

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.003

面向电网规划设计的电磁暂态仿真研究与应用

刘为雄¹, 曹祥麟¹, 黄庆云¹, 蔡泽祥²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

摘要: [目的]为了在特高压与超高压电网规划设计中对相关电气设备电磁暂态特性进行评判, 需要进行电磁暂态仿真专题研究。[方法]提出影响此类仿真结果的关键因素主要有电力系统潮流与短路资料、输电线路物理结构与电气参数资料、变电站主要电气设备详细电气参数资料的完整性与准确性以及仿真工具的适用性。[结果]基于权威的电磁暂态仿真软件, 提出了进行潜供电流与恢复电压、工频过电压、操作过电压以及变压器中性点加装小电抗等电磁暂态特性仿真时应遵循的主要条件与要求, 并阐明了相应的仿真结果与应用。[结论]研究成果已用于电网规划与输变电工程设计, 可满足电力系统电磁暂态仿真要求。

关键词: 电网规划设计; 电磁暂态仿真; 潜供电流与恢复电压; 工频过电压

中图分类号: TM715; TM743

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0019-07

Research and Application on Electromagnetic Transient Simulation for Power Grid Planning and Design

LIU Weixiong¹, CAO Xianglin¹, HUANG Qingyun¹, CAI Zexiang²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: [Introduction] During the planning and design of extra-high and ultra-high voltage power grid, it is necessary to specialized research on electromagnetic transient simulation in order to evaluate the electro-magnetic transient characteristics of the related electrical equipment. [Method] This paper aims to put forward the key factors affecting the results of simulation. They mainly include the applicability of the simulation software and the completeness and accuracy of power flow and short circuit data of the power system, the physical structure and the electrical parameter information of the transmission lines, the main electrical equipment details of the substation. [Result] Based on the authority of the electromagnetic transient simulation software, we proposed the main conditions and requirements should be followed and illustrated the corresponding simulation results and application during the simulation of the electromagnetic transient characteristics such as the secondary arc current and recovery voltage, the power frequency over-voltage, operation over-voltage, and the small reactance installed the neutral point of the transformer, and so on. [Conclusion] The conclusions have been used in the planning of power grid and the design of power transmission and transformation project. And it can meet the electromagnetic transient simulation requirements for the power system.

Key words: power grid planning and design; electromagnetic transient simulation; secondary arc current and recovery voltage; power frequency over-voltage

电力系统设计技术规程与输变电工程可行性研

究内容深度规定^[1-2]要求, 必要时进行设计水平年的过电压、潜供电流等计算。因此, 在 500 kV 及以上的超高压与特高压交流电网, 以及部分长线路、多回路同塔的 220 kV 及以上交流电网规划设计过程中, 有必要进行电力系统电磁暂态专题研究, 对输电线路、变电站相关设备的部分电磁暂态

收稿日期: 2018-03-29 修回日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“多馈入直流系统换相失败评估理论与柔性控制技术基础研究”(U1766213); 中国能建广东院科技项目“1 000 kV 变电站空间电磁场及电磁兼容性能研究”(EX02571W)

特性与要求进行研究、校核与评判,文献[3-5]分别进行了部分的研究与计算工作。

本文结合相关行业与企业标准^[1-2,6-8],研究超高压与特高压电网规划设计时,对输电线路的潜供电流与恢复电压水平、操作过电压水平、暂态电流水平,以及各种工频过电压水平等特性进行电磁暂态仿真的方法,以及影响此类仿真结果的关键因素。通过仿真各种故障或操作后输电线路、变电站相关设备可能出现的暂态电压和暂态电流大小、分布与变化过程,对输电线路塔头、导地线 with 高抗配置、避雷器配置、单相重合闸设置条件等形成校核,并研究提出变压器中性点小电抗等参数要求。

需要指出,有些稳态或工频特性的研究,如线路工频过电压、感应电压与感应电流仿真以及线路三相平衡与换位评估等^[9],并不一定需要借助电磁暂态仿真工具,但因要借助较为准确而全面的输电线路稳态电气参数,事实上也可借助电磁暂态仿真软件中的输电线路物理结构模型一并进行研究。本文也未涉及雷电侵入波及其仿真的专题研究^[10]。

