障点过渡电阻阻值越大, 衰减因子数值越小, 暂态信号衰减速度越快, 越不利于故障检测。

2.2 高阻接地暂态计算

当接地点过渡电阻大于工频下系统容抗的 $1/10$ 时, 应考虑消弧线圈对暂态的影响^[16]。又因为高阻接地时, 接地点过渡电阻远大于故障点上游的线路阻抗, 此暂态过程主要为系统电容与消弧线圈间的并联谐振。因此, 图 2 所示等值电路可简化为如图 4 所示的二阶暂态等值电路。

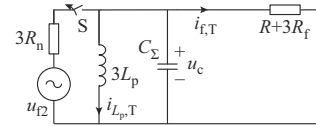


图 4 简化后的高阻接地故障暂态等效电路
Fig. 4 Simplified transient equivalent circuit of high-resistor grounding fault

根据图 4 所示暂态等值电路, 列出微分方程并求得其特征根:

$$\begin{cases} 3L_p C_\Sigma \frac{d^2 i_{L_p,T}}{dt^2} + \frac{L_p}{R_f} \frac{di_{L_p,T}}{dt} + i_{L_p,T} = 0 \\ u_{c,T}(t_1) = u_{02}(t_1) \\ i_{L_p,T}(t_1) = i_{L_p2}(t_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{L_p2}(t_1)$ 为 u_{f2} 单独作用时, 小电阻退出时刻流经消弧线圈的电流瞬时值。

对式(6)求解, 得其特征根为:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{6R_f C_\Sigma} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{6R_f C_\Sigma}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_\Sigma}} \quad (7)$$

根据过渡电阻 R_f 的大小, 可分为欠阻尼和过阻尼两种情况进行讨论。

1) 欠阻尼

当 $12R_f^2 > (L_p/C_\Sigma)$ 时, 特征根为两个共轭复根, 系统进入欠阻尼状态, 这也是大部分高阻接地故障的振荡状态。可得流经消弧线圈的电流为:

$$i_{L_p,T}(t) = e^{-\partial_1 t} \left[i_{L_p2}(t_1) \cos \omega_f t + \left(\frac{u_{02}(t_1)}{3L_p \omega_f} + \frac{\partial i_{L_p2}(t_1)}{\omega_f} \right) \sin \omega_f t \right] \quad (8)$$

即流经消弧线圈电流为自由分量, 其暂态主谐振频率 ω_f 和衰减因子 ∂ 分别为:

$$\omega_f = \sqrt{\frac{1}{3L_p C_\Sigma} - \left(\frac{1}{6R_f C_\Sigma}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 (1 + \nu) - \partial^2} \quad (9)$$

$$\partial = \frac{1}{6R_f C_\Sigma} \quad (10)$$

式中: v 为过补偿度^[18],一般取值为5%~10%。

根据式(9)可知,谐振频率 ω_f 与系统对地电容和过补偿度呈正相关,但 ω_f 存在上限值: $\omega_{f,\max} = \omega_0 \sqrt{1+v} = 345.58$,对应频率为55 Hz。即对于确定的系统,当过渡电阻值逐渐上升时,谐振频率也将从0开始单调上升,其上限略微超过工频频率。

由于灵活接地系统小电阻退出后,系统恢复成谐振接地。通常情况下,对于10 kV谐振接地配电网,系统对地电容电流的取值范围为20~200 A,对应的系统单相对地电容的取值范围为10.5~105.1 μF 。设需要检测的最大过渡电阻为5 000 Ω ,根据式(10)可得灵活接地系统小电阻退出后系统衰减因子变化范围为0.314~345.58 s^{-1} 。

为简便计算,令 $A_3 = i_{L_p,2}(t_1)$, $A_4 = u_{02}(t_1)/(3L_p \omega_f) + \partial i_{L_p,2}(t_1)/\omega_f$ 。由式(8)进一步可得母线零序电压为:

$$u_{c,T} = 3L_p \frac{di_{L_p,T}}{dt} = 3L_p e^{-\partial t} [(-\partial A_3 + \omega_f A_4) \cos \omega_f t - (\partial A_4 + \omega_f A_3) \sin \omega_f t] \quad (11)$$

各健全线路出口处零序电流 $i_{c,T}$ 为:

$$i_{c,T} = C_j \frac{du_{c,T}}{dt} = C_j 3L_p e^{-\partial t} \{[(\partial^2 - \omega_f^2) A_3 - 2\partial \omega_f A_4] \cos \omega_f t + [(\partial^2 - \omega_f^2) A_4 + 2\partial \omega_f A_3] \sin \omega_f t\} \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (12)$$

