

限制 GIS 中隔离开关操作引起过电压的研究

阮全荣, 施 围, 王 亮

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on Suppression of Switching Overvoltage Caused by Operation of Disconnecter in GIS

RUAN Quan-rong, SHI Wei, WANG Liang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 根据 GIS 的结构特点,对一种带有并联电阻的隔离开关抑制 VFTO 的机理、作用进行了数值分析。通过研究可知,由于隔离开关分合闸电阻有抑制 VFTO 的作用, GIS 中所产生的 VFTO 的幅值不高,这对于 GIS 以及连接设备和二次控制装置的绝缘不会构成危害,但是 GIS 中的 VFTO 频率很高,对带有绕组的电气设备的绝缘水平,如变压器,会带来一定的影响。

关键词: GIS; VFTO; 并联电阻; 隔离开关

中图分类号: TM564, TM86 **文献标识码:** A

Abstract: Base on the structural characteristic of GIS, the mechanism and effects of disconnecter with shunt resistor to depress VFTO are simulated and analyzed in this paper. Through the research, it is concluded that because the closing resistor of the disconnecter can depress VFTO, the amplitude of VFTO in GIS is low, so it will not endanger the insulation of GIS, including its connecting equipment and control device in secondary side. But because the frequency of VFTO in GIS is very high, the insulation of the equipment with windings, such as transformers, can be influenced.

Key words: GIS; VFTO; shunt resistor; disconnecter

1 前言

GIS 是 20 世纪 70 年代初期出现的高压电气配电装置,具有占地少、运行可靠、安装维护工作量小、维修周期长等优点。但在 GIS 中操作隔离开关(DS)和断路器(CB)时,在 GIS 内部产生特快速暂态(VFT)现象,出现快速暂态过电压(VFTO),并且传播到与其连接的设备上,对相关设备构成威胁,随着超高压 GIS 的广泛应用,VFTO 的影响也越来越突出^[1]。

根据研究和实际运行经验表明^[2-3],在 220 kV 及以下的 GIS 中,VFTO 对 GIS 以及连接设备绝缘和

二次控制设备的影响的并不严重,这是由于 220 kV 及以下电压等级的设备绝缘裕度大,对操作过电压一般不采取限制措施,而在 330 kV 及以上的 GIS 中,VFTO 的幅值随运行电压升高而升高,而 GIS 本身的绝缘裕度在降低,这会引起内部的击穿或外接设备的事故,给电力系统安全运行带来很大的威胁。其主要危害有^[4-5]:暂态地电位升高,对二次设备的电磁干扰和对变压器、电抗器的绝缘影响。如国内某核电站 500 kV GIS,曾发生过两次 VFTO 导致变压器绝缘损坏和线饼烧损的事故。另外,2000 年和 2001 年也有两个电站的 500 kV 变压器发生突发性故障,据分析^[6]也与 VFTO 有关。

在国内 330 kV 和 500 kV 系统中,由于 CB 都装设了合闸电阻,其操作产生的 VFTO 得以抑制,但 DS 操作因预击穿、多次重燃产生的 VFTO 危害极大,也可以说,在这些电压等级中,DS 重燃产生的 VFTO 成为突出问题。因此,目前在 330 kV 和 500 kV 系统中主要采取的措施有:装设避雷器;提高 DS 动作速度;改变操作程序;简化接线以及对所连接的设备采取其它措施等。

上述措施没有从根本上限制因 DS 重燃产生的 VFTO,笔者采用并联电阻的方法,即在超高压、特高压使用的 DS 断口上,安装并联合闸电阻来限制这种过电压。在开关操作过程中先串入电阻,其阻尼作用使波形上升时间下降、幅值降低。20 世纪 80 年代,国外有人对 DS 合闸电阻限制 VFTO 做了相关研究^[6-7],但由于受当时的制造能力的限制未能得到采用。1986 年与 1996 年,文^[7-8]针对一个 1100 kV GIS 进行了仿真计算与模拟实测,发现 200 Ω 的 DS 合闸电阻可将过电压幅值降低到 1.5 p.u. 以下,当合闸电阻为 1000 Ω 时,幅值降低约为 1.25 p.u.。