1 影响电磁暂态仿真结果的关键因素

1.1 电力系统资料的准确性与适应性

电力系统资料是进行电磁暂态仿真的“背景”资料,主要涉及潮流计算与短路计算资料。从电网规划设计的时间跨度纵向看,应含项目投产年、规划年、远景年以及重大变更年份的电力系统资料;从模拟不同运行方式横向看,一般含常用的夏大、夏小、枯大、枯小四种典型电力系统资料。

电力系统资料的本质是要找到进行电磁暂态仿真时所关注的电网以外的等值背端系统阻抗、所关注的输电线路稳态电流与变电站各侧的稳态节点电压,原则是应充分覆盖仿真前的系统各种运行方式下的稳态电气运行参数与短路参数,以致在进行各种故障或操作时,能充分暴露出输电线路、变电站设备可能出现的暂态电压和电流大小、分布与变化过程。一般在电磁暂态模型建立完成后、进行仿真前,运行程序时其稳态潮流应与经 BPA 或其它商用软件计算所得的电力系统潮流结果相对应。

电力系统资料的准确性与适应性是进行电磁暂态仿真的基础,直接影响着仿真结果的正确性。

1.2 输电线路资料的完整性与准确性

输电线路资料主要指所关注的各线路段的线路

塔型与相序布置——通过各相导线与地线悬挂点坐标反应,沿途土壤电阻率参数,导线规格型号(铝钢结构、截面、直径)、长度、分裂间距、直流电阻,地线规格型号、OPGW 规格型号参数与接地绝缘形式等导、地线规格型号与线材结构资料。

典型的某输电线路主要资料如表 1 和图 1 所示。

表 1 电磁暂态仿真用输电线路主要资料

Tab. 1 The main data of transmission line for electromagnetic transient simulation

资料名称	资料内容示例
起止位置	J1 ~ J2
线路长度	20 km
线路回路数	双回路
导线型号	4 × JL1X/LHA1 - 660/240 铝合金芯型线铝绞线,分裂间距 500 mm,外径 36.17 mm,内径 0 mm, 20℃ 直流电阻为 0.033 4 Ω/km
地线型号	无普通地线(有普通地线时,同“导线型号”要求)
光纤参数	2 根 24 芯 OPGW 光缆,直径 16.6 mm, 20℃ 直流电阻 0.284 Ω/km
土壤电阻率	1 kΩ · m
地线运行方式	OPGW 逐塔全部接地

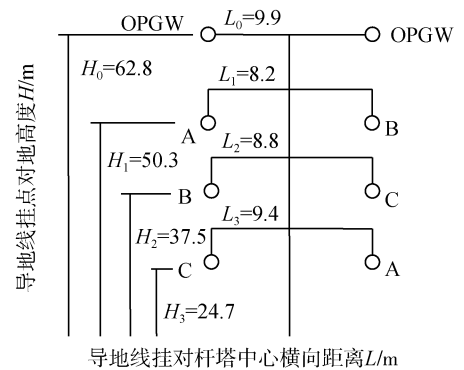


图 1 相序排列及导地线空间位置

Fig. 1 The space position of phase sequence and conductor & ground wire

这些资料用于构建输电线路物理结构模型,是形成线路集中参数与分布参数的关键性专业资料。在进行电磁暂态仿真时,可根据仿真目的不同的需要采用 PI 型线路模型,或为模拟线路参数随频率变化的特性而采用具有频率相关特性的 J. MARTI 线路模型。其完整性与准确性决定了输电线路的各种电气参数与仿真结果的正确性。

