

文章编号:1001-1609(2004)05-0358-03

# 330 kV GIS 中投切电抗器的过电压研究

刘青<sup>1,2</sup>, 赵峰<sup>1</sup>, 陈梁金<sup>1</sup>, 施围<sup>1</sup>, 于睁<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安科技大学电控学院, 陕西 西安 710054; 3. 西北电网公司, 陕西 西安 710048)

## Investigation of Transient Overvoltage Caused by Circuit Breaker Switching Shunt Reactors in 330 kV GIS

LIU Qing<sup>1,2</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>, CHEN Liang-jin<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, YU Zheng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. North-west Electric Network Co., Xi'an 710048, China)

**摘要:** 在很多情况下,电抗器直接接在 GIS 母线上,在 GIS 中开关操作时会产生 VFTO,VFTO 以行波的方式通过母线传播到套管,并耦合到 GIS 外部端子、电抗器及与之相连的设备,对其带来危害。以某 330 kV GIS 为例,利用 EMTP 计算了 GIS 中投切电抗器时 VFTO 的幅值、波形,并分析了各种因素对电抗器端部过电压的影响,以及避雷器对该过电压的抑制作用。

**关键词:** 气体绝缘变电站; 电抗器; 快速暂态过电压

**中图分类号:** TM86

**文献标识码:** A

**Abstract:** In many cases, reactors are directly connected to the GIS bus, the circuit breaker operation may generate VFTO, which would propagate towards the bushing along the bus in the form of travelling wave, and be coupled to the outside terminals. The reactor as well as the other equipment connected with the reactor may be subjected to the dangerous stress. This paper computes the waveforms and the maximal amplitudes of such case, and analyses the influence factors. The suppression effect of MOA is also discussed.

**Key words:** gas insulation substation(GIS); reactor; very fast transient overvoltage(VFTO)

## 1 引言

GIS 中所有元器件工作于稍不均匀电场,且操作中触头运动速度慢(约 1 cm/s 数量级),断口在 SF<sub>6</sub> 气体中会发生多次的预、重击穿。在每一个电压跳变处将产生波前很陡(一般为 3~20 ns)的阶跃电压波,并向断口两侧传播。由于这一过电压的上升速率极快,因此被称作陡波前过电压(VFFO)<sup>[1]</sup>,有的文献称其为特快速暂态过电压(VFTO)<sup>[2]</sup>。

在很多情况下,电抗器直接接在 GIS 母线上,可以同时兼顾几条线路的需要,解决超高压电网的无功功率过剩、电网工频电压过高等问题。出于调节功能

的需要,通常 GIS 对电抗器投切频繁。研究表明,隔离开关(DS)和断路器(CB)的操作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。当频率高达几百 MHz 的 VFTO 以行波的方式通过母线传播到套管时,部分将耦合到 GIS 外部并沿线传播,可能危及电抗器及相关设备,造成避雷器频繁动作、通流容量过大,以致于给电力系统造成很大损失。

## 2 330 kV GIS 等值计算模型

选取的 GIS 电气等值接线见图 1。系统由 3 台 200 MV·A 的机组供电,两回出线,认为每回负荷均为电源容量的一半。GIS 母线经过套管与架空线(OHL)-电缆-OHL 连接电抗器,电缆末端装有 MOA。将供电部分以一个电源等效,阻抗取很小的值,容量 600 MV·A。

