

基于零序阻抗突变特征的谐振接地系统高阻接地故障选线方法

邵文权¹, 刘一欢¹, 程 远^{1,2}, 张志华³, 程 畅¹

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048;

3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710110)

摘要:针对配电网谐振接地系统高阻接地故障选线困难的问题,提出了一种利用消弧线圈并联电阻短时投入以增强线路零序阻抗特征的高阻接地故障选线方法。对发生单相接地故障时消弧线圈并联电阻投入前、后同一母线上的健全线路和故障线路的零序阻抗特征进行分析,由分析结果可知:任意健全线路在并联电阻投入前、后其零序阻抗基本保持不变,由线路自身对地电容阻抗构成;故障线路在并联电阻投入后零序阻抗减小,由所有健全线路、消弧线圈支路和并联电阻支路的并联等值阻抗构成。此外,综合考虑故障点电流的限幅要求和零序电压的启动要求分析了并联电阻的取值范围。利用消弧线圈并联电阻投入前、后线路零序阻抗的变化特征构造了故障选线判据,其能够适用于过渡电阻在 $3000\ \Omega$ 以内的高阻接地故障。利用MATLAB建模仿真,验证了所提故障选线方法的有效性。

关键词:配电网;高阻接地故障;故障选线;零序阻抗;并联电阻

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107028

0 引言

目前,随着小电流接地系统故障选线技术的发展和运用,中压配电网低阻接地故障选线问题逐渐得到了较好的解决^[1-2],而断线等高阻接地故障的准确可靠选线依旧存在较大困难^[3]。配电网高阻接地故障主要是由导线断线坠地、导线对树枝放电或者人体直接接触线路引起的故障,由于其过渡电阻达数千欧以上,引起的电压、电流突变量不明显,导致常规保护无法可靠动作或发出告警信号^[4]。接地故障的长期存在可能引发多点故障及相间短路,甚至引起火灾,威胁人身财产安全。因此,研究适用于谐振接地系统高阻接地故障的故障选线方法具有重要的工程应用意义。

现有的配电网故障选线方法可分为外加信号法、故障信号法和综合法。外加信号法^[5]包括S信号注入法、脉冲注入法等。故障信号法分为利用故障稳态信号^[6-8]和故障暂态信号^[9-11]2种。利用故障稳态信号的故障选线方法包括工频零序电流比幅比相法、零序电流有功分量法和谐波法等。但在谐振接地系统中,消弧线圈的补偿作用不仅使得故障残余电流变小,而且改变了故障线路零序电流的方向,导致利用稳态分量进行故障选线的难度增大。利用故

障暂态信号的故障选线方法包括首半波法、暂态零序能量法和暂态电流特征频带法等。与稳态信号相比,暂态信号更加丰富但容易受到谐波、过渡电阻以及故障电弧等多种因素的影响,可靠性有待提升^[12]。综合法融合多种信号和方法,能够取得较好的故障选线效果,但是融合方法的有效域及其组合的有效性尚需要进一步的论证和分析^[13-14]。

谐振接地系统高阻接地故障选线的主要困难在于故障电压、故障电流特征微弱,难以可靠准确检测,且易受到随机因素的干扰^[15-16]。为此,文献[17]提出在配电网中性点经消弧线圈并联电阻的接地方式,通过在中性点投入阻值为 $600\ \Omega$ 的并联电阻来增强单相接地故障电流特征,利用有功电流的增量进行故障选线,但对于高阻接地故障可能存在有功增量微弱导致故障选线可靠性低的不足。文献[18]主要是利用健全线路和故障线路的暂态能量之间的差异来判别故障线路,该方法仅需根据线路出口处测量的暂态能量方向的不同就可以进行故障选线。文献[19]针对传统暂态模型中存在的问题进一步精确分析了谐振接地系统的暂态过程以及暂态电气量特征,对高阻接地故障选线进行了更深刻的剖析,为后续高阻接地故障选线的研究提供了理论基础。

本文针对现有配电网高阻接地故障特征微弱导致故障选线困难的问题,采用消弧线圈短时并联电阻的接地方式改变线路零序阻抗特征进行故障选线。在单相高阻接地故障发生后,通过短时投入并联电阻改变配电网的接地方式,利用健全线路与故

