

基于 EMTP 的高压输电工程电磁暂态研究

单蒙, 刘为雄

(广东天联电力设计有限公司, 广州 510663)

摘要: 重点关注了同塔双回架设线路的感应电压及感应电流问题, 采用电磁暂态仿真程序 ATP-EMTP, 建立了某 500 kV 电厂接入系统工程的系统元件模型, 仿真计算了建成投产后电厂—城西站双回 500 kV 线路三相电压、电流的不平衡度以及线路感应电压、和感应电流的情况。根据仿真计算结果可知, 在本工程推荐的线路相序及换位条件下, 线路三相电压、电流的不平衡度均满足国标要求; 线路侧接地刀闸感应电压在该研究结果的基础上提高 5%, 感应电流可参考本次研究结果。

关键词: ATP-EMTP; 电磁暂态; 三相不平衡; 感应电压; 感应电流

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0057-04

Research on Electromagnetic Transient of HV Power Transmission Project Based on EMTP

SHAN Meng, LIU Weixiong

(Guangdong Tianlian Electric Power Design Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: This paper focuses on the induced voltage and induced current of the double circuit lines on the same tower. The system component model of 500 kV Power plant access system engineering is built by use of electromagnetic transient program (EMTP). The three-phase voltage unbalance, three-phase current unbalance, inductive voltage, and inductive current of the double circuit line in the same tower from Power Plant to ChengXi substation are calculated by this model. The results show that the three-phase voltage unbalance and three-phase current unbalance can meet the requirements of the national standard based on the current phase sequence and transposition condition which is recommended in this project. When selecting the grounding switch, the inductive voltage should up 5% on the basis of the results in the study, and the inductive current could refer to the results in this study.

Key words: ATP-EMTP; three-phase unbalance; electromagnetic transient; induced voltage; induced current

输电系统为了节省用地、减少投资、提高经济效益, 近些年结构日趋紧密, 相当部分的输电线路采用同塔双回或多回架设的结构^[1-3]。在广东及珠三角经济发达地区, 面临负荷更集中、电源更密集、土地资源更紧缺等实际困难, 建设同塔多回输电线路成为解决上述问题的有效途径之一, 并由此带来巨大的输电效益。

然而输电线路同塔多回架设给电力系统的安全运行带来巨大的挑战。由于同塔线路往往作为电网的主干线路担负着电网超大功率传输或区域电网的

联络重任, 其安全运行对电网的影响更显重要。结合近些年输电系统运行越来越逼近其极限水平的实际, 利用电磁暂态研究软件 ATP-EMTP 开展输电线路电磁暂态特性研究, 进而为同塔线路的规划设计、建造以及保护、运行提供借鉴与指导变得十分必要与迫切^[4-7]。

1 ATP-EMTP 仿真软件介绍

ATP 程序(The Alternative Transients Program)是目前世界上电磁暂态分析程序 EMTP (Electromagnetic Transient Program) 最广泛使用的一个版本, ATP-EMTP 程序可以在大多数类型的计算机上运行。

EMTP 程序的基本功能是进行电力系统仿真计

算, 将 EMTP 的稳态分析和电磁暂态分析相结合, 可以作为电力系统相关研究的有力工具^[8]。

2 高压输变电工程电磁暂态计算

本文利用最新版本的电磁暂态计算程序 ATP-EMTP 软件, 对某 500 kV 电厂接入系统工程电磁暂态问题进行研究, 重点研究建成投产后电厂一城西双回 500 kV 线路相关的三相不平衡、感应电压和感应电流问题, 并由此提出对本工程设计中线路换位、线路接地刀闸的参数要求。

电厂一城西同塔双线路全长 248 km, 本期在电厂侧配置 90 Mvar 高抗, 在城西侧配置 150 Mvar 高抗, 线路电气序参数如表 1 所示, 全线导地在杆塔上的分布情况详如图 1 所示。

表 1 线路电气序参数

Tab. 1 Transmission line sequence parameter

R_0/Ω	X_0/Ω	$C_0/\mu F$	R_1/Ω	X_1/Ω	$C_1/\mu F$	R_{00}/Ω	X_{00}/Ω	$C_{00}/\mu F$
43.76	200.42	2.09	2.04	59.30	3.790	41.61	123.471	-0.791