1.3 变电站资料的完整性与准确性

变电站资料除含对应于系统各种运行方式下的节点电压与各侧所接的负荷资料外,还含以变电站围墙为界的主要电气设备参数与主要电气接线资料,在进行特殊的过电压仿真时有时还需要收集导体与连接线的长度与规格型号参数^[10]。这些资料主要包括:变压器(型式、额定容量、额定电压、分接头比、结线方式、短路阻抗、电阻损耗与励磁损耗、饱和特性),断路器(有无合闸电阻、合闸电阻值、相间、主触头、电阻触头的合闸时间分散性),避雷器(额定电压、标称放电电流、最大持续运行电压、直流1 mA电压峰值、残压峰值、方波通流容量、能量吸收能力、非线性特性),高压电抗器(额定容量、额定电压、额定阻抗、饱和特性、 Q 值、中性点小电抗容量与 Q 值)等。

仿真若涉及串联电容器补偿站、限流电抗器站等还应收集齐对应设备的规格型号参数与连接方式等资料。

需要注意的是变压器、高抗与避雷器资料,由于建模时要求输入其较详细的非线性磁通、电流资料(Φ - I 特性)与电压、电流资料(V - I 特性),需要收集典型的或用于特定工程的相关资料用于电网规划与工程设计。

此外,推荐尽量使用仿真软件中已有的元件模型库之中的模型来搭建仿真模型,如各类电阻 R 、电感 L 、电容 C 、单相与三相电压源、电流源以及各种类型的线路和电缆模型等,尽管用户也可以根据需求自定义某些特殊元件。

1.4 仿真工具的适应性

AtpDraw与PSCAD是当前分别对应于底层计算引擎EMTP与EMTDC的图形化界面工具,目前被广泛应用于电力系统电磁暂态仿真研究。

EMTDC是基于EMTP发展起来的,在交流电网计算方面继承了EMTP的计算方法,两者均采用离散化伴随模型将微分方程转化为代数方程求解,是当前用来进行电力系统电磁暂态仿真研究的权威工具。相较于EMTP,EMTDC因其运用插值法进行仿真计算而更适合于直流系统仿真。

在安装相关程序后,根据版本的不同可能还须根据工程规模对母线、开关等软件中的数据维数默认设定进行修改设置,并设置以不同的仿真步长,以匹配所需仿真规模与仿真目的,否则运行软件时

将遭遇报错。

1.5 仿真应遵循的主要原则

1)关于稳态潮流。仿真前的稳态潮流应与电力系统潮流结果相对应,并应根据需研判的参数选择、调整好故障或操作前母线电压与线路电流相应较高的运行方式。如为充分暴露输电线路统计操作过电压水平时应选取稳态电压较高的运行方式进行操作仿真。

2)关于线路模型。与开关操作(含断路器与隔离开关)相关的操作过电压与暂态电流等仿真由于与频率相关,应采用具有频率相关特性的J.MARTI线路模型,以便精确模拟线路参数随频率变化的特性。其它如工频电压、电流等工频参数仿真则建议采用PI线路模型,以获得更快的计算响应。

3)关于外部等值。应区分内部仿真与外部等值的“内、外部”,做到内外有别。电网规划设计均有一定的范围,建立电磁暂态仿真模型应根据需要研究的对象,对规划设计范围内的元件及电气距离较近的相邻元件尽量建立详细模型,对外部系统——如研究对象相邻元件的下一级元件与系统则可进行等值处理。

4)关于设备特性。变压器、线路高抗与避雷器等非线性参数特性以及断路器分相操作时采用的三相合分闸的分散性等,应依据现行行业标准、设备标准及相关技术规范文件考虑。

2 潜供电流与恢复电压仿真

2.1 仿真条件与要求

当输电线路发生单相接地故障、故障相两侧断路器跳闸后,由于线路相间互感和相间电容的耦合作用,故障点仍流过一定数值的接地电流,此即潜供电流。当两回或多回线路共塔时,回路间的静电与电磁耦合可能助增潜供电流。由于潜供电流是以电弧的形式出现的,也称潜供电弧。当这个电弧短时熄灭后,同样由于相间及回路间的耦合作用,在弧道间将出现恢复电压。

架空线路采用良导体地线是减小潜供电流感性分量的有效措施^[11-13],而配置线路高抗时其配套的中性点小电抗则是减小潜供电流容性分量的最有效措施。因而,从影响输电线路潜供电流与恢复电压的主要因素看,在对其进行仿真时,应正确搭建反应所关注输电线路导地线及绝缘方式、共塔方

