

小电阻接地系统馈线自适应零序电流 保护原理及装置实现

喻 磊¹, 郭晓斌¹, 韩博文², 雷金勇¹, 田 兵¹, 白 浩¹, 李海锋², 王 钢²

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 小电阻接地系统发生多回线同相复杂接地故障时, 零序电流幅值相比于单回线接地故障将显著下降, 容易导致馈线首端的零序电流保护拒动, 进而造成母线接地变压器的零序电流保护越级误动, 扩大停电范围。为此, 对小电阻接地系统多回线复杂接地故障的故障机理进行分析, 推导了多回线与单回线接地故障下馈线零序电流关系; 在此基础上, 提出了一种自适应馈线零序电流保护方案, 即根据母线电压将多回线接地故障的零序电流实时补偿为单回线接地故障的零序电流值, 从而确保了常规的保护动作值整定方式和保护配合能够适用于多回线复杂接地故障, 并研发了相应的自适应零序保护装置。基于 PSCAD/EMTDC 和 RTDS 对保护原理及保护装置的测试结果表明, 自适应零序电流保护在多回线复杂接地故障情况下仍具有较高的灵敏性, 补偿精度不受过渡电阻、故障位置的影响。所提保护方案只需在原有零序电流保护方案基础上, 增加母线电压信息, 容易实现, 具有经济性和较高的工程应用价值。

关键词: 小电阻接地系统; 零序电流; 复杂接地故障; 故障分析; 自适应保护; 继电保护; RTDS 测试

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.020

0 引言

目前, 在大中型城市配电网中, 电缆线路所占比例越来越高, 导致发生单相接地故障时的电容电流极大增加, 容易产生弧光过电压, 对设备绝缘性和供电可靠性均造成不利影响。为此, 中性点经小电阻接地方式在我国城市配电网中得到了广泛的应用^[1-4]。单相接地故障作为一种最常见的电网故障类型^[5-6], 在小电阻接地系统中主要依赖零序电流保护实现其检测和可靠动作隔离^[7]。由于小电阻接地系统发生线路单相接地故障时, 一般情况下接地(零序)电流较大, 零序电流保护对于普通的单回线接地故障具有较高的选择性和灵敏性。

然而, 随着城市配电网的不断发展, 为了节约输电走廊, 输电线路的同杆多回线技术得到了越来越多的应用。在这种情况下, 配电网的故障种类变得非常复杂, 由此所带来的对零序电流保护的影响不容忽视。其中, 因雷击等因素所导致的多回线故障发生的概率也越来越高。而从对零序电流保护影响的角度考虑, 多回线同相接地故障最为值得关注。这主要是因为发生多回线同相接地故障时, 零序网络为零序电流提供了并联通道, 导致流经各故障线路的零序电流相比于发生单回线接地故障时显著下降^[8], 从而可能造成某些故障馈线的零序电流保护拒动, 严重时会造成母线接地变压器的零序电流保护越级误动, 使该母线上的所有负荷失电^[9-10]。

目前针对小电阻接地系统零序电流保护的研究主要还是集中在单回线接地故障方面: 文献[7]针对单回线单相高阻接地故障提出了自适应调整电流整定值的方案; 文献[11]针对混合接地方式提出了保护改进方案; 文献[12]则对单相接地故障时接地变压器的零序电流保护方案进行了改进。而对多回线接地故障的情况, 已有文献主要是根据现场运行和继电保护整定经验, 提出降低馈线零序电流保护动作值的方法, 以提高保护的灵敏性, 同时为保证选择性, 母线接地变压器的零序保护需要以延长保护的動作时间为代价^[10, 13-14]。这种解决方案尽管能够对常规零序电流保护在某些故障条件下起到改善的作用, 但由于缺乏对多回线故障机理的理论分析, 其通用性和适用性不强。因此, 针对多回线复杂接地故障的特点, 研究适用的继电保护解决方案具有重要的理论和工程价值。

为此, 本文基于故障分析理论, 对小电阻接地系统多回线同相复杂接地故障进行故障机理分析, 并推导了多回线接地故障的馈线零序电流与单回线接地故障零序电流之间的定量关系; 在此基础上, 提出了一种改进的自适应零序电流保护, 通过引入母线的电压信息, 将多回线接地故障的零序电流补偿为单回线故障的零序电流值, 从而确保了常规的保护动作值整定方式和保护配合能够适用于多回线复杂接地故障。

1 多回线复杂接地故障分析

1.1 多回线同相接地故障下的零序电流计算

当小电阻接地系统发生多回线异相接地故障

收稿日期: 2016-08-18; 修回日期: 2017-07-13

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)

时,故障相之间相当于对地短路,零序电流相比于发生单回线接地故障时显著升高,对零序电流保护基本没有影响^[8]。因此,本节主要针对多回线同相接地故障进行故障分析。

图 1 为一个典型的城市 10 kV 小电阻接地配电网示意图。在城市配电网中,110 kV 变电站的主变 10 kV 低压侧一般采用三角形接线方式。因此,10 kV 母线需要配置 Z 型接地变压器,以提供变压器中性点经小电阻 R_0 接地的途径^[15]。