计算采用 EMTP 程序,各参数如下:系统中 GIS 母线波阻抗没有确切的参数,根据相关资料,波阻抗

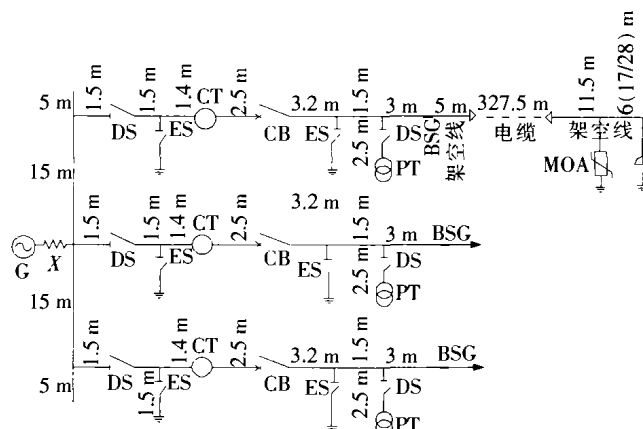


图 1 330 kV GIS 系统电气等值接线图

大致范围  $60\sim 90\ \Omega$ , 波速  $280\ \text{m}/\mu\text{s}$ ; 架空线波阻抗  $310\ \Omega$ , 波速  $300\ \text{m}/\mu\text{s}$ ; XLPE-800 型电缆波阻抗大致范围  $20\sim 35\ \Omega$ , 波速  $150\ \text{m}/\mu\text{s}$ , 长度  $327.5\ \text{m}$ , 用分布参数模型, 采用 10 个  $\pi$  电路模拟。根据厂家提供参数, CB 对地电容: 分闸时  $300\ \text{pF}$ , 合闸时  $210\ \text{pF}$ ; DS 对地电容  $100\ \text{pF}$ ; ES 对地电容  $80\ \text{pF}$ ; CT 对地电容  $100\ \text{pF}$ ; PT 对地电容  $120\ \text{pF}$ ; BSG 对地电容  $60\ \text{pF}$  (充气) 或  $300\ \text{pF}$  (充油); 电抗器套管电容  $410\ \text{pF}$ ; 金属氧化物避雷器(MOA)对地电容  $120\ \text{pF}$ 。电抗器支路由于 GIS 母线的特点以及布置不同, MOA 至电抗器 A, B, C 三相架空线长度分别为  $6, 17\ \text{m}$  和  $28\ \text{m}$ 。GIS 中的相关装置间距见图 1。

### 3 GIS 投切电抗器的过电压仿真计算及分析

当 GIS 中 CB 分、合操作时, 因触头间的多次重燃会产生电压行波, 并引起高频振荡的 VFTO, 一部分经过套管耦合到外电路危及电抗器及相关设备。利用 EMTP 进行仿真, 以便于分析问题。计算之前按稳态计算调整电源电势, 使  $330\ \text{kV}$  母线上的电压有效值不超过最高允许运行电压。开关的合闸相位对过电压的影响十分明显<sup>[3]</sup>, 改变开关的合闸相位, 在使 VFTO 最大的合闸相角下利用 GIS 内断路器投入电抗器。表 1 为无 MOA 投入电抗器的过电压计算结果, 图 2 和图 3 是母线和电抗器端部电压波形。取  $1\ \text{p.u.} = \sqrt{2} \times 363 / \sqrt{3} = 296.39\ \text{kV}$ , 以后计算结果均以标么值表示。计算结果表明:

表 1 无 MOA 投入电抗器的过电压最大值 p.u.

L/m	母线	开关断口	GIS 出线套管	电缆末端	电抗器端
6	2.197	2.071	2.141	1.994	2.659
17	2.195	2.058	2.139	2.033	2.788
28	2.209	2.077	2.099	1.977	2.887

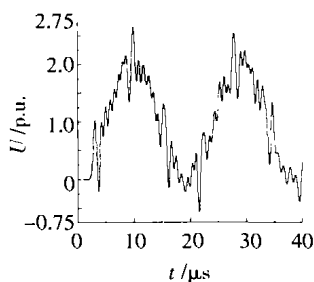
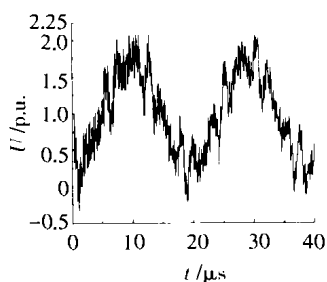


图 2 无 MOA 母线处电压波形 图 3 无 MOA 电抗器端部电压

(1) GIS 内部开关操作时会产生前述的 VFTO, 基本频率约  $50\ \text{kHz}$ , 最高频率达几十  $\text{MHz}$ , 这是网络参数决定的。另外, 由于时间间隔的选取, 有可能丢掉更高频率的分量。

(2) 母线、电抗器端部电压幅值较高, C 相电抗器节点电压最大达到  $2.887\ \text{p.u.}$ 。

(3) 电抗器前架空线三相长度的不同对电压幅值影响较小, 也没有明显规律。

(4) 由电压波形可以看出, 母线处电压高频分量

比其余节点占比重大, 由于前面电缆线路的滤波作用, 电抗器节点电压的高频分量有了很大衰减。

可见 VFTO 幅值较大, 有可能对电抗器等设备的绝缘造成危害。

### 4 MOA 对过电压的限制作用分析

该系统中电缆末端接有 Y10W5-300 型 MOA。下面计算投入 MOA, 最大合闸相角下投入电抗器的过电压, 并对 MOA 的通流容量进行分析, 计算结果见表 2, 表 3。

表 2 有 MOA 投入电抗器的过电压最大值 p.u.