式、线路高抗及中性点小电抗等情况的准确模型,并模拟近区最高运行电压与最大输送电流时的电力系统运行方式与故障,以充分暴露出输电线路可能出现的最大潜供电流与恢复电压结果。

2.2 仿真结果及应用

潜供电流大电弧难熄灭,恢复电压高(在导体对线路横担距离一定的条件下表现为恢复电压梯度大)电弧可能重燃。潜供电流与恢复电压增加了故障点自动熄弧的困难,可能导致单相自动重合闸失败,从而影响到供电安全与系统稳定。为了保证自动重合闸能够成功,重合闸的整定时间必须大于潜供电流熄灭所用的时间加上弧道介质恢复绝缘的时间。

潜供电流的熄灭时间与潜供电流与恢复电压的大小、风速、风向等气候条件有关,文献[11]通过实验统计得出各种条件下潜供电流与概率为90%的自灭时间之间的关系,工程上可据此评判线路重合闸的整定时间取值范围。

3 工频过电压仿真

3.1 仿真条件与要求

当输电线路空载合闸、甩负荷以及在输电线路一侧单相或两相接地故障而靠近故障点断路器三相跳闸甩负荷时,由于发电机惯性、线路电容与不对称故障及其故障切除的影响,输电线路末端将出现较高的工频过电压。

工频过电压与系统的运行方式有关,系统容量大的运行方式下工频过电压相对较小。在对其进行仿真时,除应正确搭建反应输电线路导地线及绝缘方式、共塔方式、线路高抗及中性点小电抗等的准确模型外,还应注意由于线路电容的法兰梯效应、甩负荷以及故障发生与切除过程等都将提升工频过电压水平,因而仿真时应考虑上述情况的叠加影响,工程上应取正常送电状态下三相甩负荷和在线路一侧有单相接地故障时靠近故障点断路器三相跳闸甩负荷作为确定电网工频过电压的严苛仿真条件。并模拟近区最高运行电压时的电力系统运行方式下空载合闸,与最大输送电流时的电力系统运行方式下故障与甩负荷,以充分暴露出输电线路可能出现的工频过电压结果。

3.2 仿真结果及应用

根据电力行业标准之规定^[6],系统工频过电压

水平变电站侧不宜超过 1.30 p.u.,线路侧不宜超过 1.40 p.u.(以 500 kV 为例时,1.0 p.u. = 550/√3 kV)。若出现如输电线路送、受端分闸时间相差仅毫秒级的工频过电压超标,金属氧化物避雷器可以依赖,而不必配置高抗等昂贵设备来限制此类过电压。

此外,在线路不配置高抗的情况下,一般不会出现工频谐振过电压。但若线路基于稳态无功与电压分布而考虑配置高抗时,可能存在线路高抗与线路电容引起的谐振过电压,这也属于工频过电压的研究范围。此项仿真时应重点关注是否出现电压越限与拍频的情况。

4 操作过电压仿真与避雷器能耗校核

4.1 仿真条件与要求

操作过电压的操作主要指断路器操作合空载变压器、合空载输电线路以及输电线路单相重合闸等,操作过电压与频率相关,因而仿真应考虑如下计算条件与要求:

1)为充分暴露操作过电压的峰值,在仿真操作前,应取母线电压较高的运行方式。

2)为了精确模拟线路参数随频率变化的特性,本仿真应采用具有频率相关特性的 J. MARTI 线路模型。

3)断路器分相操作中应考虑三相合闸的分散性与随机性,操作次数建议要达到不少于 200 次的量级以充分暴露统计操作过电压水平。

4)单相重合闸操作时,既考虑线路一侧单相重合而对侧重合失败也要考虑两侧均进行单相重合时的情形。

5)为暴露线路各处的统计操作过电压水平,仿真时应结合换位塔的位置等对线路进行适当的多分段建模处理。

此外,变压器、线路高抗与避雷器等非线性参数特性以及断路器分相操作时采用的三相合分闸的分散性等,应依据现行工业标准、设备标准及相关技术规范文件考虑。

4.2 操作过电压相关标准及对 MOA 的主要威胁

输电线路杆塔由于相间距离很大,操作断路器时一般相间过电压不会对其相间绝缘带来问题,但对变电站母线侧和线路侧的相间绝缘可能产生影响。根据电力行业标准的规定^[6],要求线路相对地