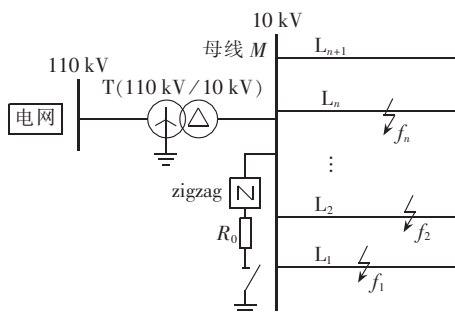
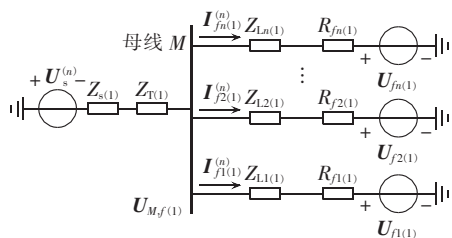


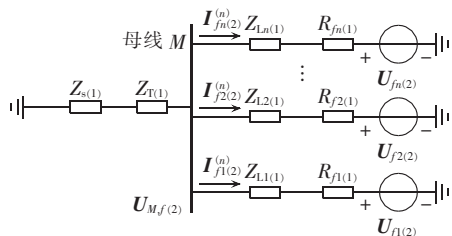
图 1 10 kV 小电阻接地系统

Fig.1 10 kV low resistance grounding system

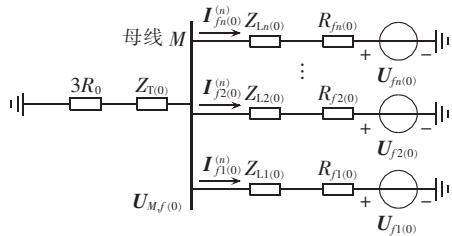
假设图 1 中配电网发生 n 回馈线同相单相接地故障(A 相发生故障,全网以 A 相为基准相),可以得到其故障各序等值网络,如图 2 所示。



(a) 正序网络



(b) 负序网络



(c) 零序网络

图 2 多回线接地故障序网络

Fig.2 Sequence networks of SPGF occurring in multi-circuit lines

根据对称分量法,可知各故障馈线故障点处的电

流、电压关系为^[16]:

$$\begin{cases} I_{fi(1)} = I_{fi(2)} = I_{fi(0)} \\ U_{fi(1)} = I_{fi(1)} R_{fi(1)} \\ U_{fi(2)} = I_{fi(2)} R_{fi(1)} \\ U_{fi(0)} = I_{fi(0)} R_{fi(0)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i=1,2,\dots,n$; R_{fi} 为第 i 回馈线故障点的过渡电阻;下标(1)、(2)和(0)分别表示正序、负序和零序电气量。

从母线看进系统侧,可得母线电流、电压关系为:

$$\begin{cases} U_{Mf(1)} = U_s - (Z_{s(1)} + Z_{T(1)}) \sum_{i=1}^n I_{fi(1)}^{(n)} \\ U_{Mf(2)} = - (Z_{s(1)} + Z_{T(1)}) \sum_{i=1}^n I_{fi(2)}^{(n)} \\ U_{Mf(0)} = - (3R_0 + Z_{T(0)}) \sum_{i=1}^n I_{fi(0)}^{(n)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $I_{fi(1)}^{(n)}$ 、 $I_{fi(2)}^{(n)}$ 和 $I_{fi(0)}^{(n)}$ 分别为 n 回线同相单相接地故障时,第 i 回馈线的正序、负序和零序故障电流; $U_{Mf(1)}$ 、 $U_{Mf(2)}$ 和 $U_{Mf(0)}$ 分别为母线上正序、负序和零序故障相电压; U_s 和 R_0 分别为系统电压和中性点接地电阻; $Z_{s(1)}$ 为系统正序阻抗; $Z_{T(1)}$ 、 $Z_{T(0)}$ 分别为主变压器的正序、零序阻抗。

从母线看进线路侧,可得母线电压与馈线电流的关系为:

$$\begin{cases} U_{Mf(1)} = U_{fi(1)} + Z_{Li(1)} I_{fi(1)}^{(n)} \\ U_{Mf(2)} = U_{fi(2)} + Z_{Li(1)} I_{fi(2)}^{(n)} \\ U_{Mf(0)} = U_{fi(0)} + Z_{Li(0)} I_{fi(0)}^{(n)} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,n$ 。

根据对称分量法,可知故障相的母线电压和故障点电压表达式为:

$$\begin{cases} U_{Mf} = U_{Mf(1)} + U_{Mf(2)} + U_{Mf(0)} \\ U_{fi} = U_{fi(1)} + U_{fi(2)} + U_{fi(0)} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)~(4),可得:

$$U_{Mf} = U_s - Z_{\Sigma} \sum_{i=1}^n I_{fi(0)}^{(n)} = Z_{\Sigma, Li} I_{fi(0)}^{(n)} \quad (5)$$

其中, $Z_{\Sigma} = 2(Z_{s(1)} + Z_{T(1)}) + Z_{T(0)} + 3R_0$ 为系统侧的总阻抗,在系统运行方式确定的情况下为已知常数; $Z_{\Sigma, Li} = 2Z_{Li(1)} + Z_{Li(0)} + 3R_{fi}$ 为第 i 回馈线的总阻抗。

根据故障等值序网络可得到多回线故障情况下第 i 回馈线的零序电流:

$$I_{fi(0)}^{(n)} = \frac{\prod_{j \neq i} Z_{\Sigma, Lj}}{Z_{\Sigma} \prod_{j \neq i} Z_{\Sigma, Lj} + \dots + Z_{\Sigma} \prod_{j=1}^{n-1} Z_{\Sigma, Lj} + \prod_{j=1}^n Z_{\Sigma, Lj}} U_s \quad (6)$$