L/m	母线	开关断口	GIS 出线套管	电缆末端	电抗器端
6	2.017	1.972	1.930	2.166	2.182
17	2.016	1.930	1.959	2.172	2.331
28	2.030	1.940	1.930	2.179	2.600

表 3 避雷器流过的电流及通流容量

L/m	电流 /A	容量 /J
6	2 217.2	1 479.21
17	2 429.3	1 457.08
28	2 687.9	1 226.53

可见, 金属氧化物避雷器对 VFTO 有一定的限制作用, 使电压幅值有所下降, A 相电抗器端部电压下降最多, 约  $17.9\%$ , 而母线处电压仅下降约  $8\%$ ; 三种架空线长度对 MOA 吸收的能量影响不大, 对于 C 相, 流过电流最大值为  $2 687.9\ \text{A}$ 。MOA 吸收的能量很小, 不会造成损坏。图 4 为流过 MOA 的电流波形, 为了使结果更加准确, 最大计算时间  $T_{\text{max}}$  调整为  $70\ \mu\text{s}$ 。由图 4 明显看出, 在计算时间内, MOA 有 4 次流过较大的电流, 分别发生在  $10, 30, 50\ \mu\text{s}$  和  $70\ \mu\text{s}$  时, 之后电流可认为是零。虽然 MOA 多次动作但吸收容量很小, 故其通流容量是足够的。

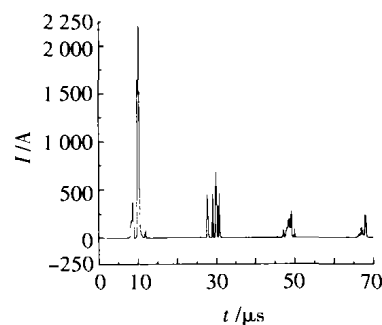


图 4 A 相 MOA 通过的电流波形

### 5 过电压影响因素的分析

以 C 相为例, 在投入电缆末端 MOA 的情况下投切电抗器, 计算分析 GIS 母线波阻抗、电缆波阻抗、出线套管类型及触头间电弧重燃等因素对 GIS 中 CB 投切电抗器的过电压的影响。

#### 5.1 GIS 母线波阻抗的影响

以下计算 3 种情况(套管对地电容  $60\ \text{pF}$ , 电缆波阻抗取  $35\ \Omega$ ), 结果见表 4。

可见, GIS 母线波阻抗的变化对各处电压的影

表4 GIS 母线波阻抗不同时各处电压最大值 p.u.

Z/ $\Omega$	母线	开关断口	GIS 出线套管	末端 MOA	电抗器端
60	1.941	1.913	1.928	2.177	2.580
75	2.030	1.940	1.930	2.179	2.600
90	1.968	1.978	1.955	2.178	2.593

响并无明显规律,但是电缆首端、电抗器端部电压的大小决定了流过避雷器的电流的大小。当波阻抗取 90  $\Omega$  时,电流值为 2 623.4 A;而波阻抗取 75  $\Omega$  时,电流为 2 687.9 A。

## 5.2 电缆波阻抗的影响

XLPE 型电缆参数为  $R=35.7$  m $\Omega$ /km,  $L=0.231$  mH/km,  $C=183.2$  nF/km, 由  $Z=\sqrt{L/C}$  计算可知电缆波阻抗约 35  $\Omega$ , 表 5 为取 3 个不同值的计算结果(套管对地电容 60 pF, GIS 母线波阻抗 75  $\Omega$ )。

表5 电缆波阻抗不同时各处电压最大值 p.u.

Z/ $\Omega$	母线	开关断口	GIS 出线套管	末端 MOA	电抗器端
35	2.030	1.940	1.930	2.179	2.600
30	2.028	1.952	1.957	2.180	2.614
20	1.785	1.789	1.987	2.119	2.666

分析可知, 电缆波阻抗的改变对各点的过电压幅值影响不同, 而且对过电压的影响程度不同, 母线处相差最大 0.245 p.u., 其余节点电压变化不大。这对系统电缆的选取有一定指导意义。

## 5.3 出线套管类型的影响

GIS 经过套管引出与外部设备相连, 目前常用的套管类型有充油套管、SF<sub>6</sub> 套管, 两者在 EMTP 计算中对地电容取值分别为 300 pF 和 60 pF。当 GIS 母线波阻抗取 75  $\Omega$ 、电缆波阻抗取 35  $\Omega$  时结果见表 6。

表6 出线套管类型不同时各处电压最大值 p.u.