收稿日期:2020-07-08;修回日期:2021-05-28

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2020GY-167);西安市科技计划资助项目(2019-GXYD7.4)

Project supported by the Key Research and Development Projects of Shaanxi Province(2020GY-167) and Xi'an Science and Technology Project(2019-GXYD7.4)

障线路的零序阻抗的变化差异来有效识别故障线路。仿真结果表明本文所提的故障选线方法能够有效识别谐振接地系统的高阻接地故障。

1 并联电阻投入前后的故障特征

以图 1 所示的消弧线圈并联电阻的谐振接地系统为例进行分析。图中,线路 L_n 发生 A 相接地故障, R_f 为过渡电阻; L_p 为消弧线圈等效电感; I_L 和 I_R 分别为流过消弧线圈和并联电阻 R_b 的电流; K_b 为并联电阻的投切开关; E_A 、 E_B 、 E_C 为系统三相电压; C_{0i} ($i=1, 2, \dots, n$) 和 C_{0s} 分别为线路 L_i 和电源侧系统的等效对地电容。

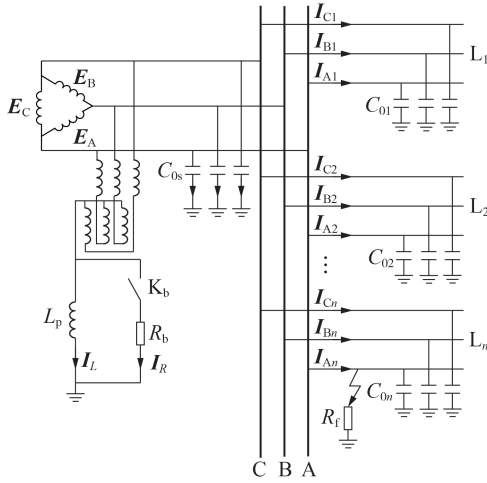


图 1 消弧线圈并联电阻的谐振接地系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of resonant grounding system with arc suppression coil and resistance connected in parallel

图 2 为图 1 中所示单相接地故障的等效零序网络。图中, i_{0i} 为线路 L_i 的首端零序电流; i_{0L_p} 为流过消弧线圈的零序电流; u_f 为故障点等效电压源, 其值为故障发生前的相电压; ω 为系统角频率。考虑到发生单相接地故障时线路自身的电阻和感抗远小于线路对地容抗, 后续线路零序阻抗计算仅考虑线路对地容抗。

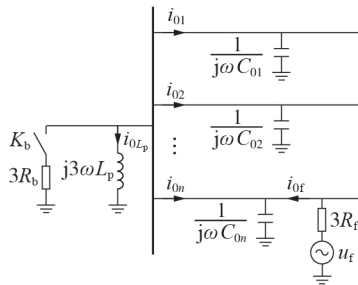


图 2 单相接地故障的等效零序网络

Fig.2 Equivalent zero-sequence network of single-phase grounding fault

1.1 并联电阻投入前的故障特征

由图 2 可看出, 并联电阻投入前 A 相对地电压 U_k 为:

$$U_k = \frac{E_A \times 3R_f}{jX_{\Sigma(0)} + 3R_f} \quad (1)$$

$$X_{\Sigma(0)} = -\frac{1}{\omega C_{\Sigma(0)}} // 3\omega L_p$$

式中: $X_{\Sigma(0)}$ 为消弧线圈零序电感和所有线路零序电容的等效电抗; $C_{\Sigma(0)}$ 为配电网系统所有线路的对地零序电容之和。

由式(1)可以得到系统的零序电压 U_{k0} 为:

$$U_{k0} = -E_A + U_k = -E_A \frac{jX_{\Sigma(0)}}{jX_{\Sigma(0)} + 3R_f} \quad (2)$$