故障线路出口处零序电流 $i_{0n,T}$ 为:

$$i_{0n,T} = i_{cn,T} i_{f,T} = C_n \frac{du_{c,T}}{dt} + \frac{u_{c,T}}{3R_f} = 3C_n L_p e^{-\partial t} \{[(\partial^2 - \omega_f^2) A_3 - 2\partial \omega_f A_4] \cos \omega_f t + [(\partial^2 - \omega_f^2) A_4 + 2\partial \omega_f A_3] \sin \omega_f t\} + \frac{L_p e^{-\partial t}}{R_f} [(-\partial A_3 + \omega_f A_4) \cos \omega_f t - (\partial A_4 + \omega_f A_3) \sin \omega_f t] \quad (13)$$

由式(12)可得,健全线路出口处零序电流正比于母线零序电压的导数,且零序电流、零序电压都是衰减的正弦波形,故二者存在近乎正交的关系。

由式(12)、式(13)可得,故障线路出口处零序电流由两部分组成。其中, $i_{cn,T}$ 为故障线路自身对地电容电流,且与任一健全线路出口处零序电流的比值等于这两条线路对地电容的比值; $i_{f,T}$ 为故障点暂态零序电流,正比于母线零序电压,比例系数是3倍的过渡电阻。可见,故障线路与健全线路的极性与幅值无法直接判定。

$$i_{cn,T} = C_n \frac{du_{c,T}}{dt} = \frac{C_n}{C_j} i_{c,T} \quad (14)$$

$$i_{f,T} = \frac{u_{c,T}}{3R_f} \quad (15)$$

2)过阻尼

当 $12R_f^2 < (L_p/C_\Sigma)$ 时,特征根为两个不同的负实数,可推导出通过消弧线圈的电流 $i_{L_p,T}$ 为:

$$\begin{cases} i_{L_p,T} = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} \\ p_{1,2} = -\frac{1}{6R_f C_\Sigma} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{6R_f C_\Sigma}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_\Sigma}} \\ B_1 = i_{L_p,2}(t_1) - \frac{3L_p p_1 i_{L_p,2}(t_1) - u_{02}(t_1)}{3L_p(p_1 - p_2)} \\ B_2 = \frac{3L_p p_1 i_{L_p,2}(t_1) - u_{02}(t_1)}{3L_p(p_1 - p_2)} \end{cases} \quad (16)$$

母线零序电压 $u_{c,T}$ 为:

$$u_{c,T} = 3L_p \frac{di_{L_p,T}}{dt} = 3L_p (B_1 p_1 e^{p_1 t} + B_2 p_2 e^{p_2 t}) \quad (17)$$

各健全线路出口处零序电流 $i_{j,T}$ 为:

$$i_{j,T} = C_j \frac{du_{c,T}}{dt} = 3L_p C_j (B_1 p_1^2 e^{p_1 t} + B_2 p_2^2 e^{p_2 t}) \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (18)$$

故障线路出口处零序电流为:

$$i_{0n,T} = C_n \frac{du_{c,T}}{dt} + \frac{u_{c,T}}{3R_f} = 3L_p C_n (B_1 p_1^2 e^{p_1 t} + B_2 p_2^2 e^{p_2 t}) + \frac{L_p}{R_f} (B_1 p_1 e^{p_1 t} + B_2 p_2 e^{p_2 t}) \quad (19)$$

由以上分析可得,当系统发生高阻接地故障且进入过阻尼状态时,故障点电流和消弧线圈电流均为衰减的直流量。同时,故障线路出口处零序电流与母线零序电压的关系与欠阻尼状态下的关系一致,此处不再赘述。

2.3 小电阻退出时刻初值分析

根据图2(c)可知,小电阻退出阶段的电气特性取决于参数 L_p 、 L 、 C_Σ 和 R_f ,而小电阻退出过程中暂态电气量的幅值取决于开关S断开时储能元件的初值。由叠加原理可知,储能元件的初值由 u_{12} 单独作用时的等值电路求得。由上述分析可知, u_{12} 单独作用时母线零序电压为 u_{02} ,故障点电流为 i_{12} ,消弧线圈电流为 $i_{L_p,2}$ 。设 u_{n1} 单独作用时母线零序电压为 u_{01} ,故障点电流为 i_{11} ,消弧线圈电流为 $i_{L_p,1}$ 。可求得小电阻退出前系统母线零序电压 u_0 为(设 $t=0$ s时投入小电阻):

$$u_0 = u_{01} + u_{02} = U_{01} \sin(\omega_0 t + \phi') + U_{02} \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (20)$$