收稿日期:2005-12-25

基金项目:国家自然科学基金(快速暂态过电压下金属氧化物避雷器频率特性研究)资助项目(50577051)。

作者简介:阮全荣(1964-),男,在读博士研究生,主要从事水电站电气设计和 750 kV 系统过电压研究。

目前世界各地运行的 800 kV 及以上 GIS 较少, 主要有南非的 ALPHA 和 BETA、美国的 DOE WALTZ MILL 以及南韩的唐津、新西兰和安城等变电站, 在南非和美国运行的这些 GIS 主要是 20 世纪 80 年代产品。对 800 kV GIS 中的 VFTO 进行了较多的研究^[9-10], 发现其中的 DS 操作时 VFTO 幅值较高, 如 ALPHA 最大幅值为 2.34 p.u. (1 475 kV)。

笔者依据将应用于我国的 750 kV 系统上的 GIS 结构、布置和接线, 对 DS 分合闸电阻限制 VFTO 的机理及相关要求, 进行分析、数值计算。

2 DS 与 VFTO

GIS 中 DS 例行操作时会产生 VFTO^[1], 这是由于 GIS 中所有元器件工作于稍不均匀电场中, DS 两极均为插入式的同轴圆柱体, 操作中触头运动速度慢, 断口在 SF₆ 气体中会发生预击穿和多次重燃, 形成波前很陡(一般为 3~20 ns)的阶跃电压波, 并向断口两侧传播。再加上 GIS 中相邻电气设备的间距和母线长度都比同型空气绝缘变电站(AIS)小得多, 产生的阶跃电压波会在 GIS 内不断地产生、来回地传递, 并且发生复杂的折射、反射和叠加, 最终暂态振荡的频率剧增, 可高达数百 MHz。根据文[1-3], VFTO 的幅值一般低于 2.0 p.u., 也有可能超过 2.5 p.u.。

3 DS 的结构特点和动作原理

如上所述, 800 kV 及以上电压等级的 GIS, 由于制造和结构原因, 目前大多未在 DS 上装设合闸电阻; 如果在 GIS 中 DS 上装设了分合闸电阻, 则 DS 的接线原理见图 1, 其操作程序为: 合闸: 合 RC-合 MC; 分闸: 分 MC-分 RC。

当 DS 不带并联电阻合闸时, 其等值电路见图 2, 电容为 GIS 的一段母线, 电感为电源的阻抗。

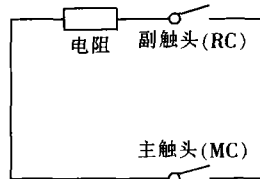


图 1 新型 DS 接线原理

合闸时可建立方程:

$$u_c(t) + LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} = e(t) \quad (1)$$

根据初始条件, 可解得其电容上电压表达式为:

$$u_c(t) = U_{cm} (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2)$$

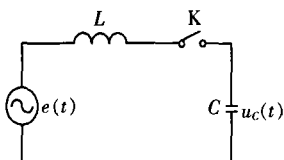


图 2 DS 合闸等值电路

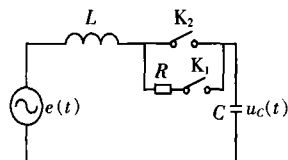


图 3 DS 加入合闸电阻等值电路图

$$\text{式中: } u_{cm} = \frac{1}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} E_m = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} E_m; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

合闸时电容上最大过电压 U_{Cmax} 可达 $2U_{cm}$, 即 2 倍的稳态幅值。

如果有合闸电阻 R , 即图 2 变为图 3。

先合 K_1 , 再合 K_2 , 在 K_1 合闸时, 电容上电压稳态值表达式为:

$$u_c'(t) = U'_{cm} \cos(\omega t - 90^\circ + \theta) \quad (3)$$

$$\text{式中: } U'_{cm} \cos \theta = E_m \sin \theta \frac{\frac{1}{\omega C}}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}; \theta = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