忽略线路自身的零序电阻和零序感抗, 则任意健全线路的零序阻抗为自身对地电容阻抗, 如式(3)所示。

$$Z_{0i} = \frac{1}{j\omega C_{0i}} \quad (3)$$

式中: Z_{0i} 为健全线路 L_i ($i=1, 2, \dots, n-1$) 的零序阻抗。

故障线路的零序阻抗为全系统所有健全线路与消弧线圈支路的并联等值阻抗, 如式(4)所示。

$$Z_{0n} = \frac{1}{j\omega(C_{\Sigma(0)} - C_{0n})} // j3\omega L_p \quad (4)$$

式中: Z_{0n} 为故障线路 L_n 的零序阻抗。

1.2 并联电阻投入后的故障特征

闭合 K_b 投入并联电阻后, A 相对地电压 U'_k 为:

$$U'_k = \frac{E_A \times 3R_f}{(jX_{\Sigma(0)} // 3R_b) + 3R_f} \quad (5)$$

则此时系统的零序电压为:

$$U'_{k0} = -E_A \frac{jX_{\Sigma(0)}}{jX_{\Sigma(0)}(1 + R_f/R_b) + 3R_f} \quad (6)$$

并联电阻投入后, 任意健全线路的零序阻抗为自身对地电容阻抗, 与并联电阻投入前一致, 如式(3)所示; 而故障线路的零序阻抗中增加了并联电阻分量, 其为全系统所有健全线路、消弧线圈支路以及并联电阻支路的并联等值阻抗, 如式(7)所示。

$$Z'_{0n} = \frac{1}{j\omega(C_{\Sigma(0)} - C_{0n})} // (j3\omega L_p) // (3R_b) \quad (7)$$

由式(2)、(6)可以看出 $U_{k0} > U'_{k0}$ (U_{k0} 、 U'_{k0} 分别为 U_{k0} 、 U'_{k0} 的幅值), 并联电阻的投入改变了系统零序回路阻抗, 使得系统零序电压降低继而影响了整个配电网零序电流的分布, 健全线路中的零序电流减小, 而故障线路由于增加了并联电阻的有功分量, 零序电流增大。

综上所述, 谐振接地系统的任意健全线路在并联电阻投入前、后, 其零序阻抗均为线路自身对地电

容阻抗,不受并联电阻投入动作的影响;而故障线路的零序阻抗由全系统健全线路、消弧线圈支路以及并联电阻支路共同决定,受并联电阻投入的影响但不受过渡电阻的影响。因此,通过并联电阻的投入改变故障线路的零序阻抗特征,有望进一步解决高阻接地故障信号微弱导致故障选线困难的问题。

2 并联电阻的优化设计

短时投入并联电阻的方式本质上相当于短时改变配电网的接地方式,增加了有功电流分量。并联电阻应能够改变零序阻抗特征实现高阻接地故障选线,且其短时投入后应使得零序电压启动元件能够可靠启动,同时不产生过大的故障电流,避免增加故障熄弧的难度,所以有必要对并联电阻的取值范围进行优化设计。

在配电网中,当系统零序电压的幅值超过一定门槛(一般为相电压幅值 U_N 的 10%~15%)^[4],零序电压启动元件能够可靠启动并发出接地故障告警信号。本文选择 15% U_N 作为零序电压启动元件的启动门槛值,则有:

$$U'_{k0} = E_A \frac{X_{\Sigma(0)}}{\sqrt{(3R_f)^2 + [X_{\Sigma(0)}(1+R_f/R_b)]^2}} = \frac{1}{\sqrt{(3R_f/X_{\Sigma(0)})^2 + (1+R_f/R_b)^2}} E_A > kE_A = U_{0th} \quad (8)$$

式中: U_{0th} 为系统零序启动电压; E_A 为 A 相系统电压幅值; $k=15\%$ 。

由式(8)可得:

$$R_b > \frac{R_f}{\sqrt{\left(\frac{1}{U_{0th}/E_A}\right)^2 - \left(\frac{3R_f}{X_{\Sigma(0)}}\right)^2} - 1} = \frac{R_f}{\sqrt{\frac{1}{k^2} - \left(\frac{3R_f}{X_{\Sigma(0)}}\right)^2} - 1} \quad (9)$$