式中: U_{01} 为 u_{01} 的幅值; ϕ' 为 u_{01} 的初相角; U_{02} 为 u_{02} 的幅值; α 为 u_{02} 的初相角。

下文分析均假设小电阻工频电流过零点时退出,设此时刻为 t_1 。

设并联小电阻工频电流为 i_{R_n} ,由第1章分析可知 $u_{01} = -u_{02}$ 。由图4可求得:

$$i_{R_n} = \frac{u_{02} - u_{01}}{3R_n} = \frac{-u_{01} - u_{01}}{3R_n} = -\frac{u_{01}}{3R_n} \quad (21)$$

由式(21)可得,当小电阻工频电流过零点退出时,系统母线零序电压也为零,即 $u_{02}(t_1) = -u_{01}(t_1)$ 。此时,图2(c)中暂态零序电压的初值即为谐振接地电路母线零序电压瞬时值的相反数。记小电阻退出时 u_{01} 的相位为 β , $\beta \in (0, 2\pi)$ 。由于小电阻退出瞬间 u_{02} 不能突变,可求得此时暂态零序电压初值为:

$$u_{c,T}(t_{1+}) = u_{02}(t_{1-}) = -U_{01} \sin(\omega_0 t_1 + \phi') = -U_{01} \sin \beta \quad (22)$$

式中: t_{1-} 、 t_{1+} 分别表示小电阻退出时的前、后时刻。

对于剩余储能元件初值的分析,需要分别对低阻接地故障和高阻接地故障两种情况进行讨论。

1) 低阻接地故障

母线零序电压 u_{01} 和 u_{02} 的幅值和相角见附录A式(A1)。由式(A1)可求得暂态故障点的电流初值为:

$$i_{i,T}(t_{1+}) = i_{i2}(t_{1-}) = \frac{U_{02}}{\sqrt{R_a^2 + (\omega_0 L)^2}} \sin\left(\omega_0 t_1 + \alpha - \arctan \frac{\omega_0 L}{R_a}\right) \quad (23)$$

2) 高阻接地故障

根据图2和图4可求得在系统发生高阻接地故障小电阻退出前,母线零序电压 u_{01} 和 u_{02} 的幅值和相角,见附录A式(A2)。

由于系统故障点到母线距离一般小于20 km,对应的线路电感取值范围为2~114 mH^[15]。当系统发生高阻故障时,接地点过渡电阻远大于线路感抗。因此,为简便计算,附录A式(A2)中不考虑线路感抗的影响。

由式(20)可得小电阻退出前,消弧线圈电流的相量表达形式,如式(24)所示。

$$\dot{I}_{L_p} = \frac{U_{01} \angle \phi' + U_{02} \angle \alpha}{j3\omega_0 L_p} = (1 + \nu)\omega_0 C_\Sigma (U_{01} \angle \phi' - 90^\circ + U_{02} \angle \alpha - 90^\circ) \quad (24)$$

对于确定的系统,该值主要依赖于过渡电阻与过补偿度的大小。消弧线圈稳态电流有功部分通常小于无功部分的7%^[19]。经过计算可知,消弧线圈电流与零序电压相角差的范围为86°~90°,可近似

认为消弧线圈电流比零序电压滞后90°。因此,当小电阻工频电流过零点退出时,可认为消弧线圈电流达到峰值,即在并联小电阻退出时刻,系统消弧线圈电流的瞬时值为 $i_{L_p}(t_1) = I_{L_p}$,即 $i_{L_p2}(t_1) = I_{L_p} - i_{L_p1}(t_1)$ 。

由式(24)可求得消弧线圈暂态零序电流初值为:

$$i_{L_p,T}(t_{1+}) = I_{L_p} + (1 + \nu)\omega_0 C_\Sigma U_{01} \cos \beta \quad (25)$$

