

10 kV 馈线终端的抗干扰性研究

谢志远, 李乐乐, 郭以贺

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 10 kV 馈线终端工作环境恶劣, 电磁干扰严重, 其运行的可靠性和抗干扰性至关重要, 在对电力系统中最典型的几种干扰源的产生机理、频谱特征和耦合途径进行分析的基础上, 对馈线终端的硬件、软件进行了相应的抗干扰设计, 在山西临汾供电局 10 kV 线路现场运行结果表明, 这些抗干扰措施是有效的。

关键词: 抗干扰; 可靠性; 馈线终端

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)04-0319-04

Research of Anti-interference for 10 kV Feeder Terminal Unit

XIE Zhi-yuan, LI Le-le, GUO Yi-he

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003 China)

Abstract: The 10 kV feeder terminal unit (FTU) operates under severe EMI environment, so its reliability and anti-interference ability are very important. In this paper, several typical interference sources in power system were discussed, and their generation mechanisms, spectrum features and coupling paths were analyzed. Moreover, some corresponding anti-interference designs for hardware and software of FTU were provided. The newly designed FTU with high anti-interference ability has operated on a 10 kV line in Linfen, Shanxi Province, demonstrating that the proposed anti-interference methods are effective.

Key words: anti-interference; reliability; feeder terminal unit

0 引言

配网自动化是电力系统安全、可靠运行的关键, 其终端一般工作在高压开关站、分段开关等现场, 环境恶劣, 强电磁干扰严重, 终端运行的可靠性和抗干扰性尤为重要。随着配网自动化由集中智能式向分布智能式的转变, 主站功能下放, 终端的任务功能更为复杂, 所面临的抗干扰问题也更加突出。高压开关操作引起的暂态骚扰、电快速脉冲群干扰、雷击、静电放电以及空间中各种电磁辐射干扰, 都会对配网终端的弱电设备产生影响, 致使馈线终端发生逻辑错误或程序出轨, 甚至元器件的损坏, 严重影响配网自动化系统的正常运行, 威胁着整个电网的安全。

笔者针对自主开发的 10 kV 馈线终端, 就其所处工作环境中几种典型干扰源的产生机理、频谱特征及耦合途径进行了分析, 并提出相应的抗干扰措施, 进一步提高了馈线终端的抗干扰能力。

1 几种典型干扰源

1.1 高压开关操作暂态干扰

断路器和隔离开关操作过程中产生的瞬态电磁场是最重要的电磁干扰源之一, 开关触头间产生电弧重燃, 在回路中产生一系列的高频振荡, 对二次回路中的设备有很强的干扰。10 kV 馈线终端设备一般紧挨着断路器或分段开关放置, 更易受到干扰。

开关操作过程中产生的暂态过电压表现为一个衰减振荡的过程, 这一衰减振荡波通过 CT、PT 等直接耦合到二次回路中, 在二次回路中可出现大量快速衰减的、振荡的脉冲。

图 1 为简化的开关操作等效电路。图 2 为上述等效电路产生的衰减振荡波波形。

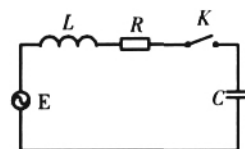


图 1 开关操作等效电路

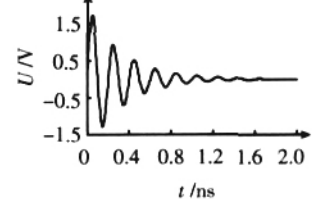


图 2 衰减振荡波

收稿日期: 2007-03-05; 修回日期: 2007-09-25

作者简介: 谢志远(1964-), 男, 河北省辛集县人, 博士研究生, 硕士生导师, 教授, 研究方向为配网自动化、电力系统通信。

不同的开关操作产生的暂态过电压不同，若回路参数 L 和 C 的数值都比较小，则产生频率很高的振荡，典型的振荡频率是几十 kHz 到几十 MHz。国际大电网会议的专题研究报告指出^[1]，在所有的开关操作中，用隔离开关切合空载母线时在站内屏蔽电缆上产生的电磁干扰最为强烈。开关操作会在母线上产生强大的操作过电压和电流，并在母线周围形成较强的瞬态电磁场，进而通过连接电缆的转移阻抗和转移导纳耦合至屏蔽电缆的芯线上，在二次设备端口产生干扰电压和电流，严重影响二次设备的正常工作，甚至威胁整个系统的安全运行^[2]。

