

特高压直流换流站绝缘配合软件的开发与应用

潘文霞¹, 刘 迅², 聂定珍³, 陈 洁⁴

(1. 河海大学 能源与电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 国电环境保护研究院, 江苏 南京 210031;
3. 北京网联直流工程技术公司, 北京 100005; 4. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 根据特高压直流换流站绝缘配合的基本方法和工程设计要求, 利用 Excel 及其自带的 VBA 编辑器开发了一套特高压直流换流站绝缘配合设计与计算软件。该软件具有避雷器配置方案的选择、修改和保存参数、计算绝缘水平、避雷器特性曲线查询等功能。该软件应用于某 ± 800 kV 特高压直流换流站的绝缘配合设计与计算中。实例验算表明该软件具有计算灵活、快速、准确、操作方便、界面友好、通用性强等特点。

关键词: 特高压; 直流; 换流站; 绝缘配合

中图分类号: TM 721.1; TM 723

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)03-0109-04

0 引言

特高压直流输电容量大, 1 回 ± 800 kV 高压直流与 2 回 ± 500 kV 直流或 6 回 500 kV 交流的输电能力相当, 而占用的走廊宽度仅为后者的 50%~70%。可见, 特高压直流输电在大容量、远距离输电特征明显的中国具有重要地位, 同时它的建设也符合“资源节约型、环境友好型”社会的要求^[1]。

直流电压等级由 500 kV 提高到 800 kV, 换流站和线路的绝缘部分占总设备投资比重相当大。因此确定合适的换流站绝缘水平, 既是换流站设备设计、制造和试验的基础, 又是降低设备运行中的事故率、减少停电损失和维护费用的保证^[2-5]。特高压换流站绝缘配合设计和计算包括避雷器配置方案、避雷器型号的选择、避雷器保护水平等, 这些都涉及到设计人员的经验、大量的计算和参数调整。拥有一套能将上述内容融为一体, 完成灵活配置方案、多重计算和比较的实用软件将有效提高特高压直流设计水平和效率。

本文根据特高压直流换流站绝缘配合的形式和特点以及工程设计人员提出的操作简单、运行环境要求低、调用 Excel 避雷器数据方便的要求, 利用 Excel 及其自带的 VBA 编辑器开发了特高压直流换流站绝缘配合设计与计算软件。并将该软件应用于向家坝—上海 ± 800 kV 直流输电工程的绝缘水平设计中, 实例验算表明该软件具有灵活、快速、准确、操作方便、界面友好、通用性强等特点, 可以方便、可靠地选择合适的避雷器配置方案应用于特高压直流换流站的绝缘配合设计, 并完成相应的计算。

1 避雷器保护水平的基本计算方法

特高压换流站的避雷器按配置地点不同分为交

流侧避雷器、阀厅避雷器、直流极线避雷器、中性母线避雷器。对于不同地点的避雷器, 其保护水平的计算方法也不相同。

在软件中首先根据所选已知型号的避雷器电压、电流参数生成满足程序自身调用的一组避雷器 $U-I$ 特性曲线。按脉冲波形的不同分为 $1/2 \mu\text{s}$ 、 $8/20 \mu\text{s}$ 和 $30/60 \mu\text{s}$, 其中 $8/20 \mu\text{s}$ 和 $30/60 \mu\text{s}$ 又各自包括最大和最小 2 组特性曲线。

软件根据绝缘配合的需要, 对所选避雷器的保护水平进行计算, 再依此确定换流站设备所要求的耐受电压^[6-8]。下面以交流侧避雷器为例说明避雷器主要参数的计算。

1.1 雷电冲击保护水平 (LIPL)

雷电冲击保护水平下的配合电压 U_{∞} 为

$$U_{\infty} = K_1 I_m K_2 \quad (1)$$

其中, U_{∞} 为标幺值; I_m 为每柱避雷器输入电流; K_1 、 K_2 分别为避雷器特性曲线中配合电压标幺值和输入电流的对应系数。

取波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 的最大特性曲线来计算雷电冲击保护水平 U_{LIPL} :

$$U_{\text{LIPL}} = N_b U_{\infty} U_N \quad (2)$$

其中, N_b 为避雷器组的数目; U_N 为额定电压。

1.2 操作冲击保护水平 (SIPL)