显然, $U'_{cm} < U_{cm}$, 这个过程中可能出现的最大过电压幅值为 $2U'_{cm}$, 由于电阻 R 的存在, 加大了回路的阻尼, 实际出现的过电压幅值将远远低于 $2U'_{cm}$ 。

当 K_2 合闸时, 短接合闸电阻 R , 则电容上电压从 $u_c'(t)$ 变化到 $u_{cm}(t)$ 。因此振荡过程中自由分量的振幅为两者之差。若合闸时间为 t_0 , 则:

$$u_c(t_0) - u_c'(t_0) = U_{cm} [\cos \omega t_0 - \sin \theta \cos(\omega t_0 - 90^\circ + \theta)] = U_{cm} \cos \theta \cos(\omega t_0 + \theta) \quad (4)$$

如果 $\omega t_0 = -\theta$, 自由振幅最大, 即有:

$$u_c(t_0) - u_c'(t_0) = U_{cm} \cos \theta$$

该数值与 θ (或 R) 有关, R 越小, θ (在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间变化) 越大, 则自由分量的振幅越小, 极端的情况下, 当电阻值为无穷大时, 即没有并联电阻, 自由分量的振幅为 U_{cm} , 因此只要选取适当的电阻值, 当 DS 操作时, 会产生低幅值的波, 它在同样结构的 GIS 中传播, 必然会产生低幅值的 VFTO, 从而使 VFTO 得到有效的限制。对断路器而言, 合闸电阻投入时间因受到热容量的限制, 投入时间一般约为 10 ms, 但对 DS 来说, 由于隔离开关只关合一个很小的电容, 合闸 (可能出现预击穿) 时, 电流很小; 另一方面, 断路器在分、合闸过程中不能使用同一个并联电阻, 这是因为分闸、合闸电阻值要求不一样, 而这里 DS 的并联电阻在分、合闸过程中使用同一个并联电阻。

当 DS 分闸时, 其等值电路见图 4, 考虑到电容上电流与电压相位相差 90° , 即 DS 打开时 (回路电流过零), 电容上电压为 $+U_{cm}$, 为分析简便, 设电源为无穷大, 近似可认为与电源电势相等。DS 两触头间电压差为:

$$e(t) - E_m = E_m [\sin(\omega t + 90^\circ) - 1] \quad (5)$$

当电源电势为负的最大值时, 触头间恢复电压为 $-2E_m$, 如果开关发生重燃, 并且回路高频电流过零, 此时电容上电压可达到 $-3E_m$, 当等到电源为正最大值时, 触头间电压达 $4E_m$, 如果重燃再发生, 电容上电压可达 $5E_m$, 依此类推, 每隔半个周波重燃一次, 过电压可达 $-7E_m, +9E_m \dots$ 。这就是 DS 分闸产生

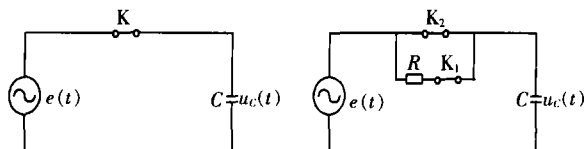


图 4 DS 分闸时等值电路 图 5 装有分闸电阻的 DS 等值电路图
重燃过电压的机理,上述分析过程及结论是在理想状态下得出的,运行中可能出现的复燃实际上低于上述值,但重燃(复燃)次数越多,过电压越高。传统的 DS 运动速度很慢,因此 DS 分闸时常常产生幅值很高的 VFTO,它与投切空载线路一样,只要产生多次重燃,分闸过电压就会高于合闸过电压。

