

的边界点处,这种衰减程度最为明显,其余的边界点则衰减不大,因此,各 FLR 通过比较边界两侧特定频段电流成分的差异情况,可自主判断故障区段。

FLR 安装在分段开关处的每一相上,内部结构如图 2 所示,开关两侧元件的结构参数相同。图中, C_1 、 C_2 、 L 、 R 组成串联带通滤波电路,具体取值为 $C_1=3\ 500\ \mu\text{F}$, $C_2=35\ \mu\text{F}$, $R=10\ \Omega$, L 为可调电感,通过调节 L 至不同取值实现对特定频率暂态电流信号的谐振吸收。当 $L=2.895\ \text{mH}$ 时,调谐电路的谐振频率为 $50\ \text{kHz}$ 。另外, C_1 、 C_2 组成电容分压式电压互感器,采集 C_2 上电压信号 U_c 并进行处理后可检测正常工作或故障情况下线路工频电压,故障后可根据采集的各相电压幅值及相位关系完成故障选相,也可单独作为分段器得/失压信号同出线重合器配合判断故障区段,可用作暂态处理模式的后备判断方法。

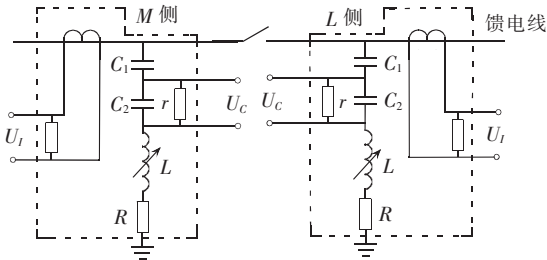


图 2 FLR 的内部结构

Fig.2 The inner structure of FLR

1.3 信号采集及分析

信号采集及处理的原理流程如图 3 所示。

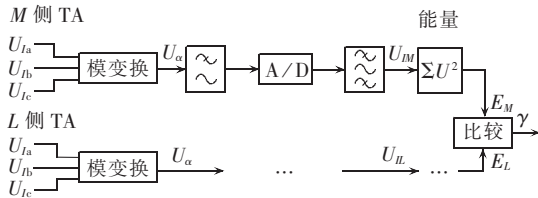


图 3 信号处理电路流程图

Fig.3 Flow diagram of signal processing circuit

为消除馈线间互感对暂态电流的影响,首先对开关两侧电流互感器(TA)输出的三相电压信号分别进行 Clark 变换,取 α 模量,即有

$$U_{\alpha}=U_{Ia}-2U_{Ib}+U_{Ic}$$

变换后模量信号经抗混叠低通滤波后,由 A/D 转换为数字量,然后采用数字带通滤波滤出特征频段的信号幅值 U_{IL} 、 U_{IM} ,计算整个采样周期内信号幅值的平方和,从而求出以模量 α 表示的开关两侧信号能量 E_L 、 E_M :

$$\text{电源侧 } E_M=\sum_{k=1}^n U_{IM}^2(k), \quad \text{负荷侧 } E_L=\sum_{k=1}^n U_{IL}^2(k)$$

E_M 、 E_L 为开关两侧电流中分析频带内电流的含

有情况,反映了滤波器对流过开关的相应频带电流信号的衰减程度; k 表示经带通滤波后的信号序列的第 k 个采样点。

由于故障位置的不同,暂态电流的流动方向会有不同,为便于比较,取 $x=E_L/E_M$,两侧电流能量衰减比例可表示为

$$\gamma=\begin{cases} x & x>1 \\ 1/x & x\leq 1 \end{cases}$$

γ 表示开关两侧滤波频带内信号能量的比值,反映同开关并联的滤波器对所分析频带内电流信号的滤除程度,也反映了开关两侧相应信号经滤波器后的衰减程度。这样可以保证能量衰减比例总为大于 1 的值。取 γ_{th} 为设定的两侧能量衰减比例阈值,当 $\gamma\geq\gamma_{th}$ 时,故障处理器可判断故障发生在自己的保护范围内,向开关发分闸指令。 γ_{th} 可通过系统仿真获得,如后仿真所示,距离故障最近的开关两侧所分析能量的衰减程度与其他位置的衰减程度相差一个数量级, γ_{th} 可取中间值,以保证判断的可靠性。