统计操作过电压(出现概率不超过2%的操作过电压)不宜超过2.0 p.u.(以500 kV为例时,1.0 p.u. = 550 kV $\times \sqrt{2}/\sqrt{3}$,本节内下同)。同时,对变电站配电装置有允许最大相间操作过电压要求,如在低海拔地区的500 kV屋外变电站限值为3.45 p.u.。

当输电线路断路器不装设合闸电阻、仅由线路两侧金属氧化物避雷器(MOA)限制操作过电压时,将对MOA的能耗与电流形成威胁,因而在工程设计阶段有必要根据现行MOA工业标准,对其在操作过电压下的能耗与电流进行比对核算。

4.3 仿真结果及应用

表2列出了考虑合空载线路、单相重合闸操作后南方电网某500 kV线路两侧断路器均未装设合闸电阻时最高相对地概率不超过2%的统计操作过电压的计算结果。

表2 某线路统计操作过电压结果

Tab. 2 The Statistic results of the operation over-voltage of some transmission line

线路距起点总长度/ km	分段线路长度/ km	操作过电压倍数/ p. u.
0	0	1.43
20	20	1.64
40	20	1.80
50	10	1.80
73	23	1.85
83	10	1.80
98	15	1.69

注:限于篇幅,以上仅列出从线路一侧合空载线路时操作过电压倍数出现概率不超过2%的统计结果。

表中数据表明,当线路断路器不装设合闸电阻、仅由线路两侧避雷器限制操作过电压时,其沿线分布基本上呈末端高、首端低的趋势,最大值出现线路中部至靠近末端的地方。这也是操作过电压沿线分布的基本规律。

上述仿真数据由于合空载线路最高相对地2%统计操作过电压为1.85 p.u.(该工程的输电线路单相重合闸最高相对地2%统计操作过电压仿真结果为1.80 p.u.),操作过电压均在电力行业标准允许的范围内,可不另采取抑制措施。否则,可考虑采取在线路合适位置加设避雷器或在断路器加装合闸电阻的方式直接进行抑制^[14-15]。

此外,仿真时还应对变电站内母线侧和线路侧的相间操作过电压进行校核,以满足相间小于3.45

p.u.的要求。

图2与图3示出了某工程实例中线路断路器操作时避雷器的能耗与电流波形,其最大能耗 E 约为150 kJ、峰值电流 I 约为800 A,而该工程拟采用的避雷器能量吸收能力为6.66 MJ(15 kJ/kV)、2 ms方波通流容量为2 kA,通过对比,反映MOA在操作线路断路器时的工况,校核其在操作时是安全的。