注: 下标 0 表示零序参数; 下标 1 表示正(负)序参数; 下标 00 表示回路间零序互耦参数

2.1 线路三相电压不平衡度计算

根据 GB/T 15543—2008 关于电能质量之三相电压允许不平衡度相关规定: 电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2%, 短时不得超过 4%。电流不平衡度可参考近区发电机组的允许程度以及相关继电保护的阈值选取, 一般要求低于 5~10% 的范围。

1) 电压不平衡度系指: (1) 零序电压不平衡度: $M_{v0} = V_0/V_1$; (2) 负序电压不平衡度: $M_{v2} = V_2/V_1$ 。

2) 电流不平衡度系指: (1) 零序电流不平衡度: $M_{i0} = I_0/I_1$; (2) 负序电流不平衡度: $M_{i2} = I_2/I_1$

其中: V_1 、 I_1 指电压、电流的正序分量; V_2 、 I_2 指电压、电流的负序分量; V_0 、 I_0 指电压、电流

的零序分量。

以上各不平衡度指标的数值越大, 表示线路电气参数不平衡情况越严重。

在 EMTP 中搭建电厂一城西线路以及与城西站直接相连的所有线路物理模型, 相关变压器、电源以及负荷等值模型, 进行计算, 母线电压计算结果如表 2 所示, 线路电压计算结果如表 3 所示, 线路电流计算结果如表 4 所示。

表 2 电厂一城西线路两侧 500 kV 母线三相电压不平衡度计算结果

Tab. 2 The results of three-phase voltage unbalance of 500 kV bus bar on both sides of the line from power plant to Chengxi substation

线路运行条件	负序电压不平衡度/%		零序电压不平衡度/%	
	电厂侧	变电站侧	电厂侧	变电站侧
双回运行	0.10	0.04	0.07	0.06
单回运行	甲线	0.20	0.04	0.04
	乙线	0.20	0.04	0.07

表 3 电厂一城西线路三相电压不平衡度计算结果

Tab. 3 The results of three-phase voltage unbalance of the line from power plant to Chengxi substation

线路运行条件	负序电压不平衡度/%		零序电压不平衡度/%	
	电厂侧	变电站侧	电厂侧	变电站侧
电厂一城西甲线	0.19	0.35	0.22	0.11
电厂一城西乙线	0.19	0.35	0.09	0.07

表 4 电厂一城西线路三相电流不平衡度计算结果

Tab. 4 The results of three-phase current unbalance of the line from power plant to Chengxi substation

线路运行条件	负序电流不平衡度/%		零序电流不平衡度/%	
	电厂侧	变电站侧	电厂侧	变电站侧
双回线路运行	甲线	0.63	0.66	0.45
	乙线	0.62	0.61	0.66
电厂一城西甲线	1.46	1.33	0.48	0.47
电厂一城西乙线	1.45	1.33	0.91	0.51

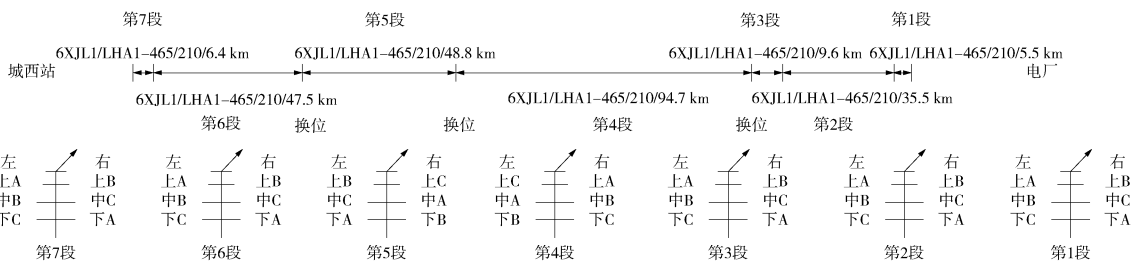


图 1 线路布置图(由电厂面向城西站看线路导线地线布置)

Fig. 1 Transmission line layout (conductor and ground arrangement from power plant to Chengxi substation)