如果在 DS 中加入分闸电阻,其等值电路见图 5,这时分闸顺序为:先打开 K_2 ,再打开 K_1 。

电源电势 $e(t) = E_m \cos \omega t$, DS 未动作时,电容 $u_C(t) = E_m \cos \omega t$ 。在回路电流过零时开断,这时电容上电压为最大值 $+E_m$,电容电压经电阻放电,经计算可知在放电过程中电容上电压为:

$$u_C(t) = E_m \sin \theta \cos(\omega t + \theta - 90^\circ) + E_m \cos^2 \theta e^{-t/RC} \quad (6)$$

式中: $\theta = \tan^{-1} \frac{1}{R\omega C}$ 。

电阻两端电压,即 K_2 打开时触头恢复电压为:

$$u_{CR}(t) = E_m \cos \theta \cos(\omega t + \theta) - E_m \cos^2 \theta e^{-t/RC} \quad (7)$$

由式(7)可知,电容上电压由 E_m 变为 $E_m \cos \theta$, K_2 打开时,主触头恢复电压值远小于 $2E_m$,即不易产生重燃,而且 $R\omega C$ 越小,其恢复电压越低,重燃可能性越小,在 DS 中加入分闸电阻后,一旦发生重燃,电阻在回路中不但能起到阻尼作用,而且减少了重燃的概率。只要阻值选择恰当,可以大大降低 DS 分闸时产生的 VFTO。800 kV DS 开断和合闸时间分别约为 2.4 s, 2.2 s, 三相不同期时间小于 1 s, 如果合闸电阻取 500 Ω , 则最大投入时间小于 0.2 s。在 DS 开断过程中,先在 DS 动、静触头间产生电弧,合闸电阻就一定处于回路之中(时间一般小于 1 s),从而抑制了 VFTO 的幅值。

4 EMTP 计算结果与分析

4.1 计算实例

笔者结合拉西瓦水电站 800 kV GIS 的特点,对操作 DS 产生的 VFTO 进行数值分析。电站装机规模为 4 200 MW, 单机容量 700 MW, 采用 750 kV 一级电压接入系统。电气主接线为:发电机与变压器的组合方式采用联合单元接线,发电机出口设有断路器;750 kV 升高电压侧采用 3/2 断路器接线。

根据电站的接线、运行方式、布置等特点,选用的计算运行方式有 28 种^[11],建立 VFTO 的计算模型,只是改变 DS 的并联电阻的阻值,计算采用 EMTP 程序,其主要元件参数有:①GIS 母线波阻抗 92 Ω ,波速 277 m/ μ s;②架空线的波阻抗 247 Ω ,波速 300 m/ μ s;③对地电容:CB 为 394 pF (分闸时),276 pF (合闸

时);DS 为 240 pF;GIL 和 GIS 母线为 39 pF;套管为 450 pF;变压器为 9 000 pF;电抗器为 5 000 pF。

4.2 计算结果分析

根据上述系统,改变 DS 的分合闸电阻值,对 DS 进行操作,可以计算出 VFTO 幅值。前面已经说明,操作隔离开关主要是开关重燃,如果 DS 分闸时不重燃,设备上的电压幅值就不会出现高于正常的运行电压,只有 DS 发生重燃时,才会产生高幅值的 VFTO,很清楚,VFTO 与分闸电阻值有关,表 1 给出了一种运行方式下^[11]DS 发生二次重燃时,分闸电阻值与 VFTO 的关系。

表 1 二次重燃时,分闸电阻值对分闸过电压(单位:p.u.)的影响 (1.0 p.u.=800 kV $\times\sqrt{2}/\sqrt{3}$ =653.20 kV)

| 分闸电阻/ Ω | 出线侧开关 | 操作的隔离开关 | GIL 中点 | GIL 出线 |
|----------------|-------|---------|--------|--------|
| 500 | 1.200 | 1.200 | 1.293 | 1.068 |
| 400 | 1.200 | 1.200 | 1.354 | 1.076 |
| 300 | 1.256 | 1.245 | 1.440 | 1.086 |
| 200 | 1.369 | 1.381 | 1.575 | 1.099 |
| 100 | 1.722 | 1.654 | 1.822 | 1.131 |
| 50 | 2.122 | 1.901 | 2.067 | 1.169 |
| 0 | 2.976 | 2.287 | 2.515 | 2.240 |