1.2 电快速瞬变脉冲群干扰

在对断路器或分段开关的操作过程中，电感负载断开、继电器触点切换都会在电网上产生电快速瞬态脉冲群 (EFT) 干扰^[3]，其对于馈线终端的输入输出端口及通信端口都有很大的影响。

电快速瞬变脉冲群是由于直流系统中的触点断开感性负载 (如继电器接点跳动) 时，触点间产生间歇电弧现象引起的。当断路器分闸时，由断路器的辅助触点断开分闸线圈中的较大电流时，跳闸线圈中存储的磁能要释放，但此电流不能突变，而跳闸线圈两端不允许并联续流二极管等元件，所以线圈两端和断路器辅助触点间都将产生几千伏的过电压，造成间隙电弧现象，引发电快速瞬变脉冲，其电路模型见图 3^[4]。

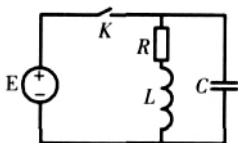


图 3 电快速瞬变脉冲产生电路

国家标准 GB/T 17626.4-1998 规定的电快速瞬变脉冲波形见图 4，单个脉冲的波形为双指数函数

$$V(t) = AV_p(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2}$$

单个瞬变脉冲上升时间 $t_r=5\text{ ns}$ 、脉冲宽度 50 ns ，其主要特点是上升时间快、持续时间短、能量低、重复频率高。

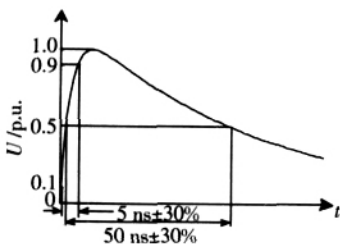


图 4 单个脉冲的波形

电快速瞬变脉冲重复率约为几 kHz 到几百 kHz，图 5 为单个脉冲的频谱，可见波形包含的频谱范围非

常宽。电快速瞬变脉冲上升时间 $t_r=5\text{ ns}$ ，其上限频率 $f=1/t_r=200\text{ MHz}$ ，幅值可达 $1\sim 25\text{ kV}$ ^[5]，但在射频范围内，能量较小，因此瞬变电压主要会引起传导骚扰。

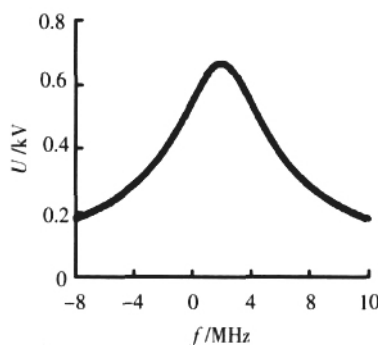


图 5 单个脉冲的频谱

电快速瞬变脉冲可使受试设备的数字系统尤其是 CPU 系统完全陷入混乱，程序跑飞、系统不断复位、数据出现混乱，应当对其重点加以抑制。

1.3 雷击干扰

雷电是来自大气层中比较频繁和强烈的电磁骚扰源，分为直接雷击和间接雷击 (感应雷击)。直接雷击是指雷击于输电线路或电气设备，由于各主要电气设备 (如变压器) 都有防雷措施，雷击电气设备的情况较少发生；间接雷击是指雷击电气设备附近的物体，如雷击于输电线路杆塔塔顶、雷击于避雷线以及雷击大地。雷电放电电流是强烈的骚扰源，在周围空间辐射电磁场，从而使地面上的金属导体感应出很高的电压。系统中的信号线、电源线上都可能由于感应雷的作用而产生浪涌高压脉冲。它可能会造成一次设备绝缘的破坏，即使不破坏绝缘，如此高的雷电压和雷电流耦合到二次设备上，也可能造成二次设备的不正确动作，笔者主要研究间接雷击产生的浪涌干扰的危害。