其中, $\prod_{j \neq i} Z_{\Sigma, Lj} = \prod_{j=1}^n Z_{\Sigma, Lj} / Z_{\Sigma, Li}$ 表示除第 i 回线路之外的其他所有故障线路总阻抗值的乘积。

以上是基于多回线 A 相接地故障下的馈线零序电流推导过程和结果。

1.2 多回线与单回线接地故障下馈线零序电流关系

由式(6)可知,在多回线同相接地故障下,故障

馈线的零序电流将变得与原来该回线单独故障时的零序电流不同,从而必然会对现有的基于单回线故障特征的零序电流保护产生影响。为了进一步量化该影响,下文进一步分析发生多回线同相接地故障时的馈线零序电流与发生单回线接地故障时的零序电流之间的定量关系。

由式(6)可知,当系统发生单回线故障时,该故障线路的零序电流为:

$$I_{fi(0)}^{(1)} = \frac{1}{Z_{s\Sigma} + Z_{\Sigma Li}} U_s \quad (7)$$

联立式(5)—(7)可得:

$$\frac{I_{fi(0)}^{(1)}}{I_{fi(0)}^{(n)}} = \frac{Z_{s\Sigma} \prod_{j \neq 1}^n Z_{\Sigma Lj} + \dots + Z_{s\Sigma} \prod_{j=1}^{n-1} Z_{\Sigma Lj} + \prod_{j=1}^n Z_{\Sigma Lj}}{(Z_{s\Sigma} + Z_{\Sigma Li}) \prod_{j \neq i}^n Z_{\Sigma Li}} = \frac{\left(Z_{s\Sigma} \prod_{j \neq 1}^n Z_{\Sigma Lj} + \dots + Z_{s\Sigma} \prod_{j=1}^{n-1} Z_{\Sigma Lj} + \prod_{j=1}^n Z_{\Sigma Lj} \right) \prod_{j=1}^n I_{fj(0)}^{(n)}}{\left[(Z_{s\Sigma} + Z_{\Sigma Li}) \prod_{j \neq i}^n Z_{\Sigma Lj} \right] \prod_{j=1}^n I_{fj(0)}^{(n)}} = \frac{U_s}{U_{Mf} + I_{fi(0)}^{(n)} Z_{s\Sigma}}$$

由上式可得 $I_{fi(0)}^{(1)}$ 与 $I_{fi(0)}^{(n)}$ 的关系为:

$$I_{fi(0)}^{(1)} = \frac{U_s}{U_{Mf} + I_{fi(0)}^{(n)} Z_{s\Sigma}} I_{fi(0)}^{(n)} \quad (8)$$

2 新型自适应零序电流保护方案

对于常规的馈线零序电流保护,其动作值的整定与配合均是基于单回线接地故障的情况,即该保护对于单回线故障具有良好的灵敏性和选择性。因此,对于多回线接地故障,如果能够将某一回故障线路的零序电流,补偿修正为单回线接地故障下的零序电流,则能够使零序电流保护在沿用原有整定原则的基础上,同样适用于多回线接地故障。

基于以上思路,本文根据前文对多回线复杂接地故障机理的分析结果,提出了一种适用于小电阻接地系统的新型馈线自适应零序电流保护。

由式(8)可知,对于某条馈线的 $I_{fi(0)}^{(1)}$ 和 $I_{fi(0)}^{(n)}$,两者之间关系与稳态情况下的系统电压 U_s 、母线上的故障相电压 U_{Mf} 、系统侧的总阻抗 $Z_{s\Sigma}$ 以及该回故障线路的零序电流 $I_{fi(0)}^{(n)}$ 有关。由于稳态情况下,系统电压与母线电压近似,则式(8)可表示为:

$$I_{fi(0)}^{(1)} = \frac{U_{M\varphi}}{U_{M\varphi} + I_{fi(0)}^{(n)} Z_{s\Sigma}} I_{fi(0)}^{(n)} = K_c I_{fi(0)}^{(n)} \quad (9)$$

其中,下标 φ 为故障相; $U_{M\varphi}$ 为故障前的母线电压,在实际保护装置计算中取故障时刻的前一个周期所对应的相量进行计算; $U_{M\varphi f}$ 为故障时的母线电压; K_c 为零序电流补偿系数, $K_c = \frac{U_{M\varphi}}{U_{M\varphi} + I_{fi(0)}^{(n)} Z_{s\Sigma}}$ 。

由式(9)可知,若系统发生多回线接地故障,该保护原理只需根据母线的实时电压值,即可自适应

地将每回故障线路的零序电流实时修正为该回线单独故障时的零序电流值,且与各回故障线路的故障位置、过渡电阻无关;当系统发生单回线接地故障时,很显然 $K_c = 1$,即改进的保护仍然适用于单回线接地故障。