根据式(9)可得,在其他条件一样的情况下, R_f 越大,为达到零序电压元件启动条件所需的 R_b 就越大,因此 R_b 只需保证 $R_f=3000\Omega$ 时零序电压元件能够启动,即可满足 $R_f \leq 3000\Omega$ 时的单相接地故障下的零序电压元件启动条件。对于 10 kV 谐振接地系统单相接地故障,为保证零序电压为 15% U_N 时零序电压启动元件能够启动,当 $X_{\Sigma(0)}=1.73\text{ k}\Omega$ 时,根据式(9)可得 $R_b \geq 947\Omega$ 。实际上,通常 10 kV 谐振接地系统的单相接地故障的残流水平在 10 A 以下,极端情况下考虑 10 kV 谐振接地系统的电容电流为 20 A、过补偿 5%,即故障残流为 1 A,对应的 $X_{\Sigma(0)}$ 为 17.3 k Ω 时,并联电阻 $R_b \geq 535\Omega$ 。综上所述,根据式(9),对于不同情况下的配电网系统,并联电阻 R_b 在 600~1000 Ω 范围内取值能够满足本文所考虑的高

阻接地故障下零序电压元件启动的要求。

对于 10 kV 系统,根据国家电网公司发布的《配电网技术导则》,采用消弧线圈接地方式时应满足在补偿后接地故障残流一般控制在 10 A 以内的原则。根据等效零序网络,在配电网投入并联电阻后其故障点电流 I_k 为:

$$I_k = \frac{U'_k}{R_f} = \frac{3E_A}{(jX_{\Sigma(0)} // 3R_b) + 3R_f} \quad (10)$$

可得,故障点电流的幅值 I_k 与 R_f 、 $X_{\Sigma(0)}$ 之间的关系为:

$$I_k = \frac{3E_A}{\sqrt{(3R_f)^2 + (jX_{\Sigma(0)} // 3R_b)^2}} \quad (11)$$

对于 10 kV 谐振接地系统,若其发生单相接地故障时的 $R_f \geq 600\Omega$,即使不考虑系统阻抗部分的影响,由式(11)可得 $I_k \leq 10\text{ A}$ 。显然,对于高阻接地故障,通过投入并联电阻能够满足消弧线圈补偿后单相接地故障残余电流不超过 10 A 的要求。

结合以上分析可知,在配电网谐振接地系统中,对于 R_f 最大为 3000 Ω 的单相接地故障,依据式(9)在 600~1000 Ω 范围内选择并联电阻,能同时满足零序电压启动元件启动和故障残流水平限制的要求。

3 利用并联电阻投入前、后线路零序阻抗变化特征的故障选线判据

对并联电阻投入前、后线路零序阻抗的特征进行分析可知,健全线路的零序阻抗在并联电阻投入前、后保持一致,理论上不会有任何变化;而故障线路的零序阻抗在并联电阻投入后增加了并联电阻分量,所以明显减小。因此,根据并联电阻投入前、后线路零序阻抗的变化差异构成相应的故障选线判据如式(12)所示。

$$K_i = \left| \bar{Z}_{0i} \right| / \left| \bar{Z}'_{0i} \right| \geq K_{th} \quad (12)$$

$$\bar{Z}_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Z_{0i}(k), \quad \bar{Z}'_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Z'_{0i}(k)$$

式中: K_i 为并联电阻投入前、后线路零序阻抗变化系数; $\left| \bar{Z}_{0i} \right|$ 、 $\left| \bar{Z}'_{0i} \right|$ 分别为并联电阻投入前、后的零序阻抗模值; $Z_{0i}(k)$ 、 $Z'_{0i}(k)$ 分别为并联电阻投入前、后母线零序电压和各线路零序电流幅值有效值的比值; $\bar{Z}_{0i}$ 、 $\bar{Z}'_{0i}$ 分别为并联电阻投入前、后零序阻抗在 1 个计算周期 t_1 内的平均值, N 为 t_1 内的采样点数; K_{th} 为零序阻抗变化系数门槛值。

表 1 为不同的 I_k 下,不同的配电网谐振接地系统所需的最小并联电阻 $R_{b(\min)}$ 及故障线路零序阻抗变化系数 K_n 。可以看出,当 $I_k=10\text{ A}$ 时, K_n 最小,为 1.17,与健全线路的零序阻抗变化系数 K_i 差异不大,此时存在故障选线失败的风险。 I_k 越小, K_n 越大,与 K_i 的