浪涌干扰是由高能量的低频分量和辐射能力极强的高频分量组成，这种外界的高能浪涌干扰可以通过馈线的各种外接电缆作用到终端上，对保护造成极大的威胁。对于能量大的低频分量，一旦进入终端内部而又没有良好的泄放通道将对终端产生破坏性影响，对其应主要采取吸收技术，对高频分量应主要采用隔离技术。

2 耦合途径

干扰的 3 个要素为干扰源、耦合途径和受干扰的设备，见图 6，干扰源通过各种耦合途径施加到设

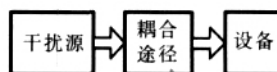


图 6 干扰源对设备的干扰

备上,主要的耦合方式有静电耦合、互感耦合、公共阻抗耦合和电磁场辐射耦合^[6,7]。

(1) 静电耦合方式

干扰源通过两个回路之间的耦合电容在另一个回路中感应出干扰电压,耦合电容容量越大,干扰越严重。馈线终端属于弱电设备,但是与10 kV一次回路距离比较近,当两者之间的耦合电容比较大时,容易在二次回路中感应出比较大的干扰电压,干扰二次设备的正常运行。

(2) 互感耦合方式

干扰源产生的交变磁场在其附近的闭合回路中产生感应电动势,互感耦合的作用相当于一空心电流互感器,干扰电压 $U = Mi$,互感 M 越大,干扰源电流越大,频率越高,则干扰电压越大。系统一次回路有大电流通过时,必然在其周围产生大的磁场,从而在其附近的二次回路上感应出干扰电压。特别是在发生事故的情况下,一次回路中的电流产生突变将会引起强烈的电磁感应。如馈线终端在进行开关操作时,产生多次电弧重燃,在线路上产生相应的高频脉冲,会在邻近馈线终端的闭合回路中感应出干扰电压,影响馈线终端的正常运行。

(3) 公共阻抗耦合方式

当两个电路的电流流经一个公共阻抗时,就会产生公共阻抗干扰。公共阻抗可能是公共电源内阻或公共接地线引起的,一个电路的电流在另一个电路中出现干扰电压,干扰水平取决于公共阻抗幅值。

(4) 电磁场辐射耦合方式

干扰能量通过空间电磁波的形式传播到二次系统中,产生干扰,随二次电缆的接地方式不同形成共模、差模干扰。外部干扰源产生的高频信号通过辐射耦合将向终端电路转移相当数量的能量,馈线终端的输入信号线、外部电源线、机壳等都相当于接收电磁波的天线。可以通过屏蔽措施或电磁兼容设计加以抑制。

干扰源对二次回路的耦合是非常复杂的,通常同时存在几种干扰源和几种干扰方式。

3 抗干扰措施

提高系统的抗干扰性要根据干扰的3要素采取相应的措施,明确干扰源,切断耦合途径和降低装置本身的敏感度,将干扰源对设备的影响降到最低。降低干扰的最佳方法是在整个系统设计之初,对其电磁兼容环境进行评估,通过电磁兼容性设计将干扰影响降低到最小,但某些时候,在干扰源既定的情况下,只能通过切断耦合途径和提高设备的抗干扰能力来减小干扰源对设备的干扰。在笔者设计的10 kV馈线终端中,主要通过采取以下措施来提高系统的

抗干扰性能。

3.1 屏蔽与隔离

屏蔽是为了抑制两个区域之间的电磁场耦合,它可以限制某一区域内部的电磁场越过该区域影响外界,也可以防止外界电磁场进入该区域,利用电磁屏蔽可以有效地抑制静电耦合和电磁耦合。电磁屏蔽是利用辐射电磁场在金属界面上的反射和金属屏蔽层的吸收来抑制电磁辐射干扰的。