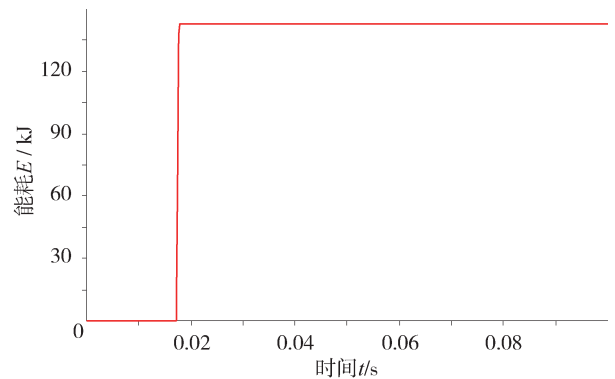


图2 断路器操作时避雷器的能耗波形

Fig. 2 The energy curve of MOV

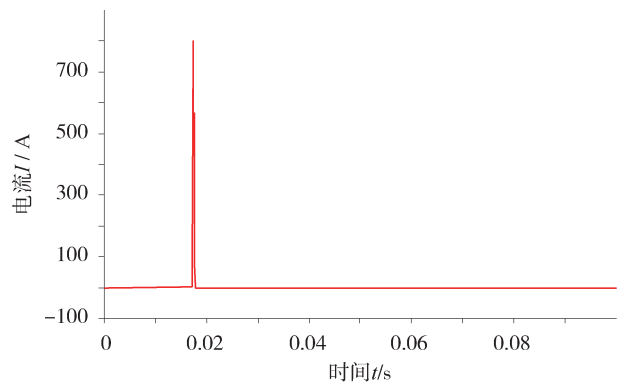


图3 断路器操作时避雷器的电流波形

Fig. 3 The current curve of MOV

5 主变中性点加装小电抗仿真

5.1 主变中性点加装小电抗的背景

近些年,在广东珠三角等负荷密度较高地区变电站布点密集,由于500 kV/220 kV自耦变压器的大量使用以及变压器中性点接地,造成某些区域的220 kV单相短路电流水平直逼甚至超过三相短路电流水平,部分500 kV变电站220 kV母线单相短路电流已超过开关遮断容量。

根据电力行业标准相关规定,500 kV变压器中性点只能直接接地或经小电抗接地。为限制220 kV

母线的单相短路电流、增强变电站短路电流水平对电网建设与运行的适应性,有必要在部分 500 kV 变电站主变中性点加装小电抗。

从主要降低 220 kV 母线单相短路电流效果与经济效益综合考虑,南方电网采用了在部分 500 kV 变电站的所有主变中性点加装 10 Ω 、15 Ω 、20 Ω 等小电抗的统筹考虑方案。

5.2 仿真条件与要求

稳态部分要求对主变中性点小电抗的工频电压与电流进行仿真,并与该主变中性点绝缘水平(一分钟工频耐压值)进行对比校核,以核定小电抗的热稳定电流等参数。要求对主变 220 kV 侧单相接地故障时的健全相工频电压与电流进行仿真,并与 220 kV 侧绝缘水平(1.3 p. u.)进行对比校核。

暂态部分要求对主变 220 kV 侧单相接地故障、主变 500 kV 母线单相接地故障、合空载变压器、合空载出线以及线路单相重合闸等操作时的主变中性点(实际上就是小电抗上)操作过电压与暂态电流进行仿真,取得最高统计操作过电压与对应的暂态电流结果,以核定小电抗的动稳定电流等参数。

稳态部分仿真的条件与要求参上文第 3 节,暂态部分仿真的条件与要求参上文第 4 节,不再赘述。

6 结论

在超高压与特高压电网规划设计过程中,需要对输电线路、变电站相关设备的电磁暂态特性进行专题仿真研究。本文提出了影响电磁暂态仿真结果的关键因素主要有电力系统资料、输电线路资料、变电站资料的完整性、准确性及适应性与仿真工具的权威性及适用性,阐明了保障仿真结果正确性的方法与仿真应遵循的主要原则。

利用专业的电磁暂态仿真软件—EMTP 或 EMTDC,按照本文仿真条件与要求,对潜供电流与恢复电压、工频过电压、操作过电压以及变压器中性点加装小电抗等电磁暂态特性进行仿真。对照现行工业标准、设备标准、实验标准,依照本文仿真结果与应用,校核输电线路与变电站相关绝缘配置与技术参数要求,可满足电网规划设计相关的电磁暂态仿真要求。

参考文献:

[1] 电力规划设计总院. 电力系统设计技术规程: DL/T 5429—

2009 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

China Electrical Planning & Design Institute Co., Ltd. Technical code of design for the electric power system: DL/T 5429—2009 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[2] 国家电网公司. 输变电工程可行性研究内容深度规定: DL/T 5448—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

State Grid Corporation of China. Regulation for content and depth of feasibility study of transmission and substation: DL/T 5448—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

[3] 曹祥麟. EMTP 在特高压交流输电研究中的应用 [J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 64-68.

CAO X L. Application of EMTP in the research of UHV AC power transmission [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 64-68.

[4] 单蒙, 刘为雄. 基于 EMTP 的高压输电工程电磁暂态研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 57-60.