套管类型	母线	开关断口	GIS 出线套管	末端 MOA	电抗器端
SF <sub>6</sub>	2.030	1.940	1.930	2.179	2.600
充油	1.983	1.880	1.972	2.179	2.544

由计算结果可以看出, 出线套管类型对过电压幅值有一定的影响, 但无一定规律。这主要是由于 VFTO 波是在 GIS 内多次折、反射叠加而成的, 故与 GIS 及外部设备有关。

## 5.4 电弧多次重燃的影响

利用 GIS 切除电抗器时, 由于开关动作较慢, 断口出现多次预、重击穿, 电弧多次重燃, 使过电压幅值达到很高的数值, 危及设备绝缘, 造成 MOA 多次动作。以下计算三种情况切除电抗器的过电压: ①不考虑重燃、投入 MOA; ②考虑一次重燃、不投入 MOA; ③考虑一次重燃、投入 MOA。计算结果见表 7。

可见, 切除电抗器后, 如果开关不重燃不会产生过电压。对比可知, 电弧的重燃使过电压幅值显著增大; 电缆末端 MOA 的投入对母线电压基本无影响,

表7 三种情况过电压比较 p.u.

条件	母线	开关断口	GIS 出线套管	末端 MOA	电抗器端	
不考虑重燃	投 MOA	1.000	1.000	1.000	1.000	
考虑一次重燃	无 MOA	3.417	3.153	3.198	4.255	4.775
	投 MOA	3.417	3.080	3.139	2.277	2.788

但可使电缆末端、电抗器端部电压有很大程度的降低, 结果显示下降百分比分别为 46.5% 和 41.6%。图 5 为投入 MOA 后电抗器节点的电压波形, 可见, 电压幅值有很大降低, 尤其是 20  $\mu$ s 后更为明显, 此处 MOA 限制过电压的作用很显著。另外, 通过计算得到, 考虑重燃时流过 MOA 的最大电流  $I_{\max}=11.482$  kA, 通流热量为 41.70 kJ。

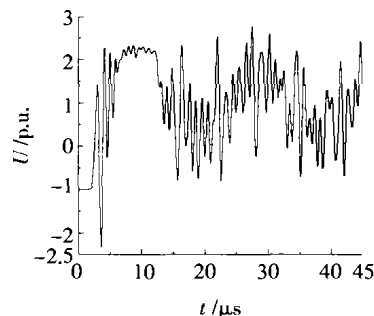


图5 投入 MOA 后电抗器节点的电压

对于 300 kV 以上的 GIS, 冲击耐受水平小于 3.6 p.u.<sup>[4]</sup>。由此看来, MOA 对限制过电压有很大的作用, 可以将过电压限制在耐受水平之内。虽然该标准仅考虑了操作过电压和雷电过电压以及避雷器的保护作用, 尚未考虑 VFTO 的影响, 但从某种程度上也能够说明问题。

## 6 结语

通过对某 330 kV GIS 的仿真计算可知, 利用 GIS 投切电抗器时, 由于开关的操作会产生幅值约 1.8~2.9 p.u., 暂态振荡频率高达几百 MHz 的 VFTO, 并以行波形式传播危及电抗器及相关设备, 造成避雷器频繁动作; GIS 母线波阻抗、电缆波阻抗、出线套管类型及触头间电弧重燃等因素对 GIS 内 CB 投切电抗器的过电压大小均有不同程度的影响; 金属氧化物避雷器对该类操作过电压有一定程度的抑制作用, 电抗器端部电压下降最明显, 约 17.9%, 若考虑电弧的重燃, 则下降程度更大; MOA 吸收的能量不大, 约几十 kJ, 因此, 即使 MOA 频繁动作也不会对其造成大的损坏。

## 参考文献:

- [1] 尹小芳. 封闭式组合电器隔离开关产生的过电压 [J]. 中国电机工程学报, 2002(4): 7-11.
- [2] 何善庆. GIS 中的快速暂态过程 [J]. 高压电器, 1993, 30(1): 47-50.
- [3] 刘英. 110 kV GIS 投切空载变压器过电压研究 [J]. 高压电器, 2000(4): 7-11.
- [4] 张纬钺, 高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合 (第 1 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

作者简介: 刘青 (1978-), 女, 辽宁海城人, 在读硕士, 助教, 主要从事电力系统过电压的计算机仿真及防护等方面的教学和研究工作。