本文提出的馈线自适应零序电流保护原理流程图如图 3 所示。

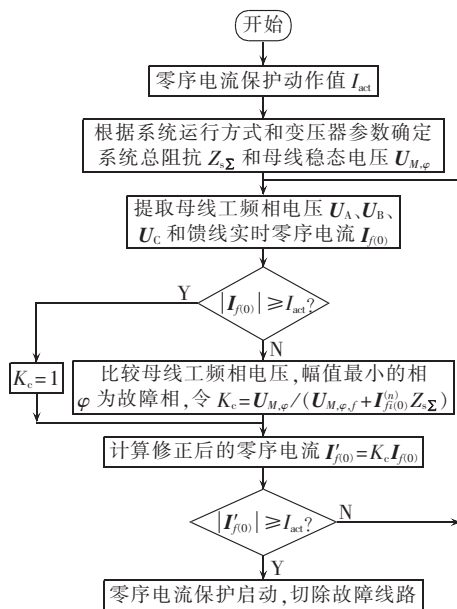


图 3 自适应零序电流保护方案

Fig.3 Scheme of adaptive zero-sequence current protection

3 仿真实验

为了验证本文提出的馈线自适应零序保护方案,利用 PSCAD/EMTDC 建立一个典型的实际 10 kV 配电网模型进行仿真分析,其网络结构如图 1 所示。在仿真模型中,110 kV 系统侧的最大和最小短路容量分别为 3 898.71 MV·A 和 1 922.74 MV·A;10 kV 母线的接地小电阻 $R_0 = 12 \Omega$;10 kV 母线含 4 回出线,架空线路长度分别为 4.1 km、4.7 km、2.7 km 和 3.2 km;线路均采用 LGJ-120 型号,其正序参数 $r_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.335 \Omega/\text{km}$,零序电抗 $x_0 = 3.0 x_1$,对地电容 $C = 12.14 \text{ nF}/\text{km}$;主变压器和接地变压器的具体参数分别如表 1、2 所示。故障点 f_1 、 f_2 和 f_3 分别位于线路 1、线路 2 和线路 3。根据现场运行的保护定值整定规程,本算例的馈线零序电流保护 I 段的电流动作值整定为 60 A,保护 II 段动作值整定为 25 A。

表 1 110 kV 主变压器参数

Table 1 Parameters of 110 kV main transformer

参数	参数值	参数	参数值
额定容量	50 MV·A	短路阻抗 $u_s(\%)$	10.5
额定变比	110 kV/10.5 kV	空载损耗 ΔP_0	35.2 kW
高压侧接线方式	YN	负载损耗 ΔP_f	184.3 kW
低压侧接线方式	D	空载电流 $I_0(\%)$	0.52

表 2 Z 型接地变压器参数

Table 2 Parameters of Z-type grounding transformer

参数	参数值	参数	参数值
额定容量	400 kV·A	接线方式	ZN
额定电压	11 kV	零序阻抗	10.0 Ω/相

3.1 零序电流补偿效果分析

为验证本文所提出的零序电流补偿算法的准确性,设置了 3 组仿真方案,如表 3 所示。仿真结果,即零序电流原始值与补偿值的比较结果,分别如图 4—7 所示。

由算例 1 的仿真结果可知,0.1 s 发生单回线路 A 相接地故障时,零序电流补偿值和实际值相同。0.25 s

表 3 仿真方案

Table 3 Simulation scheme

算例	故障时刻/s	故障点	故障距离/km	过渡电阻/Ω
1	0.10	f_1	1.95	50
	0.25	f_2	1.95	30
	0.40	f_3	1.35	30
2	0.10	f_2	0.3	40
	0.25	f_1	4.7	10
	0.40	f_3	1.35	0
3	0.10	f_1	4.1	间歇性弧光
	0.25	f_2	0.3	35
	0.40	f_3	2.7	60

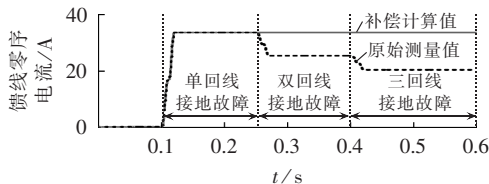


图 4 故障线路 1 的零序电流比较(算例 1)

Fig.4 Comparison between zero-sequence currents of faulty Line 1, in Case 1

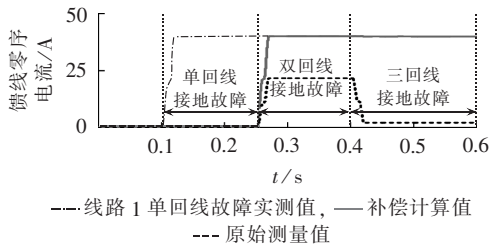


图 5 故障线路 1 的零序电流比较(算例 2)

Fig.5 Comparison between zero-sequence currents of faulty Line 1, in Case 2

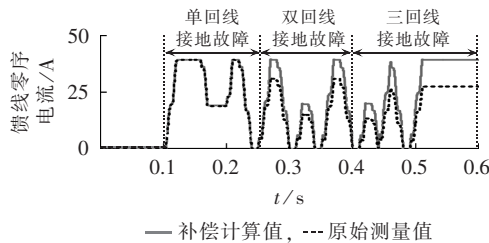


图 6 故障线路 1 的零序电流比较(算例 3)

Fig.6 Comparison between zero-sequence currents of faulty Line 1, in Case 3

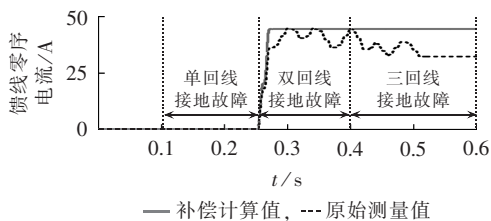


图 7 故障线路 2 的零序电流比较(算例 3)