2 系统运行仿真结果分析

图 4 所示为一条典型 $10\ \text{kV}$ 单电源辐射状配电线路,电源短路容量 $100\ \text{MV}\cdot\text{A}$,线路采用基于频率参数的模型,分段开关 $S_1\sim S_4$ 间的线路长度都为 $2\ \text{km}$,短路故障发生在开关 S_2 、 S_3 间的中点 F_1 处,使用电磁暂态计算软件 PSCAD/EMTDC 分析馈线中各分段开关处 FLR 的工作情况,采样频率取 $200\ \text{kHz}$,谐振装置中心频率选择 $50\ \text{kHz}$ 。

2.1 单相接地故障

以 F_1 点 a 相单相接地故障(表示为 a-g,后面表达类似)为例,故障初始角 $\theta_0=30^\circ$,故障电阻 $R_f=1\ \Omega$ 。图 5 所示为位于故障点上游开关 S_1 、 S_2 处 FLR 的特征频段电流输出情况。可见,距故障点最近的 TA 测得的电流值最大,经调谐电路滤波后 M_2 处 TA 测得的电流值有明显衰减。距故障远的开关 S_1 处两侧电流因经过 S_2 及馈线的衰减,幅值较小,且两侧幅值相差不大。

图 6 所示为位于故障下游分段开关 S_3 、 S_4 处 FLR 的波形,同上游开关的情况相似,距故障点近的开关 S_3 处 2 侧 TA 测得的电流相差明显,距故障点远的 S_4 处则相差不大。

计算得开关 $S_1\sim S_4$ 上 FLR 能量衰减比例分别为 8.6、128、118、4.8。

2.2 不同故障条件的衰减系数比较

表 1 给出故障初始角 $\theta_0=30^\circ$ 、故障电阻 $R_f=1\ \Omega$ 时,各种故障类型情况下各 FLR 的 γ 值,可见,在各种故障类型下都有非常明显的衰减比例。