SHAN M, LIU W X. Research on electromagnetic transient of HV power transmission project based on EMTP [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 57-60.

[5] 姚斌, 施世鸿, 陈荔. ± 1100 kV 特高压直流换流站直流场导体的电磁计算与设计选型 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 37-41.

YAO B, SHI S H, CHEN L. Electromagnetic environment calculation and design of ± 1100 kV DC conductor in UHVDC converter station [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 37-41.

[6] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB 50064—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

China Electricity Council. Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB 50064—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[7] 中国电力企业联合会. 交流无间隙金属氧化物避雷器: GB 11032—2000 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2000.

China Electricity Council. Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems: GB 11032—2000 [S]. Beijing: China Planning Press, 2000.

[8] 中国电力企业联合会. 110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010 [S]. 北京: 人民出版社, 2010.

China Electricity Council. Code for design of 110 kV ~ 750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010 [S]. Beijing: People's Publishing House, 2010.

[9] 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, 3(增刊 1): 141-144.

CAI G L, CAO H Z, WANG X T. The analysis of induced voltage and induced current for 500 kV parallel-four-circuit transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(Supp. 1): 141-144.

- [10] 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 Z D, WANG H B, ZENG Y S. 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.
- [11] 和彦森, 宋泉, 曹荣江, 等. 1 000 kV 特高压输电线路潜供电弧试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 138-143.
HE Y M, SONG G, CAO R J, et al. Test research of secondary arc in 1 000 kV UHV double-circuit transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 138-143.
- [12] 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+31.
SHANG L Q, SHI W. Study on secondary arc current and recovery voltage on double-circuit lines on the same pole [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 22-23+31.
- [13] 商立群, 施围. 超高压同杆双回输电线路中熄灭潜供电弧的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 60-63+72.
SHANG L Q, SHI W. Study of the secondary arc extinction at ehv double circuit transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 60-63+72.
- [14] 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(增刊1): 34-41+92.
ZHANG Q L. Switching overvoltage simulation analysis and comparison between Matlab/SPS and EMTP [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp.1): 34-41+92.
- [15] 马欢, 魏磊, 郭洁, 等. 750 kV 系统线路侧断路器取消合闸电阻可行性研究 [J]. 高压电器, 2016, 52(1): 0136-0141.

MA H, WEI L, GUO J, et al. Study on the feasibility of cancelling the circuit-breaker pre-inset resistor at 750 kV overhead transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 0136-0141.

作者简介:



LIU W X

刘为雄(通信作者)

1969-, 男, 湖北汉川人, 高级工程师、副教授, 电力系统及其自动化专业博士, 主要从事电力系统规划设计与研究(e-mail) liuweixiong@gedi.com.cn。

曹祥麟

1943-, 男, 四川成都人, 高级工程师, 电力系统及其自动化专业学士, 主要从事电力系统规划设计及暂态仿真计算研究(e-mail) xianglincao@126.com。

黄庆云

1969-, 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 电力系统及其自动化专业硕士, 主要从事电力系统规划设计(e-mail) huanqingyun@gedi.com.cn。

蔡泽祥

1960-, 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 电力系统及其自动化专业博士, 主要从事电力系统运行与控制、能源互联网规划与运行等方向的教学与研究(e-mail) epzxcai@scut.edu.cn。

(责任编辑 郑文棠)

国内首个海上风电总承包项目海上主体工程建设全面开启

2018年7月3日, 由中国能建广东院总承包建设的粤电湛江外罗海上风电项目首根单桩成功插打, 标志着外罗项目海上主体工程建设正式全面开启, 也标志着广东省海上风电建设正式开始进入海上规模实施阶段。

外罗项目是广东海域首次使用单桩基础的风场, 相对于其它型式的风机基础, 单桩具有技术可靠、施工效率高等特点。项目位于台风高发区, 海洋作业环境恶劣, 而海上风机基础施工精度要求极高, 单桩垂直度偏差不得超过3‰。施工完成后, 单桩桩顶高程为11.026 m, 垂直度误差率控制在0.49‰, 满足设计要求。

(郑文棠)