对于10 kV系统,设对地电容电流为80 A,90°时, $i_{L_p,T}(t_{1+})$ 随 R_f 的过补偿度 ν 的变化情况如图5所示。

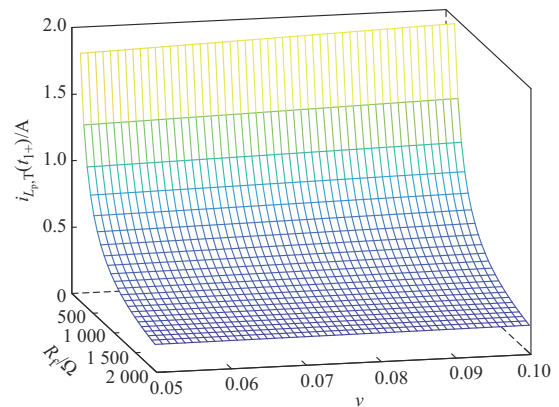


图5 消弧线圈电流初值变化规律

Fig. 5 Law of initial value variation of arc suppression coil current

由图5可知,当 u_{01} 在小电阻退出时刻相位为90°时,消弧线圈暂态零序电流初值与过渡电阻成反比,与过补偿度成正比。

3 现有暂态检测方法对于灵活接地系统接地故障适用性

由2.2节分析可知,小电阻退出时暂态主谐振频率符合传统暂态选线方法检测频段的要求^[20],可进一步分析现有暂态选线方法在灵活接地系统中的适用性。

3.1 低阻接地故障

1) 对暂态电流幅值比较法^[21]的影响

暂态电流幅值比较法的基本原理是:选择各线路出口处暂态零序电流幅值最大的线路为故障线路。分析可得第 j 条健全线路出口处零序电流 $i_{j,T}$ 的幅值为:

$$I_{j,T} = C_j \sqrt{(-\partial_1 A_1 + \omega_h A_2)^2 + (\partial_1 A_2 + \omega_h A_1)^2} \quad (26)$$

故障线路出口处零序电流 $i_{n,T}$ 的幅值为:

$$I_{n,T} = (C_\Sigma - C_n) \cdot \sqrt{(-\partial_1 A_1 + \omega_h A_2)^2 + (\partial_1 A_2 + \omega_h A_1)^2} \quad (27)$$

易知故障线路出口处暂态零序电流幅值最大,其与健全线路出口处暂态零序电流幅值之比等于所有健全线路对地电容之和与该健全线路对地电容之比。因此,可采用暂态零序电流幅值比较法进行选线。

2)对暂态电流极性比较法^[21]的影响

暂态电流极性比较法的基本原理是:比较所有线路出口处暂态零序电流的极性,若某条线路和其他线路极性相反,则该线路为故障线路;若所有线路都极性相同,则判定为母线接地。

设第 r 、 s 条线路出口暂态零序电流 $i_r(t)$ 、 $i_s(t)$ 在暂态持续时间内的极性系数 P_{rs} 为:

$$P_{rs} = \frac{1}{T} \int_0^T i_r(t) i_s(t) dt \quad (28)$$

式中: T 为暂态持续时间。

若 $i_r(t)$ 、 $i_s(t)$ 为同极性,则 $P_{rs} > 0$;反之,则 $P_{rs} < 0$ 。

由式(4)可得,灵活接地系统低阻故障小电阻退出后,任意两条健全线路出口暂态零序电流均为同极性。由式(4)和式(5)可得,灵活接地系统低阻故障小电阻退出后,故障线路与健全线路出口处暂态零序电流极性相反。因此,可采用暂态零序电流极性比较法进行选线。

3)对暂态功率方向法^[6]的影响

暂态电流功率方向法的基本原理是:健全线路出口处零序电流与母线零序电压导数极性相同,与故障线路出口处暂态零序电流极性相反,选择方向系数 D 为负数的线路为故障线路。定义某出线 m 出口处暂态零序电流 $i_m(t)$ 和零序电压 $u_0(t)$ 的方向系数为 D_m ,其表达式为:

$$D_m = \frac{1}{T} \int_0^T i_m(t) du_0(t) \quad (29)$$

设第 p 条健全线路暂态功率方向系数为 D_p ,故障线路暂态功率方向系数为 D_n 。由式(2)、式(4)及式(5)可得:

$$\begin{cases} D_p = \frac{C_p}{T} \int_0^T \left(\frac{du_0}{dt} \right)^2 dt > 0 \\ D_n = -\frac{1}{T} \sum_{p=1}^{n-1} C_p \int_0^T \left(\frac{du_0}{dt} \right)^2 dt < 0 \end{cases} \quad (30)$$