可见, 在现有的线路相序及换位条件下, 电厂-城西线路三相电压不平衡度最高约为 0.35%, 正常运行方式及线路“ $N-1$ ”条件下, 近区电厂侧、城西站侧 500 kV 母线三相电压不平衡度最高约为 0.2%, 三相电压不平衡度均较低, 满足国家关于电能质量之三相电压允许不平衡度相关规定要求。正常运行方式及线路“ $N-1$ ”条件下, 线路三相电流负序不平衡度最高约为 1.46%、三相电流零序不平衡度最高约为 0.91%, 明显低于 5%~10% 的范围。

2.2 感应电压和感应电流

当同塔线路一回停运或接地挂检时, 由于其与运行线路之间的电容与电感耦合, 在被停运或检修的线路上将会存在感应电压, 当停运线路因检修而接地时, 在接地处将会流过一定的感应电流。

根据相关资料, 本工程建设后, 电厂-城西线路长约 248 km, 采用 $6 \times \text{JL1/LHA1}-465/210$ 导线, 全程同塔架设。本部分感应电压、感应电流计算主要针对计算水平年大方式以及将导线输送容量提升至远期较高输送容量的情形。

2.2.1 感应电压

表 5 给出了计算水平年相关线路停运不接地时, 该线路两侧感应电压的计算结果。

表 5 停运线路不接地时的最大感应相电压(有效值)

Tab. 5 The maximum induced phase voltage (RMS) of the ungrounded outage line

停运线路	最大感应相电压/kV
电厂-城西甲线	电厂侧 39.0/城西站侧 40.3
电厂-城西乙线	电厂侧 43.4/城西站侧 41.9

2.2.2 感应电流

2.2.2.1 投产年一回线路停运两侧接地时的感应电流

表 6 给出了计算水平年相关线路停运且两侧均接地时, 该线路两侧感应电流的计算结果。

表 6 停运线路两侧接地时的感应电流(有效值)

Tab. 6 The induced current (RMS) of the outage line which is grounded in both side

接地线路	计算位置	最大感应电流/A
电厂-城西甲线	电厂侧	119.2
	城西站侧	124.1
电厂-城西乙线	电厂侧	121.3
	城西站侧	130.5

2.2.2.2 远景年将共塔线路输送功率提升至允许值时的感应电流

表 7 给出了将同塔并行线路输送功率提升至约 3 640 MVA(对应电流约 4 kA), 而另一回线路停运且线路两侧接地时, 该线路两侧感应电流计算结果。

表 7 停运线路两侧接地时的最大感应电流(有效值)

Tab. 7 The maximum induced current (RMS) of the outage line which is grounded in both side

接地线路	计算位置	最大感应电流/A
电厂-城西甲线	电厂侧	238.3
	城西站侧	241.5
电厂-城西乙线	电厂侧	250.9
	城西站侧	258.2

表 8 给出了极端条件下将同塔并行线路输送功率提升至约 4 550 MVA(对应电流约 5 kA), 而另一回线路停运且线路两侧接地时, 该线路两侧感应电流计算结果。

表 8 停运线路两侧接地时的最大感应电流(有效值)

Tab. 8 The maximum induced current (RMS) of the outage line which is grounded in both side

接地线路	计算位置	最大感应电流/A
电厂-城西甲线	电厂侧	310.4
	城西站侧	310.5
电厂-城西乙线	电厂侧	320.1
	城西站侧	324.1

2.2.2.3 投产年停运线路一侧接地时的感应电流与感应电压

表 9 给出计算水平年相关线路停运且一侧接地时, 接地侧的静电耦合感应电流(主要为容性电流)与对侧感应电压计算结果。

表 9 停运线路一侧接地时的最大感应电流、电压

Tab. 9 The maximum induced current and voltage of the outage line which is grounded in one side

停运线路	接地侧位置	最大感应电流/A	对侧最大感应电压/kV
电厂-城西甲线	电厂侧	15.2	7.9
	城西站侧	9.0	8.2
电厂-城西乙线	电厂侧	10.0	8.6
	城西站侧	8.0	8.5

2.2.2.4 远景年将共塔线路输送功率提升至允许

值时

基于计算水平年近区网架接线情况,将同塔并行线路输送功率提升至约 3 640 MVA(对应电流约 4 kA),表 10 给出了线路停运且一侧接地时,接地侧的静电耦合感应电流(主要为容性电流)与对侧感应电压计算结果。

表 10 停运线路一侧接地时的最大感应电流、电压

Tab. 10 The maximum induced current and voltage of the outage line which is grounded in one side