Fig.7 Comparison between zero-sequence currents of faulty Line 2, in Case 3

和 0.4 s 其他两回线路相继发生同相接地故障时,馈线的实测零序电流明显下降,而补偿算法则可根据母线的实时电压将零序电流补偿为单回线故障下的零序电流值,且具有较高的精度。由图 5 可知,在 0.25 s 前线路 L_1 正常运行,电流补偿值近似为 0,说明自适应零序电流保护引入后不会给非故障线路带来不利的影响;而 0.25 s 后发生多回线接地故障,线路 L_1 的补偿值与单回线接地故障的零序电流实测值相同。

算例 3 中,线路 L_1 在 0.1 s 时发生间歇性弧光接地故障,持续到 0.487 s 时刻发展为永久性故障。图 6 和图 7 的结果表明,间歇性弧光接地由于其过渡电阻呈现很强的非线性,而且不断随机变化,因此,弧光接地的故障线路和其他故障线路的实测零序电流都会随之不断变化。而在这种情况下,本文所提的补偿算法仍适用。其中,由图 6 可知,对于发生弧光接地的故障线路,由于弧光接地所对应的过渡电阻实际上是不不断变化的,所对应的单回线故障零序电流也随之不断变化,所以补偿电流也是不断变化的,这与图 4、5 所示的永久性故障的情况相比有所不同;而对于其他的故障线路,其补偿效果则不受弧光接地故障的影响,如图 7 所示。

仿真结果表明,发生多回线接地故障时,自适应保护算法能将各回故障线路的零序电流准确地补偿为该回线路单独故障下的零序电流值,而且补偿精度不受本线路和其他故障线路的故障位置、过渡电阻的影响,补偿精度较高。

3.2 自适应保护方案动作情况分析

为验证本文所提出的自适应零序电流保护方案的有效性,本节通过仿真分析自适应零序电流保护和常规零序电流保护在不同故障位置 and 不同过渡电阻情况下的保护动作情况。

以线路 1 和线路 2 出口处的零序电流保护为研究对象,所提出的零序电流保护动作情况及其与常规零序电流保护的比较如表 4 和表 5 所示。其中,表 4 为不同故障位置下的零序电流保护动作情况, f_1 和 f_2 处的过渡电阻分别为 20 Ω 和 0;表 5 则是考虑不同过渡电阻下的零序电流保护动作情况, f_1 和 f_2 处

表 4 不同故障位置下常规零序电流保护和自适应零序电流保护的動作情况比較
Table 4 Comparison of operation between conventional and adaptive zero-sequence current protections for different fault locations

故障距离/km		自适应零序电流保护				常规零序电流保护			
		零序电流补偿值/A		動作情况		零序电流实际值/A		動作情况	
f_1	f_2	线路 L_1	线路 L_2	保护 1	保护 2	线路 L_1	线路 L_2	保护 1	保护 2
0.3	0.3	64.34	164.66	動作	動作	1.05	163.91	不动作	動作
	1.95	64.51	157.22	動作	動作	6.40	153.07	不动作	動作
	4.7	64.52	145.96	動作	動作	13.84	137.20	不动作	動作
1.95	0.3	63.14	164.66	動作	動作	1.02	163.93	不动作	動作
	1.95	63.46	157.22	動作	動作	6.25	153.07	不动作	動作
	4.7	63.50	145.97	動作	動作	13.52	137.21	不动作	動作
4.1	0.3	61.64	164.66	動作	動作	0.98	163.95	不动作	動作
	1.95	62.12	157.22	動作	動作	6.06	153.08	不动作	動作
	4.7	62.18	145.96	動作	動作	13.12	137.24	不动作	動作

表 5 不同过渡电阻下常规保护和自适应零序电流保护的動作情况比較
Table 5 Comparison of operation between conventional and adaptive zero-sequence current protection for different transition resistances

过渡电阻/ Ω		自适应零序电流保护				常规零序电流保护			
		零序电流补偿值/A		動作情况		零序电流实际值/A		動作情况	
f_1	f_2	线路 L_1	线路 L_2	保护 1	保护 2	线路 L_1	线路 L_2	保护 1	保护 2
0	0	164.66	156.98	動作	動作	142.95	21.80	動作	不动作
	20	164.66	63.14	動作	動作	163.93	1.02	動作	不动作
	50	164.66	32.78	動作	動作	164.32	0.41	動作	不动作
20	0	64.51	157.22	動作	動作	6.40	153.07	不动作	動作
	20	64.54	63.52	動作	動作	46.87	45.81	動作	動作
	50	64.54	33.25	動作	動作	55.99	22.24	動作	不动作
50	0	33.47	157.22	動作	動作	2.60	155.50	不动作	動作
	20	33.52	63.52	動作	動作	22.57	55.01	不动作	動作
	50	33.52	33.26	動作	動作	28.03	27.77	動作	動作

的故障距离分别为 0.3 km 和 1.95 km。

由表 4 和表 5 的结果可见,发生多回线接地故障时,线路上的常规零序电流保护易发生拒动,尤其当过渡电阻之间差异较大时,容易引起某一回线零序电流显著降低而导致的拒动;而对于自适应零序电流保护,则能够将其所在线路的零序电流补偿为该回线单独发生接地故障情况下的零序电流值,进而确保基于单回线接地故障所整定的保护动作值能够继续应用于多回线复杂接地故障的情况,提高传统零序电流保护的适用性。同时,零序电流补偿值的大小只与本故障线路的故障位置和过渡电阻有关,不受其他故障线路的影响。