式中: C_p 为第 p 条健全线路的单相对地电容。因此,可采用暂态功率方向法进行选线。

4)对暂态零序电流投影法^[22]的影响

暂态零序电流投影法的基本原理是:通过比较

各线路出口处暂态零序电流在暂态零序电压上的投影系数进行选线。若某条线路的投影系数与其他所有线路的投影系数极性相反,且该线路的投影系数大于等于其他线路投影系数幅值之和,则该线路为故障线路。

设健全线路 j 的暂态投影系数为 η_j ,故障线路 n 的暂态投影系数为 η_n ,易得:

$$\begin{cases} \eta_j = \frac{\langle i_{j,T}, u_{c,T} \rangle}{\|u_{c,T}\|^2} = \frac{-C_j u_{c,T}|_{t=0}}{2\|u_{c,T}\|^2} \\ \eta_n = \frac{\langle i_{n,T}, u_{c,T} \rangle}{\|u_{c,T}\|^2} = \frac{(C_\Sigma - C_n) u_{c,T}|_{t=0}}{2\|u_{c,T}\|^2} = -\sum_{j=1}^{n-1} \eta_j \end{cases} \quad (31)$$

可以看出,健全线路出口处暂态电流投影系数与故障线路出口处暂态电流投影系数极性相反,且故障线路出口处暂态电流投影系数等于健全线路出口处暂态电流投影系数之和。因此,暂态零序电流投影法可以适用于灵活接地系统低阻接地故障小电阻退出后的选线。

综上,已有暂态电流幅值比较法、暂态电流极性比较法、暂态功率方向法、暂态零序电流投影法等暂态选线方法,不会因灵活接地系统低阻接地故障小电阻退出时产生的暂态电气量误动。

3.2 高阻接地故障

1)对于部分暂态选线法(暂态电流幅值比较法、暂态电流极性比较法、暂态功率方向法)的影响

由式(12)、式(13)、式(19)、式(20)可得,故障线路出口处零序电流部分分量(对地电容电流)与任一健全线路出口处零序电流之比为两条线路对地电容之比。剩余分量(故障点电流)与母线零序电压呈正相关,而这部分分量无法与健全线路零序电流进行比较。因此,故障线路与健全线路暂态电流在幅值大小与极性的关系上无法定论,即灵活接地系统高阻接地故障小电阻退出时产生的暂态电气量可能使已有暂态幅值选线、暂态极性选线及暂态功率选线法误动。

2)对暂态零序电流投影法的影响

此时, η_j 和 η_n 分别为:

$$\begin{cases} \eta_j = \frac{-9C_j L_p^2 (B_1 p_1 + B_2 p_2)^2}{2\|u_{c,T}\|^2} < 0 \\ \eta_n = \frac{9L_p^2 (C_\Sigma - C_n) (B_1 p_1 + B_2 p_2)^2}{2\|u_{c,T}\|^2} + \frac{3L_p (B_1 + B_2)^2}{2\|u_{c,T}\|^2} > 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\eta_n > -\sum_{j=1}^{n-1} \eta_j \quad (33)$$

可以看出, η_j 不仅与 η_n 极性相反, 而且前者远小于后者。由此可得, 暂态零序电流投影法可以适用于灵活接地系统高阻接地故障小电阻退出后的选线。

4 仿真研究

4.1 仿真模型

利用 MATLAB/Simulink 搭建 10 kV 灵活接地系统仿真模型, 如附录 A 图 A1 所示, 该系统共有 5 条出线 (L_1 至 L_5), 线路参数见表 1; K_1 至 K_3 为不同故障点, 分别位于各区段的中间位置。各线路末端统一接入 2 MW 恒阻抗负载, 消弧线圈过补偿度取 8%, 中性点接地电阻取 10 Ω 。

表 1 10 kV 灵活接地系统仿真模型参数
Table 1 Simulation model parameters of 10 kV flexible grounding system

类型	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)		电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)		电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	
	正序	零序	正序	零序	正序	零序
架空线	0.17	0.32	1.017	3.560	0.115	0.006
电缆线	0.27	2.70	0.255	1.109	0.376	0.276

4.2 理论等效模型与仿真模型暂稳态过程对比

考虑不同过渡电阻, 通过对比理论等效模型与仿真模型下, 系统单相接地故障小电阻退出前后的暂稳态过程, 验证第 2 章所提出的灵活接地系统小电阻投入后的等值电路是双电源叠加的合理性。