停运线路	接地侧位置	最大感应电流/A	对侧最大感应电压/kV
电厂—城西甲线	电厂侧	9.3	14.6
	城西站侧	6.3	14.9
电厂—城西乙线	电厂侧	9.1	16.0
	城西站侧	5.9	15.9

2.2.3 关于对线路接地刀闸参数的要求

由于此次感应电压与感应电流研究是基于计算水平年大方式与远景系统潮流与等值条件进行的,根据《广东电网规划设计技术原则》,500 kV 电网允许电压波动的范围为 0% ~ 10%,因而考虑线路运行电压在本研究条件的基础上可能有接近 5% 的升幅,而感应电压随健全线路运行电压而升高,因此建议线路接地刀闸感应电压在该研究结果的基础上提高 5%;而感应电流随健全线路电流而升高,由于本文已考虑将同塔并行线路输送功率提升至约 3 640 MVA(对应电流约 4 kA)的运行工况与 4 550 MVA(对应电流约 5 kA)的极端运行工况,因此建议线路接地刀闸感应电流参考本文计算结果。

3 结论

本文重点关注了同塔双回架设线路的感应电压及感应电流问题,采用电磁暂态仿真程序 ATP-EMTP,建立了某 500 kV 电厂接入系统工程的系统元件模型,仿真计算了建成投产后电厂—城西站双回 500 kV 线路三相电压、电流的不平衡度以及线路感应电压、和感应电流的情况,结论如下:

1)在推荐线路相序及换位条件下,电厂—城西线路正常运行方式及线路“N-1”条件下,三相电压、电流不平衡度明显低于 5% ~ 10% 的范围,满足国标要求。

2)在计算水平年大方式下,新建的电厂—城西线路停运线路静电耦合感应电压、电磁耦合感应电

压、静电耦合感应电流、电磁耦合感应电流均较处于相对较低水平。通过将同塔并行双回线路中的一回线路输送功率提升至导线所长期允许的输送容量后(对应将线路输送功率提升至约 3 640 MVA、电流约 4 kA),电厂—城西线路静电耦合感应电压最高为 43.4 kV,电磁耦合感应电压最高为 16.0 kV,静电耦合感应电流(主要为容性电流)最高为 15.2 A,电磁耦合感应电流最高为 258.2 A。极端条件下,将同塔并行线路输送功率提升至约 4 550 MVA(对应电流约 5 kA),而另一回线路停运且线路两侧接地时,电磁耦合感应电流最高为 324.1 A。建议线路接地刀闸感应电压在该研究结果的基础上提高 5%,感应电流参考本文研究结果。

参考文献:

- [1] 舒印彪,赵丞华.研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J].电网技术,2002,26(4):49-51.
SHU Y B, ZHAO C H. Study and implementation of 500 kV compact power transmission line with double circuits on a same tower in china [J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 49-51.
- [2] 李汉明,陈维江,詹铭.220 kV/110 kV 同塔多回线路防雷性能研究[J].电网技术,2005,29(21):27-30.
LI H M, CHEN W J, ZHAN M. Researcher on lightning performance of quadruple circuit transmission line with dual voltage 220/110 kV on the same Tower [J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 27-30.
- [3] 孔志达,王宏斌,曾永胜.500 kV 线路进线段高绝缘对变电站雷电侵入波防护的影响[J].南方能源建设,2016,3(2):58-61+46.
KONG Zhida, WANG Hongbin, ZENG Yongsheng. High insulation influence for lightning intrusive wave protection in 500 kV substation incoming line section [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 58-61 +46.
- [4] 蔡广林,曹华珍,王晓彤.500 kV 同塔四回线路感应电压与感应电流分析[J].南方电网技术,2009(S1):141-144.
- [5] 王晓彤,林集明,陈葛松,等.广东-海南 500 kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究[J].电网技术,2008,32(12):6-11.
- [6] 商立群,施围.同杆双回输电线路的潜供电流与恢复电压[J].高电压技术,2003,29(10):22-23.
- [7] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005:167-172.
- [8] 张青立. Matlab/SPS 与 EMTP 的操作过电压仿真分析及比较[J].南方能源建设,2015,2(Supp.1):34-41+92.

(责任编辑 黄肇和)