操作冲击保护水平的计算与雷电冲击保护水平的类似, 唯一不同的是选取波形为 $30/60 \mu\text{s}$ 的最大特性曲线来计算。

1.3 避雷器能量要求

避雷器能量 E 满足下式:

$$E = \frac{N_b C_E N_c}{E_f} \quad (3)$$

其中, C_E 为每组避雷器对应的能量常数; N_c 为避雷器柱数; E_f 为不同柱数的避雷器对应的能量系数。

对于其他配置地点的避雷器主要参数, 计算稍有

不同,在此不再详述。

2 基于 Excel 的 VBA 编辑器的特高压直流换流站绝缘配合设计与计算软件的开发

特高压换流站绝缘配合的设计与计算包括大量的参数,利用 Excel 表格可以方便地保存数据以便于用户的分析。这部分的开发内容本软件是利用 Excel 及其 VBA 编辑器开发完成的。

2.1 软件的设计思想和功能

该软件能在 Windows98/2000/XP 等多种操作系统中安装、使用,具有图形化界面。用户可根据需要进行相关参数的修改和设置,通过计算将相关结果保存在 Excel 中^[9]。

具体而言,该软件实现了以下功能。

a. 提供高压直流输电方式的选择。首先有传统直流输电和采用电容换相换流器 CCC (Capacitor Commutated Converter) 方式的选择,其次是线路或电缆输电和背靠背接线的选择,还有 12 脉动和双 12 脉动方案的选择。

b. 提供避雷器配置方案的选择。用户可以在避雷器配置图中对各点的避雷器配置情况进行任意组合,完成避雷器的最佳配置。

c. 每个避雷器计算模块都有各自独立的参数界面。各避雷器参数都可以在可视化窗口中输入、修改和保存。

d. 绝缘水平的计算结果以 Excel 方式输出。对于每个避雷器,计算结果在输入参数后就自动计算,并在相应的模块中显示。最终的输出结果可根据需要立即显示或保存为文件。文件以 Excel 的表格形式输出,方便用户的分析和打印。

e. 避雷器 $U-I$ 特性曲线的查询和添加。用户可以选择避雷器型号、配合电流、脉冲类型、最大或最小特性曲线、避雷器的柱数、输入电压或电流来初步估算避雷器的主要参数。程序还预留了接口,使得用户可以添加其他型号的避雷器 $U-I$ 特性曲线。

2.2 软件的计算机实现方法

本软件在主界面上设置了高压直流方式选择的按钮,可选择传统直流线路或电缆输电方式和电容换相换流器背靠背输电方式。

图 1 为线路或电缆输电型式的双 12 脉动避雷器配置方案(I、II),选中对应避雷器的复选框,图中就会出现对应的避雷器。方案 II 与方案 I 的不同在于没有配置直流极线避雷器 F_{DB1} 、与平波电抗器并联的避雷器 F_{DR} 和接地极线路入口处避雷器 F_{E1} (见图 1 中虚线框部分)。用户在方案图中选中避雷器后,对应的数据输入模块就会在相应的窗口显示,供用户进行数据的输入。输入完所有参数后,点击计算按钮,程序就将所有避雷器的计算结果汇总计算,得到了换流站的绝缘水平。