附录 A 图 A2 给出了系统发生低阻或高阻接地, 小电阻工频电流过零点退出前后, 理论模型(即双电源叠加模型)与仿真模型的故障点电流对比情况。其中, 理论模型对应系统的故障复合等值电路, 仿真模型对应系统的分布参数模型。由图 A2 可知, 故障复合网络模型与仿真分布参数模型的等效误差使得两故障电流动态过程略有差异, 但主要特征可认为近似相同。

4.3 暂态特征值验证

系统对地电容电流为 72.83 A。通过增加系统健全线路长度, 使系统对地电容电流增加到 110.87 A 后再次仿真。当故障点在 K_1 所在支路时, 利用矩阵束算法^[23]提取部分仿真数据如表 2 所示, 验证不同故障情况下基于简化模型计算得到的暂态主谐振频率、衰减因子。

通过表 2 可得, 当系统发生低阻故障、小电阻退出时的系统暂态分量谐振频率由故障点到母线距

表 2 灵活接地系统小电阻退出后电气量暂态信息
Table 2 Transient information of electrical quantities after small resistor exit in a flexible grounding system

故障点到母线距离/km	过渡电阻/ Ω	电容电流为 72.83 A		电容电流为 110.87 A	
		衰减因子/ s^{-1}	谐振频率/Hz	衰减因子/ s^{-1}	谐振频率/Hz
1	5	1 297.40	456.13	1 298.50	314.19
3	10	973.22	285.01	977.94	204.14
5	15	871.73	213.72	857.87	151.54
6	200	60.20	51.55	64.93	42.50
10	500	44.67	52.19	38.29	42.93
10	1 000	31.43	52.25	29.35	42.98
14	2 000	24.79	52.26	24.87	43.00

离、过渡电阻及系统对地电容电流 3 个因素共同决定: 系统对地电容电流越大, 系统暂态分量谐振频率越低; 对于确定的系统, 故障点到母线距离为定值时, 系统暂态分量谐振频率随过渡电阻增大而降低。衰减因子只与过渡电阻与故障点上游电感有关。高阻故障时系统暂态分量谐振频率在工频附近, 暂态衰减时间随着系统对地零序电容的增大及过渡电阻阻值的增大而增加, 与理论分析相符。

4.4 暂态波形与选线方法验证

令 K_1 发生低阻接地故障、 K_2 发生高阻接地故障, 对小电阻退出时各出线表达式的理论分析进行验证。设 K_1 接地点过渡电阻分别为 3 Ω 和 10 Ω , K_2 接地点过渡电阻分别为 100 Ω 和 500 Ω , 母线暂态零序电压和各出线暂态零序电流波形如附录 A 图 A3 所示。由图 A3 可知, 当系统发生低阻接地故障小电阻退出时, 故障线路暂态零序电流幅值远大于各健全线路, 且两者极性相反, 均与母线暂态零序电压正交; 当系统发生高阻接地故障小电阻退出时, 母线暂态零序电压与健全线路暂态零序电流近似正交, 故障线路暂态零序电流与健全线路暂态零序电流和母线暂态零序电压均有相位差, 且故障线路暂态零序电流与健全线路暂态零序电流幅值关系取决于故障点过渡电阻阻值(故障点过渡电阻为 100 Ω 时, 故障线路暂态零序电流幅值大于健全线路暂态零序电流幅值; 故障点过渡电阻为 500 Ω 时, 两者幅值关系相反)。综上, 不能确定故障线路暂态零序电流与健全线路暂态零序电流幅值与极性的关系, 仿真结果与理论分析相符。

附录 A 表 A1 给出了不同故障位置、不同过渡电阻情况下, 灵活接地系统小电阻退出后的暂态选线法(暂态电流幅值比较法、暂态电流极性比较法、暂态功率方向法、暂态零序电流投影法)的计算结

果。可以看出,灵活接地系统低阻故障小电阻退出后,各种选线方法均可正确选线;灵活接地系统高阻故障小电阻退出后,由于暂态零序电流幅值大小与线路对地电容大小成正比,系统中线路4对地电容最大。因此,非线路4故障时,暂态电流幅值比较法将误选线路4。同时,由于故障线路与健全线路会出现极性相同的情况,暂态电流极性比较法与暂态功率方向法均误报为母线单相接地故障。由此可以看出,上述3种暂态选线法已经不再适用于系统高阻故障小电阻退出后的故障选线。但是,健全线路暂态零序电流在暂态零序电压上的投影系数始终为负,故障线路投影系数始终为正,且幅值大于各健全线路投影系数幅值之和,与理论分析相符。因此,暂态零序电流投影法仍适用于系统高阻接地故障小电阻退出后的选线。