为终端配备金属屏蔽机壳,选用高导电性的屏蔽材料,屏蔽机壳必须有效接地,见图7。

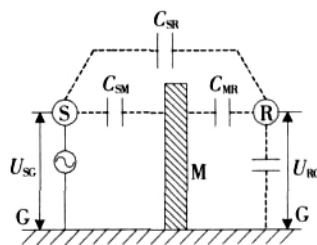


图7 加屏蔽体并有效接地时静电耦合等效电路

若没有屏蔽体 M 时,干扰源 S 在受扰设备 R 上感应出的干扰电压

$$U_{RG} = U_{SG} \frac{C_{SR}}{C_{SR} + C_{RG}} \quad (1)$$

加屏蔽体 M 并有效接地后,干扰电压

$$U_{RG} = U_{SG} \frac{C_{SR}}{C_{SR} + C_{MR} + C_{RG}} \quad (2)$$

一般 C_{SR} 很小,且满足 $C_{SR} \ll C_{MR} + C_{RG}$, C_{SR} 可忽略不计,可见加屏蔽并且有效接地时的干扰电压远小于未屏蔽时的电压。加屏蔽体后没有接地时的静电耦合等效电路见图8。

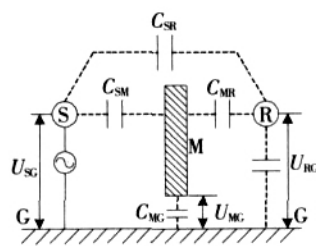


图8 加屏蔽体未接地时静电耦合等效电路

屏蔽体未接地时,屏蔽体 M 对地总电容: $C = C_{MG} + (C_{MR}C_{RG}) / (C_{MR} + C_{RG})$, 屏蔽体对地感应电压 $U = U_{SG} \frac{C_{SM}}{C_{SM} + C}$, 则接收器对地干扰电压

$$U_{RG} = U \frac{C_{MR}}{C_{MR} + C_{RG}} \quad (3)$$

忽略 C_{MG} 有,

$$U_{RG} = U_{SG} \frac{C}{C + C_{RG}} \quad (\text{其中 } C = \frac{C_{MR}C_{SM}}{C_{MR} + C_{SM}}) \quad (4)$$

因为 $C_{MR} \gg C_{SM}$, $C_{SM} \gg C_{SM}$, 所以 $C > C_{SM}$, 比较式(4)和式(1),可见加屏蔽体后不接地不仅会丧失屏

蔽功能,还会造成更大干扰^[8]。

必要时采用双层屏蔽措施,连接电缆采用屏蔽线,并且连线要尽量短,可以达到较好的屏蔽效果。

利用隔离减少电路之间的电气联系可以有效地减少干扰的相互耦合,交流量通过变压器隔离,输入输出开关量等通过光电耦合器、继电器隔离,保证弱电设备与外界没有直接的电气上的联系。

3.2 滤波、浪涌抑制

滤波是抑制和防止干扰的一项重要措施,其基本作用是选择有效信号和抑制干扰。

电快速瞬变脉冲频谱宽,幅度大,普通滤波器难以抑制,而铁氧体磁珠可以有效地抑制。铁氧体在低频段呈现出非常低的感性阻抗,不会影响数据和有用信号的传输;高频段阻抗增加,但感性分量仍很小,而电阻分量却迅速增加,导线中的低频电流可以几乎无衰减地通过,但高频干扰电流却会转变成热量消耗掉。在 10 kV 馈线终端的电源线、数据线上加铁氧体磁珠作为吸收型滤波器,可有效抑制电快速瞬变脉冲产生的干扰。