差异越显著,故障选线的灵敏度越高。由式(11)可知,对于 10 kV 系统,考虑到 $R_i>1\,000\ \Omega$ 以上的高阻接地故障的故障残流通常在 5 A 以下,此时 $K_n>2$,而健全线路的 $K_i=1$,两者差异明显。因此,对于高阻接地故障,利用并联电阻投入前、后零序阻抗变化的特征能够区分健全线路和故障线路。考虑到电流互感器和电压互感器的测量精度、传变误差、计算误差、裕度等影响因素,本文取 $K_{th}=1.3$ 。

表 1 不同 I_k 下的 $R_{b(min)}$ 和 K_n

Table 1 Value of $R_{b(min)}$ and K_n for different values of I_k			
I_k / A	$X_{\Sigma(0)} / k\Omega$	$R_{b(min)} / \Omega$	K_n
10	1.73	947	1.17
8	1.25×1.73	728	1.41
5	2×1.73	583	2.22
2	5×1.73	537	5.46
1	10×1.73	535	10.83

当谐振接地系统发生单相高阻接地故障时,投入并联电阻并计算各条线路零序阻抗变化系数。若在判别时间 t 内,对于某线路的零序阻抗变化系数,式(12)持续成立,则可判别该线路为故障线路;若全部线路的零序阻抗变化系数均小于门槛值,则判别为母线接地故障。故障选线流程图如图 3 所示。

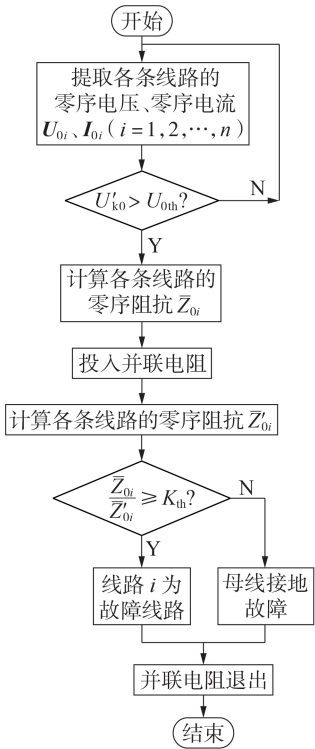


图 3 故障选线流程图

Fig.3 Flowchart of fault line selection

4 仿真验证

为验证本文所提方法的正确性与有效性,在 MATLAB 软件平台搭建 10 kV 配电网仿真模型如图

4 所示,模型参数见表 2。设置 0.1 s 时线路 L_4 在距离母线 2 km 处发生单相高阻接地故障, $R_f=1\,000\ \Omega$,消弧线圈过补偿度 $P=10\%$,根据式(9)设置 $R_b=600\ \Omega$, R_b 在 1 s 时投入、2 s 时退出。

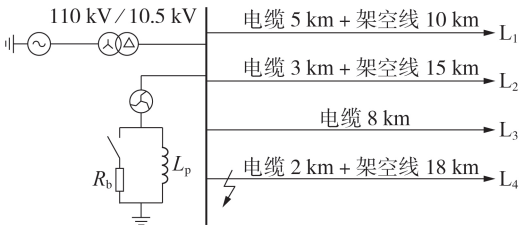


图 4 10 kV 配电网仿真模型

Fig.4 Simulation model of 10 kV distribution network

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters				
线路类型	相序	电阻 / $k\Omega$	电感 / $(mH \cdot km^{-1})$	电容 / $(\mu F \cdot km^{-1})$
架空线	正序	0.125	1.300	0.0096
	零序	0.275	4.600	0.0054
电缆	正序	0.270	0.225	0.3390
	零序	2.700	1.019	0.2800

根据上述模型参数及仿真条件,并联电阻投入前、后所有线路的零序阻抗、零序阻抗变化系数如图 5 所示。

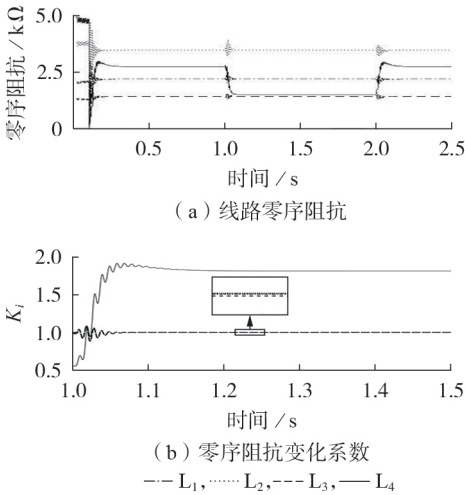


图 5 各线路的零序阻抗和零序阻抗变化系数的计算结果 ($P=10\%$, $R_f=1\,000\ \Omega$)