5 结语

本文建立了灵活接地系统并联小电阻退出暂态等值电路,提出了适用于数学分析的简化模型,分析了各出线暂态零序电流、母线暂态零序电压及其导数之间的数学关系,并探讨了小电阻退出时的暂态特征对已有暂态选线方法的影响。

研究发现,灵活接地系统低阻接地故障小电阻退出时,各暂态选线法均能正确选线。高阻接地故障小电阻退出时,对地电容最大的出线暂态零序电流幅值最大,导致暂态电流幅值比较法可能会误选,而暂态电流极性比较法、暂态功率方向法存在将故障误报为母线接地故障的可能,导致选线失败。但是,暂态零序电流投影法可以准确识别故障所在支路,不受接地点过渡电阻大小的影响。

虽然灵活接地系统这种接地方式已在中国部分地区获得应用,但在实际运行中也面临一些问题。例如,考虑到单相接地故障发生概率高,并联小电阻投切开关动作频繁,一旦开关投切失效,并联小电阻不能退出,就必须停运整条母线,影响供电可靠性。同时,灵活接地系统并联小电阻投切方案对于相电流突变法^[24]也面临着逻辑冲突的问题,即灵活接地系统对于馈线上已有的单相接地检测装置的应用存在适应性问题。这些问题需要得到进一步的重视和探讨,以确保系统的稳定性和安全性。

本文算法模型、程序及仿真数据已共享,可在本刊网站支撑数据处下载(<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20230828003>)。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 韩静,徐丽杰.中性点经消弧线圈瞬时并联小电阻接地研究[J].高电压技术,2005,31(1):38-39.
HAN Jing, XU Lijie. Study on instantaneous parallel small resistance grounding of neutral point through arc suppression coil [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 38-39.
- [2] 金鑫.灵活接地系统单相接地故障特征分析及保护[D].东营:中国石油大学(华东),2020.
JIN Xin. Characteristic analysis and protection of single phase grounding fault in flexible grounding system [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [3] 齐郑,杭天琦,李悦悦.消弧线圈并联小电阻接地方式下的行波故障测距[J].电力系统自动化,2020,44(1):175-182.
QI Zheng, HANG Tianqi, LI Yueyue. Traveling wave fault location for arc-suppression coil in parallel with low resistance grounding mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 175-182.
- [4] 中国南方电网有限责任公司.消弧线圈并小电阻接地装置技术规范(征求意见稿)[EB/OL].[2023-02-06].<http://www.bidding.csg.cn/yjzjgg/1200039088.jhtml>.
China Southern Power Grid Company Limited. Technical specification of arc-suppression coil and low resistance in parallel grounding device (draft) [EB/OL]. [2023-02-06]. <http://www.bidding.csg.cn/yjzjgg/1200039088.jhtml>.
- [5] 国家能源局.消弧线圈并联低电阻接地装置技术条件:DL/T 2482—2022[S].北京:中国电力出版社,2022.
National Energy Administration. Requirements for grounding device of arc suppression coil paralleling low resistance: DL/T 2482—2022[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2022.
- [6] 薛永端,张海台,李成刚,等.小电流接地故障暂态选线与定位技术[J].供用电,2015,32(4):32-37.
XUE Yongduan, ZHANG Haitai, LI Chenggang, et al. The technology of faulty feeder selection and faulty section location based on transient signals for single-phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(4): 32-37.
- [7] 王尊贤,武守远,栾晓明.基于虚拟能量变化率的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):137-146.
WANG Zunxian, WU Shouyuan, LUAN Xiaoming. Fault line selection method for high-impedance grounding fault of resonant grounded system based on change rate of virtual energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 137-146.
- [8] 孟毅,严涛,周志强,等.中性点消弧线圈可控投切低电阻接地装置单相接地故障试验研究[J].湖北电力,2017,41(11):20-23.
MENG Yi, YAN Tao, ZHOU Zhiqiang, et al. Experimental