利用压敏电阻可以有效抑制浪涌,它是一种半导体非线性电阻,当作用在其两端的电压高于压敏电压时即被导通,呈现低阻值,甚至接近短路状态;当高于压敏电压的电压被撤销以后,它又恢复高阻状态。压敏电阻非线性特性好、流通容量大、残压水平低、动作响应快、无续流,在雷电的多级保护电路中,利用压敏电阻作第一、二级保护,在馈线终端的输入端并联压敏电阻,在遭受感应雷击等产生的浪涌电压时,通过压敏电阻泄流,施加在装置上的电压由于压敏电阻的限制将会很小,达到抑制浪涌的目的。

3.3 接地

在微机保护中采用正确、合理的接地形式是抑制干扰的主要方法,包括两方面的内容:一是装置外壳的接大地要求,二是装置内部的数字地、模拟地、屏蔽地、功率地等。

从抗干扰和安全考虑,要求馈线终端金属机壳必须接大地,且接地电阻小于 10 Ω ,内部的高频电路就近多点接地,低频电路一点接地。为了降低数字地上电平跳跃产生的尖峰对模拟电路的影响,须确保数字地和模拟地之间只能一点相连。为了有效地抑制共模干扰,馈线终端内部的地全部悬浮,并且尽量减少零电位线与机壳之间的绝缘强度,减少分布电容。为此,将 PCB 板的周围用地线封闭起来,以减少板上其它部分与机壳之间的直接耦合。这样,当共模干扰侵入时,系统各点对机壳电位随电源线一起浮动,而它们之间的电位差保持不变。

3.4 PCB 电磁兼容设计

一个系统的对外电磁辐射能力和它接收电磁干

扰的能力相当,在设计之初,应该重视 PCB 板的电磁兼容性设计,减少系统对外的电磁辐射,达到降低系统对电磁辐射敏感度的目的。

电源电路单独用一块板独立出来,把易受干扰的器件集中布置并加以屏蔽,把微处理器等集中布置,所有的逻辑通过一片 CPLD 实现,为每一个元件的电源和地之间接一个退耦电容滤除噪声干扰。PCB 板上布线尽量宽,特别是电源线和地线,使其能承受较大功率,并可减少接地线电阻。由于平行布置的导线之间存在寄生电容及耦合电感,会产生相互干扰,在布线时,尽量减少线路所包围的面积,避免出现大的环形,利用地线对信号线进行屏蔽,以降低寄生耦合所产生的电磁干扰。

3.5 软件抗干扰

对已经侵入保护装置的干扰信号,可以通过软件抗干扰措施将危害降低到最小。对于 AD 采样数据进行数字滤波,对输入开关量通过软件去抖动,设置系统自检程序,实时监控功能部件状态,遇有故障时及时报警,利用硬件看门狗,在系统程序出轨或跑飞时,复位 CPU 恢复到正常状态。

4 结语

笔者分析了电力系统中几种典型的干扰源的产生机理、频谱特征以及其对馈线终端干扰的耦合途径,针对几种干扰源提出了相应的抑制措施,并在开发的 10 kV 馈线终端中加以实现。在山西临汾供电局挂网试运行期间,馈线终端运行正常,动作正确,没有发生误动和拒动现象,可见通过这些抗干扰措施,大大提高了馈线终端的抗干扰性。

参考文献:

- [1] 崔翔. 2002 年国际大电网会议系列报道——电力系统电磁兼容研究进展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 65-68.
- [2] 朱玛. 微机继电保护抗干扰研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [3] 付润江, 金波, 杜勇. 电快速脉冲群干扰的频谱分析及消除方法[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2005, 2(7): 245-247.
- [4] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [5] ZHOU Zhong-yuan, JIANG Quan-xing. Analysis of the Effectiveness of Ferrite Core for Improving EFT Immunity[J]. Electromagnetic Compatibility, 2002(21-24): 718-721.
- [6] 屠幼萍, 何金良, 曾嵘. 发电站电磁干扰源对二次系统的传播途径[J]. 电力建设, 2000(10): 16-18.
- [7] 罗钰玲. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [8] 吴良斌. 现代电子系统的电磁兼容性设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.