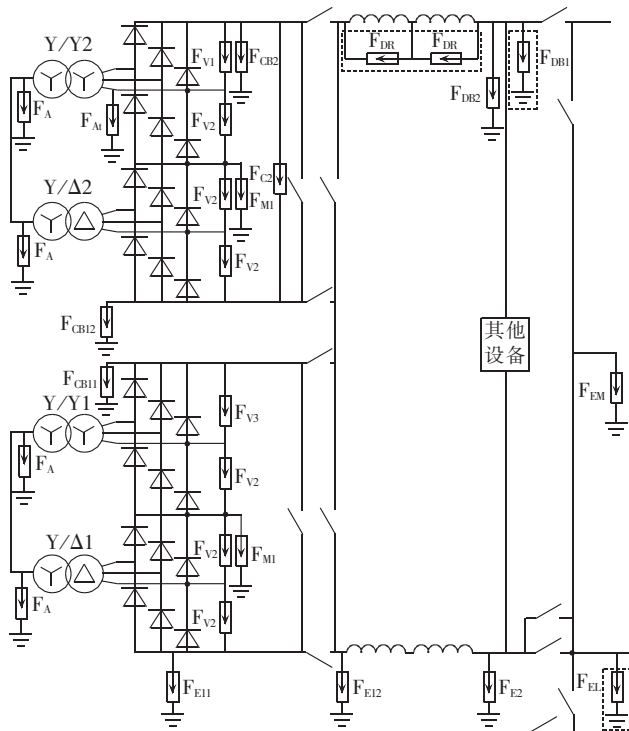


图 1 特高压直流换流站避雷器配置方案(I、II)

Fig.1 Arrester scheme I and II of UHVDC converter station

软件中的避雷器特性曲线以 Excel 数据的形式保存。软件内部可以自动生成曲线供计算时取值。图 2 为一种避雷器 500 A 和 10 kA(单柱)特性曲线(u 为标么值),图中有 30/60 μs 、8/20 μs 和 1/2 μs 3 种不同种类的冲击,且 30/60 μs 、8/20 μs 中有最大和最小 2 种特性曲线选择。软件中存有若干常用典型避雷器特性曲线,如 EXLIM P、T、V、D 和 E。

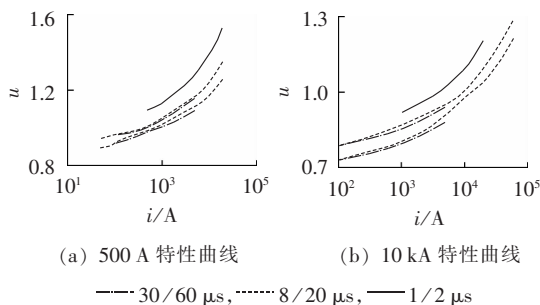


图 2 P 型避雷器单柱特性曲线

Fig.2 Characteristic curve of P-type arrester, single column

整个软件由如下模块组成。

a. 参数定义和管理模块。全部计算参数的定义都在一个定义模块。内部调用的参数都以 Excel 表格的形式保存。

b. 计算模块。每个避雷器都有独立的计算模块。在计算中共用的函数统一放在一个模块中,以供其他模块访问。计算的过程就是将变量传递给函数,然后执行函数的过程。不同界面的避雷器模块计算过程不完全相同。每个避雷器模块独立计算,互不影响。

c. 计算结果输出模块。本软件以 Excel 文件保存输出结果,共 7 张表格,分别记录了绝缘水平、变压器水平、避雷器保护水平、空气间隙水平、输入数据、避雷器目录表和避雷器配置方案图。

3 特高压直流换流站绝缘水平的实例计算

利用开发的软件,对某 ±800 kV 直流输电工程的设计绝缘水平进行计算。

3.1 系统条件

换流站采用每极双 12 脉动单元换流阀、400 kV+400 kV 接线方案。直流系统双极额定输送功率为 6 400 MW,额定运行电压为 ±800 kV,额定运行电流为 4 000 A。交流系统运行额定电压为 525 kV,稳态最高运行电压 550 kV,稳态最低运行电压 500 kV;额定理想空载电压 $U_{dion}=230$ kV,绝对额定理想空载电压最大值 $U_{dion}^{max}=242$ kV,直流电压最大值 $U_d^{max}=816$ kV,换相过冲为 17%。

3.2 避雷器参数

避雷器保护水平见表 1,避雷器 F_A 通过变压器变换到副边的操作保护电压为 267 kV。表中,PCOV 表示过冲持续运行电压;CCOV 表示峰值持续运行电压; U_{ref} 表示参考电压;LIPL 表示雷电冲击保护水平;