Fig.5 Calculation results of zero-sequence impedance and corresponding variation coefficient of each line when $P=10\%$ and $R_f=1\,000\ \Omega$

由图 5(a)可见,在并联电阻的投入和退出过程中,配电网经过短时间的过渡过程后进入稳态,在稳态过程中任意健全线路的零序阻抗在并联电阻投入前、后基本不发生变化,其值等于自身对地电容阻抗;而故障线路 L_4 的零序阻抗在并联电阻投入后减小,该过程主要与消弧线圈补偿度 P 有关,仿真结果

与第1节中的理论分析结果一致。

由图5(b)可见,在故障判别时间内,在并联电阻投入前、后,任意健全线路的零序阻抗变化系数均接近1,即零序阻抗变化很小;而故障线路的零序阻抗变化系数大于 K_{th} 。仿真计算结果符合判据式(12),证明了利用消弧线圈并联电阻投入前后线路零序阻抗变化选线方案的正确性。

为进一步验证本文所提方法适用性,当线路 L_4 的2 km处发生单相高阻接地故障时,选取不同消弧线圈补偿度、不同过渡电阻对各条线路的零序阻抗及零序阻抗变化系数进行仿真计算,结果如图6、7所示。

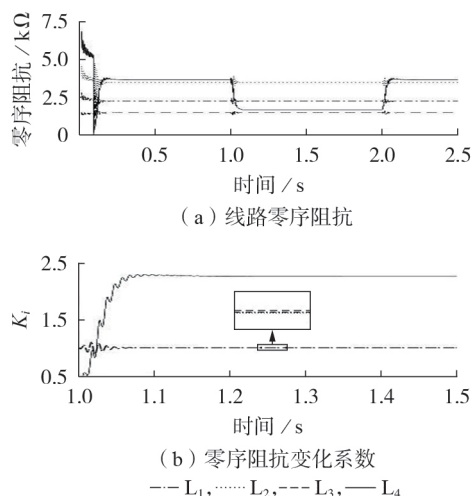


图6 零序阻抗和变化系数计算结果($P=5\%$, $R_f=1000\ \Omega$)

Fig.6 Calculation results of zero-sequence impedance and corresponding variation coefficient of each line when $P=5\%$ and $R_f=1000\ \Omega$

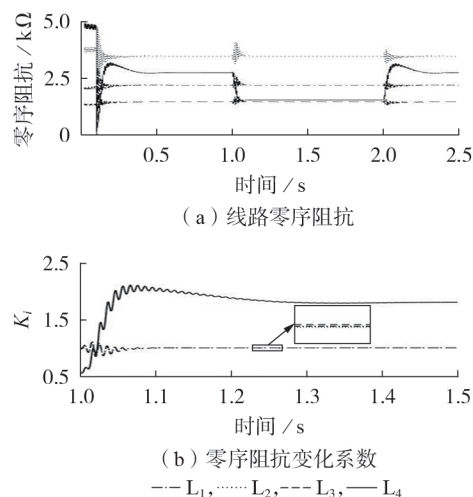


图7 零序阻抗和变化系数计算结果($P=10\%$, $R_f=3000\ \Omega$)

Fig.7 Calculation results of zero-sequence impedance and corresponding variation coefficient of each line when $P=10\%$, $R_f=3000\ \Omega$

上述仿真结果表明,并联电阻投入后,故障线路的零序阻抗主要与消弧线圈补偿度有关,受过渡电

阻的影响较小。结合图5、6可见,其他条件相同时,消弧线圈过补偿度越小,故障线路的零序阻抗变化系数越大。结合图5、7可见,其他条件相同而过渡电阻不同时,故障线路的零序阻抗变化系数基本一致。此外,并联电阻投入前后故障线路的零序阻抗变化系数均明显大于门槛值,健全线路的零序阻抗变化系数基本为1,与理论分析一致,验证了判据的正确性与有效性。