4 自适应零序保护的装置实现及 RTDS 测试

4.1 自适应零序保护的实现

馈线保护测控一体化装置平台 DPMC-21,采用 32 位浮点 DSP(300 M)芯片和 16 位高精度 AD 采样,运算与逻辑功能强大。单元化设计、模块化结构,可扩充性强。保护测控装置的处理 器 OMAP-L138 由 DSP 内核和 ARM 内核 2 个内核组成。装置软件的总体架构包括保护程序、操作系统和监控程序,其中保护程序运行于 DSP 内核,操作系统和监控程序运行于 ARM 内核,2 个内核通过片上共享内存(ShareRAM)

进行数据交换。除此之外,还有运行于单片机上的 IRIG-B 数据解析程序以及运行于复杂可编程逻辑器件(CPLD)的数据输入/输出(DI/DO)扩展程序。

利用 DPMC-21 平台可在常规零序电流保护的基础上嵌入本文所提出的新型馈线自适应零序电流保护功能,其零序方向元件、自适应元件均可单独投退。

自适应零序三段式过流保护主要针对小电阻接地系统,动作于跳闸。投入自适应零序电流保护时只需设置零序电流门槛定值 I_{0SET_MIN} 和阻抗定值 $Z_{s\Sigma_SET}$,所有保护元件共用动作门槛定值和阻抗定值。投入自适应元件后,若零序电流 I_0 大于门槛定值则利用阻抗定值修正零序电流,修正后的零序电流若大于动作定值则保护动作于跳闸。本装置的自适应零序电流 I 段的保护逻辑如图 8 所示。图中, I_{0fl} 为修正

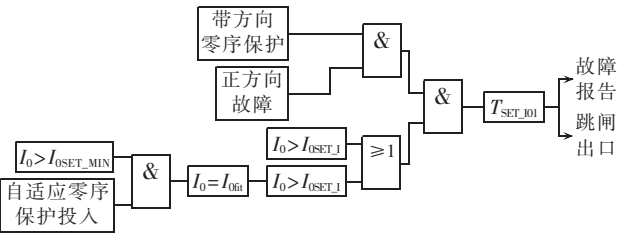


图 8 自适应零序电流保护动作逻辑框图
Fig.8 Schematic diagram of operation logic of adaptive zero-sequence current protection

后的零序电流补偿值; I_{0SET_I} 和 $T_{SET_{I0I}}$ 分别为馈线零序电流保护的整定值和时限定值。

4.2 RTDS 平台测试

在实时数字仿真平台 RTDS(Real Time Digital Simulator)上建立了第 3 节所述的中性点经小电阻接地实际 10 kV 城市配电网模型,对自适应零序电流保护装置进行测试,其中保护装置安装在线路 L_1 的

首端。基于 RTDS 平台,测试了该套保护装置在不同故障位置和过渡电阻条件下发生多回线接地故障时的零序电流补偿效果以及保护动作情况。

保护测试结果如表 6 所示,保护装置显示输出的部分故障报告如图 9 所示。本装置零序过流 I 段保护定值为 3 A(一次值为 60 A),II 段保护定值为 1.25 A(一次值 25 A)。

表 6 DPMC-21 线路保护装置零序电流补偿效果以及保护动作情况
Table 6 Zero-sequence current compensation and operating results of DPMC-21 protection device

故障条件	L ₁ 零序电流实际值/A			装置自适应补偿值/A			装置动作情况		
	单回线 接地故障	双回线 接地故障	三回线 接地故障	单回线 接地故障	双回线 接地故障	三回线 接地故障	单回线 接地故障	双回线 接地故障	三回线 接地故障
故障位置在线路首端	6.829	0.556	0.339	6.841	6.517	6.307	动作	动作	动作
故障位置在线路中点	6.415	2.208	1.088	6.425	6.062	5.590	动作	动作	动作
故障位置在线路末端	5.924	3.271	1.619	5.931	5.621	5.052	动作	动作	动作
$R_f=8\ \Omega$	4.784	2.430	1.799	4.732	4.712	4.701	动作	动作	动作
$R_f=25\ \Omega$	2.704	0.946	0.668	2.706	2.698	2.694	动作	动作	动作
$R_f=50\ \Omega$	1.621	0.498	0.345	1.622	1.616	1.612	延时动作	延时动作	延时动作

故障报告
1 电流突变量启动元件动作 2016 年 7 月 23 日 16:34:20:6
2 零序自适应 I 段保护动作;21 ms 零序电流动作值;4.784 A 零序电流自适应值;4.732 A
3 跳闸继电器返回;70 ms
返回

(a) 单回线故障的故障报告

故障报告
1 电流突变量启动元件动作 2016 年 7 月 23 日 16:36:17:445
2 零序自适应 I 段保护动作;21 ms 零序电流动作值;2.43 A 零序电流自适应值;4.712 A
3 跳闸继电器返回;71 ms
返回

(b) 双回线故障的故障报告

故障报告
1 电流突变量启动元件动作 2016 年 7 月 23 日 16:36:53:436
2 零序自适应 I 段保护动作;21 ms 零序电流动作值;1.799 A 零序电流自适应值;4.701 A
3 跳闸继电器返回;71 ms
返回