表 1 避雷器保护水平

Tab.1 Arrester protection level					kV
避雷器	PCOV	CCOV	U_{ref}	LIPL	SIPL
F_{V1}	297	254	212	402/1	416/6
F_{V2}				475/10	416/2
F_{V3}					416/3
F_{M1}	297	254	331	474/1	462/0.5
F_{M2}	712	669	840	1 200/1	1 170/0.5
F_{CB11}	487	473	555	793/1	753/0.2
F_{C2}				936/10	
F_{CB12}	415	415	485	661/1	640/0.4
F_{CB2}	912	888	1 016	1 417/0.5	1 380/0.2
F_A	912	888	1 016	1 417/0.5	1 380/0.2
F_{DB1}	816	816	998	1 621/20	1 391/1
F_{DB2}	816	816	998	1 545/10	1 391/1
F_{E11}	120	70	308	450/1	/
F_{E12}	120	70	296.5	400/1	428/10
F_{E2}	70	70	273	400/10	394/10
F_{EL}	15	15	243	400/10	/
F_{EM}	70	70	258	450/20	/
F_A	318	318	/	949/20	778/10
F_{DR}	100	100	458	900	747

SIPL 表示操作冲击保护水平。

3.3 不同点的电压及绝缘水平

不同保护目标位置的过电压及绝缘水平见表 2。计算结果表明:该软件能够准确、方便地完成特高压直流工程的绝缘水平计算。

表 2 过电压及绝缘水平

Tab.2 Overvoltage and insulation level

保护目标位置	保护元件	雷击冲击			操作冲击		
		LIPL/kV	LIWL/kV	裕度/%	SIPL/kV	SIWL/kV	裕度/%
阀桥两侧	$F_{V1}/F_{V2}/F_{V3}$	402	443	10	416	458	10
交流母线	F_A	949	1 550	63	778	1 175	51
直流线路(平抗侧)	F_{DB1}	1 625	1 950	20	1 391	1 600	20
极母线	F_{CB2}	1 417	1 700	20	1 380	1 587	20
	$F_{C2}+F_{CB12}$	1 454	1 745	20	1 393	1 602	20
	$2F_{V2}+F_{CB12}$	1 465	1 758	20	1 472	1 693	20
	F_{A2}	1 417	1 700	20	1 380	1 587	20
上换流变 Y_y 阀侧相对地	$F_{M2}+F_{V2}$	1 602	1 922	20	1 586	1 824	20
	$2F_{V2}+F_{CB12}$	1 465	1 758	20	1 472	1 693	20
	$2F_{V2}+F_{CB11}$	1 597	1 916	20	1 585	1 823	20
上换流变 Y_y 阀侧中性点	$F'_A+F_{CB12}+F_{V2}$	/	/		1 323	1 522	20
	$F'_A+F_{CB11}+F_{V2}$				1 436	1 652	20
上 12 脉动桥中点母线	$F_{V2}+F_{CB12}$	1 063	1 276	20	1 056	1 215	20
	$F_{V2}+F_{CB11}$	1 195	1 434	20	1 169	1 345	20
上换流变 Y_d 阀侧相对地	$F_{V2}+F_{CB12}$	1 063	1 276	20	1 056	1 215	20
	$F_{V2}+F_{CB11}$	1 195	1 434	20	1 169	1 345	20
上下两 12 脉动桥之间中点	F_{CB11}	793	952	20	753	866	20
下换流变 Y_y 阀侧相对地	$F_{V2}+M_1$	876	1 051	20	878	1 010	20
下换流变 Y_y 阀侧中性点	F'_A+F_{M1}	/	/		729	839	20
下 12 桥中点母线	F_{M1}	474	569	20	462	532	20
下换流变 Y_d 阀侧相对地	$F_{V2}+F_{E11}$	852	1023	20			
	$F_{V2}+F_{E12}$				844	971	20
阀侧相间	$\sqrt{3} F'_A$	/	/		463	533	20
阀侧中性母线	F_{E11}	450	540	20			
	F_{E12}				428	493	20
线侧中性母线	F_{E2}	400	480	20	394	453	20
接地极母线	F_{EL}	400	480	20			
	F_{E2}				394	453	20
金属回路母线	F_{EM}	450	540	20			
	F_{E2}				394	453	20