可见分闸电阻的阻尼限制作用随分闸电阻值的不同而变化,若 DS 没有并联电阻,出线侧开关处 VFTO 最大幅值为 1 944 kV,对 GIS 及所连接的设备绝缘有很大的影响。如果要求 800 kV GIS 过电压限制到 1.7 倍以下,该运行方式下的分闸电阻阻值须选取 200 Ω 以上。

对该 800 kV GIS 的 28 种 DS 运行操作方式,模拟 DS 分闸时的重燃进行了计算,同一节点出现最大的 VFTO 幅值见表 2。

表 2 DS 分闸电阻为 500 Ω 时,最大 VFTO 幅值

| 节点 | 幅值 /p.u. | 节点 | 幅值 /p.u. |
|--------|----------|-----|----------|
| DS | 1.352 | 母线 | 1.251 |
| GIL 中间 | 1.293 | 变压器 | 1.134 |
| GIL 出口 | 1.076 | 避雷器 | 1.226 |

从表 1 可知,当 DS 带并联电阻时,分闸操作过程中,产生的 VFTO 幅值较低,从计算结果看,800 kV 带有并联电阻的 DS 操作所产生的 VFTO 幅值对设备绝缘影响不大。

图 6~图 9 为 DS 带分闸电阻分闸操作中几处 VFTO 典型的电压波形。虽然 VFTO 幅值不高,但其频率较高,特别是主变压器处,用频谱分析可知,其基本频率为 500 kHz。

5 结论

根据分析计算结果,可以得到以下结论:GIS 中带有并联电阻的隔离开关有抑制 VFTO 的作用,只要电阻值选择恰当,隔离开关的操作就不会产生很高幅值的 VFTO,对 GIS 以及连接设备和二次控制装置的绝缘不会构成危害,但是 (下转第 24 页)

ADS1.2 选择需要建立的工程模板,建立所对应的工程,在文件窗口中写入通讯程序源文件并将其添加到工程中,变成可以在工程窗口中进行快速工程设置、编译连接和启动调试。当工程编译连接通过后,会在“工程名\工程名_Data\Debug”目录下就会生成一个*.axf 调试文件。

启动 AXD 进行调试,选择 ADP(JTAG 硬件仿真)或 ARMUL(软件仿真)仿真驱动程序后,加载 ELF 格式的可执行文件*.axf 进行调试。在 JTAG 仿真调试通过后,就可以使用 JTAG 接口下载或 ISP 功能下载固化程序到片内 FLASH,不管使用哪一种方式,均需要先设置编译连接的地址,即代码地址从 0X00000000 地址开始。JTAG 仿真器还支持对特定的片外 FLASH 编程,需要先设置编译链接的地址,即代码地址从 0X80000000 地址开始。网络通讯程序被下载固化到 ARM 片内或外部 FLASH 后就可以脱离交叉编译环境独立运行。

5 结语

笔者分析了现有牵引变电所综合自动化系统存在的问题,提出了一种基于 ARM 嵌入式现场模块的牵引变电所模块分布式综合自动化系统结构。研究了如何在基于 ARM 的嵌入式系统上实现牵引变电所综合自动化系统网络通讯功能。通过在各保护测控单元之间采用基于 ARM 的嵌入式系统实现双

CANBUS 多主从的现场网络通讯方式使得各单元之间信息交流更加安全、全面、准确、快速;实现了信息共享,避免了各单元在保护、测控功能上的重复设计,较好地满足了系统各个保护测控单元的网络通讯的要求,解决了基于 ARM 嵌入式现场模块的牵引变电所综合自动化系统设计中的关键问题,增强了系统对电气化铁路各种情况的处理能力。

参考文献:

- [1] 李欣. 基于 ARM 的嵌入式牵引变电所综合自动化系统馈线测控保护单元软件设计与实现 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2005.
- [2] 贺威俊. 电力牵引供变电技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
- [3] Wayne Wolf. Computers As Component Principles of Embedded System Design [D]. USA: Princeton University, 2000.
- [4] 周立功. PHILIPS 单片 32 位微控制器 -LPC2292/LPC2294 [EB]. <http://www.zlgmcu.com/philips/philips-arm.asp>, 2004.
- [5] 陈希明. CAN 现场总线数据采集系统设计方案 [A]. 天津市计算机协会单片机分会, 2003 年全国单片机及嵌入式系统学术年会论文集 [C], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 585-590.
- [6] 饶运涛, 邹继军, 郑勇云. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [7] 崔永昌, 李永丽. 变电站自动化系统中基于 CAN 总线的数据通信[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(5): 43-46.
- [8] 美国 ARM 公司. 使用 ADS1.2 进行嵌入式软件开发 (下)[J]. 电子设计应用, 2003(5): 53-66.

(上接第 20 页)

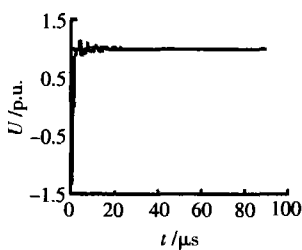


图 6 CB 处电压波形

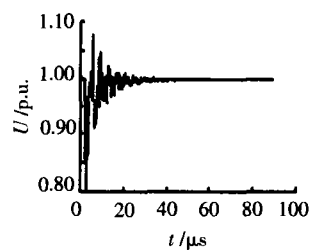


图 7 GIL 出线电压波形

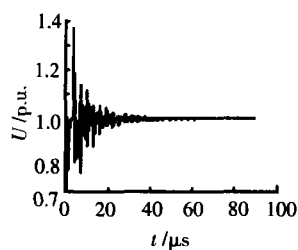


图 8 操作的 DS 电压波形

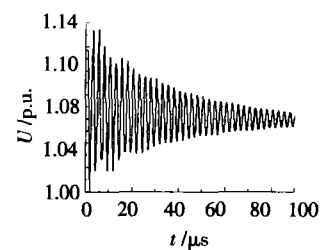


图 9 主变处的电压波形

GIS 中的 VFTO 频率很高,对带有绕组的电气设备的绝缘水平,如变压器,会带来一定的影响。

参考文献:

- [1] 何善庆. GIS 中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-46.
- [2] 钟连宏, 欧世饶, 周红霞. GIS 中的快速暂态过电压的分析及计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60-62.
- [3] Povh D, Schmitt H, Valcker O. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 2 028-2 035.
- [4] 史保壮, 李智敏, 张文元, 等. 超高压 GIS 中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
- [5] 张重远, 梁贵书, 崔翔, 等. GIS 隔离开关操作对二次设备的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 5-7.

- [6] 鲁铁成, 李思南, 冯伊平, 等. GIS 中快速暂态过电压的仿真计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 3-5
- [7] Ozawa J. Suppression of Fast Transient Overvoltage During Gas Disconnector Switching in GIS [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1986, PWRD-1(4): 194-201
- [8] Yamagata Y, Tanaka K, Nishiwaki S, et al. Suppression of VFT in 1 100 kV GIS by Adopting Resistor-fitted Disconnector [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996, 11(2): 872-880.
- [9] Murayama Y. 800 kV GIS Design and Field Measurements for Transient Overvoltage[A]. 8th International Symposium on High Voltage Engineering[C], Yokohama, Japan, 1993: 23-27.
- [10] Grandl J. Studies of Very Fast Transients (VFT) in a 765 kV Substation[A]. International Conference on Large High Voltage Electric Systems[C], Paris, France, 1988: 33-12/1-6.
- [11] 赵峰. 800 kV GIS 中快速暂态过电压的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2005.