经过大量仿真计算可知,对于不同的配电网谐振接地系统,选取合适的并联电阻后,在不同的故障位置、过渡电阻和消弧线圈补偿度等条件下,并联电阻投入前、后,健全线路的零序阻抗均为自身对地电容阻抗,零序阻抗变化系数接近1;故障线路的零序阻抗与消弧线圈补偿度有关,受故障位置和过渡电阻的影响较小。对于高阻接地故障,故障线路与健全线路的零序阻抗变化系数差异显著,仿真结果与计算结果一致。因此,利用并联电阻投入前、后线路零序阻抗特征差异的高阻接地故障选线方法能够有效识别故障线路,且基本不受过渡电阻大小及故障位置影响,具有较好的适用性。

5 结论

本文针对目前谐振接地系统高阻接地故障特征微弱导致故障选线困难的问题,提出了一种通过消弧线圈并联电阻短时投入增强线路零序阻抗特征差异的故障选线方法。

1)分析了并联电阻投入前、后零序网络的特征,发现健全线路的零序阻抗在并联电阻投入前、后基本不发生变化,均为其自身对地电容阻抗;故障线路的零序阻抗在并联电阻投入后减小,为全系统健全线路以及消弧线圈和并联电阻的等值阻抗,且线路零序阻抗不受过渡电阻影响。

2)给出了谐振接地系统的并联电阻的选择依据,在单相接地故障的过渡电阻不超过 $3000\ \Omega$ 时,在 $600\sim 1000\ \Omega$ 范围内选择合适的并联电阻,能同时满足零序电压启动元件的启动要求和故障残流水平限制的要求。

3)构建了利用线路零序阻抗特征差异的高阻接地故障选线判据及实现方案,大量仿真验证了高阻故障情况下短时投入并联电阻增强线路零序阻抗特征差异的故障选线方法的有效性与适用性。

目前由于条件限制仅对本文所提方法进行了仿真验证,下一步考虑通过物理实验加以佐证。

参考文献:

- [1] 姜健, 鲍光海. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 电气技术, 2015, 16(12): 1-5.
JIANG Jian, BAO Guanghai. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system

- [J]. Electrical Engineering, 2015, 16(12): 1-5.
- [2] 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 networks[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3355-3362.
- [3] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于导纳不对称原理的小电流接地系统选线方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 162-167
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Fault line selection scheme in small current grounding system based on admittance asymmetry principle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 162-167
- [4] 李天友, 徐丙垠, 薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2018, 35(5): 2-6, 24.
LI Tianyou, XU Bingyin, XUE Yongduan. High-impedance fault protection of distribution networks and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 2-6, 24.
- [5] 何瑞江, 胡志坚, 王天一. 计及分布式电源注入谐波的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 670-677.
HE Ruijiang, HU Zhijian, WANG Tianyi. A fault line selection method for resonant grounding system considering injected harmonics of distributed generation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 670-677.
- [6] 朱珂, 王怡轩, 倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 189-196.
ZHU Ke, WANG Yixuan, NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 189-196.
- [7] LI Yilin, YIN Xianggen, CHEN Rui. New method for transient line selection in distribution system based on grounding fault transferred[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(5): 2822-2826.
- [8] 汤涛, 黄纯, 江亚群, 等. 基于馈线零序阻抗特性的谐振接地故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 192-201.
TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A method of fault line selection in resonant earthed system based on zero sequence impedance characteristic of lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 192-201.
- [9] 高杰, 程启明, 程尹曼, 等. 基于量子遗传双稳态系统的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 164-170, 203.
GAO Jie, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. Faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 164-170, 203.
- [10] 郭谋发, 高源, 杨耿杰. 谐振接地系统暂态波形差异性识别法接地选线[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 59-66.
GUO Moufa, GAO Yuan, YANG Gengjie. Faulty line detection based on transient waveform difference recognition for resonant earthed system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 59-66.
- [11] 郭谋发, 严敏, 陈彬, 等. 基于波形时域特征聚类法的谐振接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 59-66, 81.
GUO Moufa, YAN Min, CHEN Bin, et al. Faulty line selection based on waveform feature clustering in time domain for resonance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 59-66, 81.
- [12] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [13] 郭谋发, 林妙玉, 杨耿杰. 谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 60-66.
GUO Moufa, LIN Miaoyu, YANG Gengjie. The transient and steady-state information fusion method for single phase grounding line detection in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 60-66.
- [14] 杨磊, 曾祥君, 喻锐, 等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 57-62.
YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 57-62.
- [15] 杨帆, 刘鑫星, 沈煜, 等. 基于零序电流投影系数的小电阻接地系统高阻接地故障保护[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1128-1133.
YANG Fan, LIU Xinxing, SHEN Yu, et al. High resistance ground fault protection of low resistance grounding system based on zero sequence current projection coefficient[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1128-1133.
- [16] 邵文权, 南树功, 张望妮, 等. 利用过渡电阻特征的超/特高压输电线路电弧性故障及熄弧时刻识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1822-1827.
SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Wangni, et al. Arcing fault detection and arc extinction time capture based on characteristics of transition resistances for EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1822-1827.
- [17] 陈维江, 蔡国雄, 蔡雅萍, 等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.
CHEN Weijiang, CAI Guoxiong, CAI Yaping, et al. neutral grounding mode in 10 kV distribution network via Peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60.
- [18] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
- [19] 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, 5223.
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, 5223.