(c) 三回线故障的故障报告

图 9 DPMC-21 故障报告

Fig.9 Fault reports of DPMC-21

由表 6 可发现,发生单回线接地故障时零序电流的自适应补偿值与实际值基本相同,说明该装置的自适应零序电流保护功能同样适用于普通的单回线接地故障;而发生多回线接地故障时,DPMC-21 馈线保护投入自适应保护后能够根据阻抗定值和母线电压实时修正零序电流,而且在实际运行中具备较高的补偿精度,显著提高了零序电流保护的灵敏性。

RTDS 测试结果表明,对于小电阻接地系统,发生多回线同时接地故障或者相继接地故障时,在不同的故障位置和过渡电阻条件下 DPMC-21 馈线保护装置的自适应保护均能准确检测到接地故障,并切除故障线路,提高了保护的灵敏性和选择性。

4.3 负荷对保护装置的影响

由于馈线负荷变化随机性较强,而且负荷变化对于线路出口处的保护通常是不易获取的,为了便于分析,本文的自适应零序电流补偿算法忽略了故障时的负荷电流。然而,在实际运行中发生单相接地故障时线路仍存在负荷电流分量,因此保护装置的补偿精度会受负荷的影响。但是,由于系统中性点经小电阻 R_0 接地(R_0 通常为 $10\sim14\ \Omega$),在故障复合序网络中 $Z_{\Sigma SET}$ 主要决定因素为 $3R_0$,故相比于接地电阻 R_0 ,负荷阻

抗对零序电流补偿的影响是有限的。而从保护的角
度,负荷导致的零序电流补偿误差通常在允许范围内,对保护装置的正确动作基本没有影响。

图 10 为最恶劣条件(负载运行、末端故障)下该装置的电流补偿效果。由图可见,相比于空载运行,虽然负荷导致补偿电流存在一定的误差,但是仍显著提高了该保护装置对于多回线故障的灵敏性,保护正确动作。

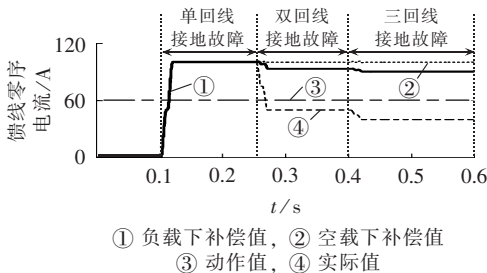


图 10 考虑负荷时的零序电流

Fig.10 Zero-sequence current considering load

5 结论

小电阻接地系统发生多回线同相接地故障时,零序电流的分布特征相比于单回线接地故障发生明

显变化,常规的馈线零序电流保护灵敏性难以满足要求,严重情况下还可能导致母线接地变压器零序保护越级误动,扩大停电范围。因此,本文提出了一种新型的馈线自适应零序电流保护方案。该保护方案通过将每条馈线的零序电流实时地补偿回该馈线单独故障情况下的零序电流,从而使得零序电流保护在继续采用原有整定配合原则的基础上,解决了多回线同时接地故障对零序电流保护所造成的影响。

算法仿真以及装置测试结果均表明,该保护方案显著提高了馈线零序电流保护在多回线复杂接地故障情况下的灵敏性,改善了保护性能,而且不受过渡电阻、故障位置的影响。此外,该保护方案只需在原有零序电流保护方案基础上,增加母线电压信息,容易实现,具有较好的经济性和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李景禄,周羽生. 关于配电网中性点接地方式的探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):85-86.
LI Jinglu,ZHOU Yusheng. Study on neutral grounding modes of distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(8):85-86.
- [2] 唐艳波. 变电站 35 kV 系统小电阻接地方案研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):99-101.
TANG Yanbo. Study on grounding via small resistance of 35 kV system in substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(5):99-101.
- [3] 罗隆福,向博,许加柱,等. 10 kV 小电阻接地系统单相接地故障时的跨步电压仿真与实验研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):21-26.
LUO Longfu,XIANG Bo,XU Jiazhu,et al. Simulation and test of step voltage caused by single-phase grounding fault of 10kV system earthed with low resistance[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):21-26.
- [4] MITOLO M. Grounding the neutral of electrical systems through low-resistance grounding resistors:an application case[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(5):1311-1316.
- [5] 郭丽伟,薛永端,徐丙垠,等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术,2015,39(8):2340-2345.
GUO Liwei,XUE Yongduan,XU Bingyin,et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology,2015,39(8):2340-2345.
- [6] 姜宪国,王增平,张执超,等. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):187-193.
JIANG Xianguo,WANG Zengping,ZHANG Zhichao,et al. Single-phase high-resistance fault protection based on active power of transition resistance[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(13):187-193.
- [7] 许庆强,许扬,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.