- study on single phase grounding fault of a neutral grounding device consisted of an arc suppression coil and a parallel controllable switching low resistance[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(11): 20-23.
- [9] 薛永端,金鑫,刘晓,等.灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J].电力系统自动化,2022,46(5):112-121.
XUE Yongduan, JIN Xin, LIU Xiao, et al. Analysis on adaptability of grounding protection for distribution network in flexible grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 112-121.
- [10] 尹力,孔令昌,王冠华,等.基于负序电压变化量的灵活接地配电网永久性单相接地故障定位[J].电力自动化设备,2023,43(1):83-89.
YIN Li, KONG Lingchang, WANG Guanhua, et al. Permanent single-phase grounding fault location in flexible grounding distribution network based on negative-sequence voltage variation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 83-89.
- [11] 王晓卫,张帆,王毅钊,等.基于小电阻投入后扰动量标定的灵活接地系统定位新方法[J].电网技术,2024,48(3):1301-1310.
WANG Xiaowei, ZHANG Fan, WANG Yizhao, et al. Novel fault location based on disturbance calibration after small resistance input in flexible grounding system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1301-1310.
- [12] 周宇,汤涛,曾祥君,等.基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):112-120.
ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [13] 闫森,黄纯,刘映彤,等.基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(3):46-52.
YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023, 35(3): 46-52.
- [14] 杨帆,金鑫,沈煜,等.基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J].电力系统自动化,2020,44(17):88-94.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-94.
- [15] 汤涛,周宇,曾祥君,等.基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J].电力系统自动化,2023,47(5):171-179.
TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [16] 薛永端,李娟,徐丙垠.中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [17] 李广.间歇性小电流接地故障暂态分析[D].东营:中国石油大学(华东),2020.
LI Guang. Transient analysis of intermittent small current grounding fault [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [18] 乔东伟,宫德锋,谢松伟,等.小电流接地故障熄弧后电气量对暂态选线方法的影响[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):114-120.
QIAO Dongwei, GONG Defeng, XIE Songwei, et al. Influences of electrical quantities on transient line selection methods after arc extinction under small current grounding fault [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2022, 34(12): 114-120.
- [19] 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.
- [20] 王雪文,石访,张恒旭,等.基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2019,43(3):818-825.
WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 818-825.
- [21] 亓志滨,薛永端,刘健,等.跨线相继接地故障暂态特征与暂态选线方法适用性[J].电力系统自动化,2023,47(19):156-165.
QI Zhibin, XUE Yongduan, LIU Jian, et al. Transient characteristics of cross-line successive grounding faults and applicability of transient line selection methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 156-165.
- [22] 薛永端,李娟,陈筱菁,等.谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(17):5037-5048.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048.
- [23] 康小宁,屈亚军,焦在滨,等.基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J].电力系统自动化,2014,38(21):66-70.
KANG Xiaoning, QU Yajun, JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 66-70.
- [24] 宋国兵,李广,于叶云,等.基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J].电力系统自动化,2011,35(21):84-90.
SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase

earth fault section location based on phase current fault component in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 84-90.

王小帅(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:配电网故障检测与诊断。E-mail:1242553451@qq.com

薛永端(1970—2024),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:配电网接地保护与电气安全防护。E-mail:xueyd70@126.com

刘芊芊(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向:配电网故障检测与诊断。E-mail:15621026398@163.com

(编辑 章黎)

Transient Characteristics of Small Resistor Exit in Flexible Grounding System and Implications for Transient Faulty-line Selection Methods

WANG Xiaoshuai¹, XUE Yongduan¹, LIU Cuicui¹, TIAN Junyang², XU Bingyin³

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Power Dispatching Control Center of Guangxi Power Grid, Nanning 530023, China;

3. Research Center for Smart Grid, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: When a high-resistor grounding fault occurs in a flexible grounding system, the protection during the parallel stage of neutral point small resistor often refuses to activate, so it is still necessary to consider the impact of the transient characteristics of small resistor exit on the existing transient faulty-line selection methods. The exit of the parallel small resistor is accompanied by a certain transient transition process. For this process, a transient equivalent circuit for a single-phase grounding fault in a flexible grounding system is established. The characteristics of transient electrical quantities of the system when the parallel small resistor exits, the impact of different fault conditions on the amplitude of transient electrical quantities, and the constraint relationship between transient zero-sequence current and transient zero-sequence voltage are analyzed. The impact of transient quantities after the parallel small resistor exits on the stability of the transient faulty-line selection methods is clarified. When the small resistor exits during a high-resistor grounding fault in a flexible grounding system, the generated transient electrical quantities will cause misoperation in the transient amplitude comparison method, transient polarity selection method, and transient power direction method, but the transient zero-sequence current projection method for the line selection is correct. The simulation verifies the accuracy of the results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

Key words: flexible grounding system; single-phase grounding fault; transient fault characteristic; faulty-line selection