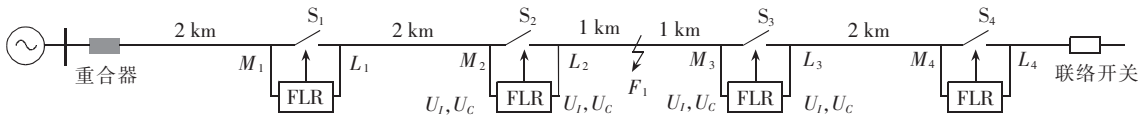


图 4 仿真线路结构

Fig.4 Simulation line

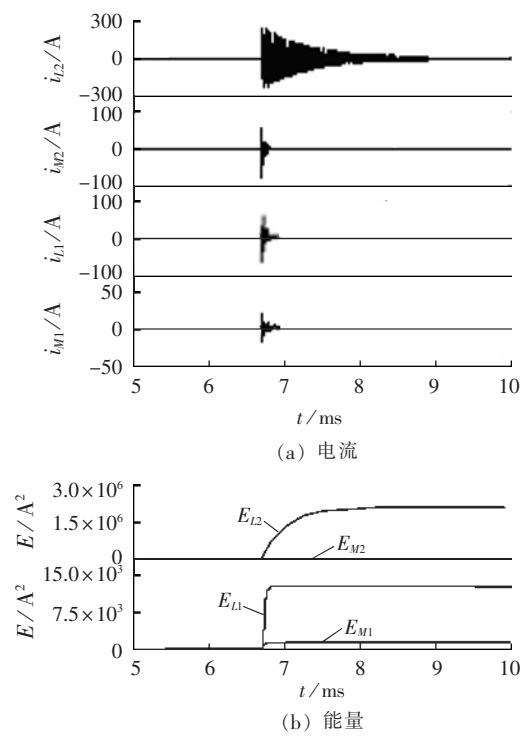


图 5 故障时上游开关相应频段电流幅值及能量

Fig.5 The current amplitude and energy of upper switch during fault

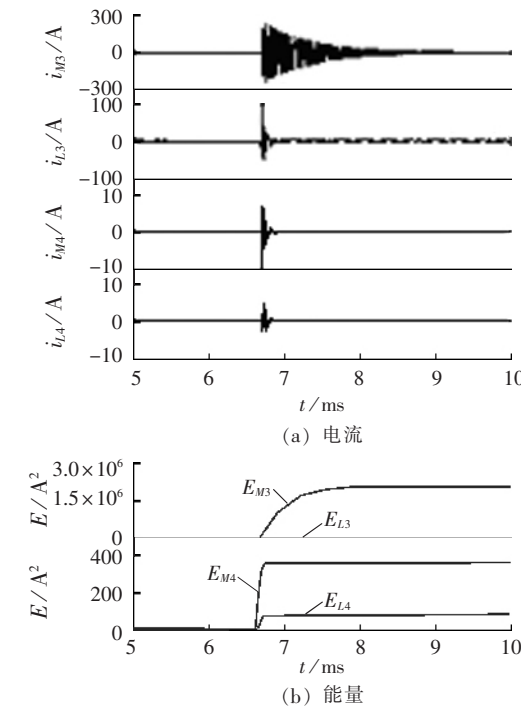


图 6 故障时下游开关相应频段电流幅值及能量

Fig.6 The current amplitude and energy of lower switch during fault

表 1 边界点处的能量衰减比例(条件 1)

Tab.1 Energy attenuation coefficient of each boundary node(case 1)

故障类型	γ_{s1}	γ_{s2}	γ_{s3}	γ_{s4}
a-g	8.6	128	118	4.8
a-b-g	12.6	174	175	7.3
a-b-c-g	13.5	183	188	7.8
a-b	14.2	203	208	7.8

表 2 给出 a 相单相接地、故障电阻 $R_F=1\Omega$ 时不同故障初始角 θ_0 下各 γ 值,故障初始角很小时,不同开关衰减比例相差依然十分明显。即使故障发生在电压真正过零点,故障点电弧燃烧仍可保证此方法的强鲁棒性。另外,调谐电路中 2 个串联电容组成的电容分压式电压互感器可采集故障后的工频电压信号,使得系统在无法依靠暂态电流信号判断故障位置的最恶劣情况下仍可采用传统的重合器-分段器模式判断故障区段,作为基于暂态信号模式的后备保护模式。

表 2 边界点处的能量衰减比例(条件 2)

Tab.2 Energy attenuation coefficient of each boundary node(case 2)

$\theta_0/(^{\circ})$	γ_{s1}	γ_{s2}	γ_{s3}	γ_{s4}
1	7.9	119	112	4.2
5	7.5	111	110	4.4
30	8.6	128	118	4.8
60	7.0	118	109	4.1

表 3 给出单相接地、故障角度 $\theta_0=30^{\circ}$ 时不同故障电阻 R_F 下的边界点能量衰减比例。

表 3 边界点处的能量衰减比例(条件 3)

Tab.3 Energy attenuation coefficient of each boundary node(case 3)

R_F/Ω	γ_{s1}	γ_{s2}	γ_{s3}	γ_{s4}
1	7.9	139	132	4.2
10	8.7	129	118	4.9
100	9.0	130	119	5.9

3 结论

a. 利用本文所述的方法,可将故障产生的特定高频段电流信号很大限度地限制在故障区域边界处,从而使故障区域两端开关处检测到的相应频段电流的衰减程度较其余位置有非常明显的差别。试验数据说明,此种方法不受故障类型的影响,对故障电阻及故障初始角度的变化也可保持良好的稳定性。

b. 通过 FLR 中的电容分压式电压互感器检测故障后各相工频电压,可配合电流信号实现故障选相功能;还可形成基本的重合器-分段器模式的故障判断方案,作为暂态电流信号处理方法的后备。

参考文献:

[1] 杨奇逊. 配电网自动化及其实现[J]. 电力自动化设备,2001,21(1):1-5.
YANG Qi-xun. Power distribution automation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(1):1-5.
[2] 肖先勇,杨洪耕,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七) 电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):1-4.
XIAO Xian-yong,YANG Hong-geng,LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 7:power quality issues on power market[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):1-4.
[3] 孙福杰,王刚军,李江林. 配电网馈线自动化故障处理模式的比较及优化[J]. 继电器,2001,29(8):17-20.
SUN Fu-jie,WANG Gang-jun,LI Jiang-lin. Comparison and