- [8] HUANG J K,WU J Y,WANG G,et al. Study on zero-sequence current distribution characteristics in low resistance grounding mode[C]//2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection(APAP). Beijing,China:IEEE, 2011:1039-1043.
- [9] 李银业. “Z”型接地变零序保护误动原因分析及对策[J]. 青海电力,2013,32(2):47-49.
LI Yinye. Malfunction reason analysis and countermeasure of “Z-type” ground transformer zero-sequence protection[J]. Qinghai Electric Power,2013,32(2):47-49.
- [10] 袁勇,李凌. 10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序电流保护误动分析[J]. 华东电力,2003,31(6):31-33.
YUAN Yong,LI Ling. Analysis of malfunction of grounding transformer's zero-sequence current protection in 10 kV low resistance grounding system[J]. East China Electric Power,2003,31(6):31-33.
- [11] 张志文,申建强,杨俊,等. 配电网混合接地运行分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(2):47-52.
ZHANG Zhiwen,SHEN Jianqiang,YANG Jun,et al. Distribution network hybrid grounding operation analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(2):47-52.
- [12] 宁国丽,房亚囡,邢立功,等. 小电阻接地系统中接地变压器零序电流保护改进[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):141-144.
NING Guoli,FANG Yanan,XING Ligong,et al. Improvement of zero-sequence over-current protection for grounding transformer in low-resistance grounding power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):141-144.
- [13] 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.
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.
- [14] 江文东. 10 kV 小电阻接地系统零序过流定值的探讨[J]. 电力自动化设备,2002,22(10):73-75.
JIANG Wendong. Discussion on zero sequence overcurrent settings for 10 kV low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(10):73-75.
- [15] 贺春,刘力军,谢硕果,等. Z 型变在中性点经小电阻接地电网中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2006,34(14):15-19.
HE Chun,LIU Lijun,XIE Songguo,et al. Application of zigzag grounding transformers in the power system with low resistance via neutral grounding[J]. Power System Protection and Control, 2006,34(14):15-19.
- [16] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京:中国电力出版社,2010:160-167.

作者简介:



喻磊

喻磊(1985—),男,湖北荆门人,工程师,博士,主要研究方向为智能电网保护与控制;

郭晓斌(1975—),男,广东河源人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护;

韩博文(1992—),男,广东惠来人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为智能配电网

继电保护(E-mail: ephanbw@mail.scut.edu.cn)。

(下转第 137 页 continued on page 137)

- [16] 周岩,杨长业. 高频铁氧体功率损耗分离方法及其应用[J]. 磁性材料及器件,2013,44(6):50-54.
ZHOU Yan,YANG Changye. Separation of high frequency ferrite core power loss and its application[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices,2013,44(6):50-54.
- [17] ZHOU Yan,SUN Aiming. A simplified ferrite core loss separation model for switched mode power converter[J]. IET Power Electronics,2016,9(3):529-535.
- [18] 周岩. 高频矩形波激励下磁芯损耗的研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):91-95.
ZHOU Yan. Magnetic core loss excited by high-frequency rectangle waveform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(1):91-95.
- [19] 周岩,孙爱鸣,张俊波,等. 基于 ArbExpress 软件的开关变换器典型激励波形生成方法研究[J]. 电测与仪表,2016,53(5):11-15.
ZHOU Yan,SUN Aimin,ZHANG Junbo,et al. The research on

how to generate typical excitation waveforms based on ArbExpress in the switching converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2016,53(5):11-15.

- [20] ZHOU Yan,CHEN Qimi. Predicting core losses under the DC bias based on the separation model[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2017,5(2):833-840.

作者简介:



周 岩(1980—),男,江苏泰兴人,副教授,博士,研究方向为功率磁损建模及测试、无线电能传输技术、高频开关变换器设计(E-mail:zhouyan@njupt.edu.cn)。

Modeling and application of core losses for power inductor in switching converter

ZHOU Yan,ZHANG Junbo,CHEN Qimi

(College of Automation,Nanjing University of Posts and Telecommunications,Nanjing 210023,China)

Abstract: According to the theory of the core loss separation model and the operating characteristics of switching converter circuit,a simplified calculation model for core losses in power inductors is proposed,in which Buck and Boost converters are taken as examples. The characteristics of core losses in the Buck and Boost converters can be predicted in different duty cycles by using only core loss data under the sinusoidal excitation without relying on any magnetic material coefficients. The proposed model can effectively reflect the effects of different factors on the core losses,and the correctness of the model is verified by the experimental data.

Key words: Buck converter; Boost converter; power inductor; core losses; DC bias; model buildings

(上接第 131 页 continued from page 131)

Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system

YU Lei¹,GUO Xiaobin¹,HAN Bowen²,LEI Jinyong¹,TIAN Bing¹,BAI Hao¹,LI Haifeng²,WANG Gang²

(1. Electric Power Research Institute of CSG,Guangzhou 510080,China;

2. School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China)

Abstract: When in-phase grounding fault occurs in multi-circuit lines,the zero-sequence current would significantly decrease compared with that during single line grounding fault,which may cause zero-sequence current relay protection to function improperly and expand the fault range. Therefore,the SPGF(Single Phase Grounding Fault) mechanism of multi-circuit lines in low resistance grounding system is analyzed,and the relationship between feeder zero-sequence current during both multi-circuit line and single-circuit line SPGF is deduced,based on which,a novel adaptive zero-sequence current protection scheme is proposed,i.e. the zero-sequence current during SPGF occurs in multi-circuit lines can be compensated to zero-sequence current during single-circuit line SPGF according to the bus voltage in real time. The protection device based on the proposed scheme is developed. The proposed scheme and the protection device are verified via PSCAD/EMTDC and RTDS,the results show that the proposed scheme has high sensitivity during complex SPGF occurs in multi-circuit line,and the compensation accuracy is not affected by transition resistance and fault location. The proposed scheme can easily be implemented and has economic and high engineering application value since it only needs to add the bus voltage information on the basis of the existing zero-sequence current protection scheme.

Key words: low resistance grounding system; zero-sequence current; complex grounding fault; failure analysis; adaptive protection; relay protection; RTDS test