作者简介:



邵文权

邵文权(1978—),男,湖北竹山人,教授,博士,主要从事电力系统继电保护、配电网故障处理的研究工作(E-mail: shaowenquan@xpu.edu.cn);

刘一欢(1995—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事配电网故障处理的研究工作(E-mail: yihuanx@163.com)。

(编辑 任思思)

Fault line selection method of grounding fault with high resistance in resonant grounding system based on intensive zero-sequence impedance characteristics

SHAO Wenquan¹, LIU Yihuan¹, CHENG Yuan^{1,2}, ZHANG Zhihua³, CHENG Chang¹

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710110, China)

Abstract: In order to solve the difficulties of faulty line selection of grounding fault with high resistance in resonant grounding system of distribution network, it is proposed to enhance the zero-sequence impedance characteristics of the line by using the short-time switching of resistance connected in parallel with arc suppression coil. In the case of single-phase grounding fault, the zero-sequence impedance characteristics of the healthy and faulty lines on the same bus before and after switching the parallel resistance are analyzed. The analysis shows that the zero-sequence impedance of any healthy line remains unchanged before and after switching the parallel resistance, which is composed of its own capacitance impedance to ground, while the zero-sequence impedance of the faulty line decreases significantly after the parallel resistance is put into operation, which is composed of the parallel equivalent resistance of all the healthy lines, arc suppression coil branch and the parallel resistance branch. In addition, the range of parallel resistance is analyzed by considering the limiting requirements of fault current and the start-up requirements of zero-sequence voltage. Therefore, according to the change characteristics of zero-sequence impedance of the faulty line before and after switching the parallel resistance, an improved faulty line selection method is proposed, which can theoretically adapt to the grounding fault with high resistance that lower than $3000\ \Omega$. The effectiveness of the proposed method is verified by MATLAB simulation.

Key words: distribution network; grounding fault with high resistance; fault line selection; zero-sequence impedance; parallel resistance

(上接第112页 continued from page 112)

Power quality disturbance classification method based on side-output fusion convolutional neural network

WANG Jidong, ZHANG Di

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of the traditional power quality disturbance classification methods, such as low classification accuracy and difficulty in manually selecting features, a SFCNN (Side-output Fusion Convolutional Neural Network) based on deep learning is proposed for power quality disturbance classification. Firstly, the power quality disturbance signal is preprocessed to standardize the input signal data, which is beneficial to improve the convergence speed and accuracy of the proposed method. Then, the side-output fusion structure is introduced into the traditional convolutional neural network, and feature fusion is carried out by combining the information of the low, middle and high layers of convolution to better classify and recognize the input signal. Aiming at the problems of insufficient measured data and unbalanced distribution of signal data types, the data enhancement method is used to process the signal. Simulation and actual data verification show that the proposed method can automatically perform feature extraction and optimization, and has the advantages of fast classification speed and high classification accuracy.

Key words: power quality; disturbance classification; side-output fusion convolutional neural network; deep learning; feature extraction