注:“/”表示此参数无需计算。

4 结论

本文依据特高压直流换流站绝缘配合设计和计算的基本原理和模型,利用Excel自带的VBA编辑器,开发了一套适合于特高压直流换流站绝缘配合设计与计算的实用软件。该软件可灵活、方便、高效地完成特高压换流站避雷器方案配置、避雷器特性曲线的添加、修改、保存与查询、绝缘水平的计算以及结果的列表输出等功能。

本文利用开发的软件,对某 ± 800 kV直流输电工程的设计绝缘水平进行了验证性计算,得出了准确的计算值。实例验算表明,本软件具有方案设计灵活、计算快速准确、功能全面、操作方便、通用性强等特点,可方便、可靠地应用于实际特高压直流换流站的绝缘配合设计与计算工作中。

参考文献:

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China [J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [2] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-7.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW [J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-7.
- [3] 常浩. 我国高压直流输电工程国产化回顾及现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 30-36.
CHANG Hao. Situation & overview of HVDC system localization of China [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 30-36.
- [4] 马为民, 聂定珍, 曹燕明, 等. 特高压直流换流站系统优化设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 26-30.
MA Weimin, NIE Dingzhen, CAO Yanming, et al. Optimal design for UHVDC converter station [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 26-30.
- [5] 聂定珍, 马为民, 李明. 锦屏—苏南特高压直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 92-97.
NIE Dingzhen, MA Weimin, LI Ming. Insulation coordination for converter stations of UHVDC project from Jinping to Sunan [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 92-97.
- [6] 聂定珍, 马为民, 郑劲. ± 800 kV 特高压直流换流站绝缘配合[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 75-79.
NIE Dingzhen, MA Weimin, ZHENG Jin. Insulation coordination for ± 800 kV UHVDC converter stations [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 75-79.
- [7] 周沛洪, 修木洪, 谷定燮, 等. ± 800 kV 直流系统过电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 125-132.
ZHOU Peihong, XIU Muhong, GU Dingxie, et al. Study on over-voltage protection and insulation coordination for ± 800 kV HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 125-132.
- [8] 聂定珍, 郑劲. 灵宝背靠背换流站过电压与绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 33-35.
NIE Dingzhen, ZHENG Jin. Study on overvoltage and insulation coordination in Lingbao converter station [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 33-35.
- [9] 史丹, 任震, 余涛. 高压直流换流站损耗计算软件的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 81-89.
SHI Dan, REN Zhen, YU Tao. Development and application of loss calculation software for HVDC converter station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 81-89.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:

潘文霞(1961-), 女, 安徽安庆人, 教授, 博士研究生导师, 从事电气工程教学与研究工作;

刘 迅(1982-), 男, 江苏扬州人, 硕士, 从事电力系统过电压与绝缘配合方面的研究(E-mail: lx214121@sina.com);

聂定珍(1961-), 女, 湖北黄梅人, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统过电压及绝缘配合方面的研究、设计工作;

陈 洁(1982-), 女, 江苏宿迁人, 从事电力系统自动化方面的研究(E-mail: qakvabit@gmail.com)。

Development and application of insulation coordination software for UHVDC converter station

PAN Wenxia¹, LIU Xun², NIE Dingzhen³, CHEN Jie⁴

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China; 3. Beijing Wanglian HVDC Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100005, China; 4. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: According to the basic insulation coordination method of UHVDC converter station and the requirements of engineering, a design & calculation software is developed for it with Excel and its VBA editor, including different functions, such as the selection of arrester arrangement scheme, modification and storage of parameters, calculation of insulation level, inquiry of arrester characteristic curves, etc. It is used in the design and calculation of insulation coordination for a ± 800 kV UHVDC converter station. Case study shows that it is flexible, fast, accurate, convenient, user-friendly and adaptable.

Key words: UHV; direct current; converter station; insulation coordination