- optimization of fault disposing mode of distribution feeder automation system[J]. Relay, 2001, 29(8): 17-20.
- [4] 吴敏, 朱锡贵, 徐为纲. 无信道馈线故障处理技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 39-41.
WU Min, ZHU Xi-gui, XU Wei-gang. Technology of fault handling in feeder automation without communication channel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 39-41.
- [5] 林功平. 配电网馈线自动化解决方案的技术策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 52-55.
LIN Gong-ping. Technique strategy of feeder automation of distribution power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 52-55.
- [6] 陈勇, 海涛, 稻叶正明. 构筑配电自动化系统的三种基本模式[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 67-69, 83.
CHEN Yong, HAI Tao, MASAOKI I. Three basic modes for constructing distribution automation system[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 67-69, 83.
- [7] 焦邵华, 焦燕莉, 程利军. 馈线自动化的最优控制模式[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 49-52.
JIAO Shao-hua, JIAO Yan-li, CHENG Li-jun. Optimal control mode of feeder automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 49-52.
- [8] 孙德胜, 郭志忠, 王刚军. 配电自动化系统综述[J]. 继电器, 1999, 27(3): 1-3.
SUN De-sheng, GUO Zhi-zhong, WANG Gang-jun. Summarization on distribution automation system[J]. Relay, 1999, 27(3): 1-3.
- [9] 李冬辉, 史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(18): 74-78.
LI Dong-hui, SHI Lin-tong. Survey of the methods to select single phase fault line in neutral point indirectly grounded power system[J]. Relay, 2004, 32(18): 74-78.
- [10] 甘忠, 董新洲, 薄志谦. 输电线路自适应无通道保护(一)故障分析与保护原理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 33-37.
GAN Zhong, DONG Xin-zhou, BO Zhi-qian. Adaptive non-communication protection for transmission lines. Part one: analysis and protection principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 33-37.
- [11] GALIJASEVIC Z, ABUR A. Fault area estimation via intelligent processing of fault-induced transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1241-1247.
- [12] THOMAS D W P, CHRISTOPOULOS C, CARVALHO R J O, et al. Single and double ended travelling-wave fault location on a MV system[C]//Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, Netherlands: IEE, 2004: 200-203.
- [13] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 边界保护的理论基础 第二部分: 线路边界的折反射系数的频谱[J]. 继电器, 2002, 30(10): 1-5.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LÜ Zhi-lai. The spectrum analysis of fault transients for transmission lines. Part II: spectrum of reflection and refraction coefficient[J]. Relay, 2002, 30(10): 1-5.
- [14] 陈皓. 电力系统故障暂态信号的功率谱估计[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(6): 12-15.
CHEN Hao. Power spectral estimation of power system fault transient signal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(6): 12-15.
- [15] JOHNS A T, AGGARWAL R K, BO Z Q. Non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise. Part 1: signal measurement[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 133-140.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王刚军(1969-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为配电自动化及管理系统、多代理技术(E-mail: gangjun-wang@chd.com.cn);

史燕琨(1972-), 男, 北京人, 博士后, 主要研究方向为配电自动化、电能质量分析与控制(E-mail: ykshi@ncepu.edu.cn);

郭志忠(1961-), 男, 河北保定人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电网络理论、电力系统的信息化与自动化、电力系统光学测量技术(E-mail: zhizhongg@xjgc.com)。

Fault location method for distribution feeders based on transient high-frequency current detection

WANG Gang-jun¹, SHI Yan-kun², GUO Zhi-zhong¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: According to the traveling wave theory, fault on a power line produces wideband transient current at the fault point and spreads along the power line to both ends of the feeder. A new non-communication fault location method for overhead distribution feeders by utilizing fault generated high frequency current signals is presented. Designed fault locators are installed at sectional switches i.e. boundaries of sections, which in fact are resonant circuits connected to the feeder line in parallel to shunt the resonant frequency band component of the transient current. By detecting and comparing the difference between currents at both sides of the boundary in selected frequency band, the fault section can be determined by the locator. The three-phase voltage signals from current transformers at both sides of the switch are dealt with Clark transformation, anti-aliasing low-pass filtering, A/D conversion and band-pass digital filtering, then the signal amplitude in characteristic frequency band is achieved for signal energy calculations. By comparing both sides of current energy attenuate ratios with the set threshold, the fault can be located. Both sides of currents and energies of upper and lower switches as well as corresponding attenuate ratios are simulated under different conditions. Results show that the proposed method is free of fault types and keeps stable for different fault resistances and fault inception angles.

Key words: distribution network; fault processing; boundary protection