

CFETR 110 kV 电缆接地方案研究

李朋^{1,✉}, 王禹晨^{2,3}, 江加福³, 黄懿赞^{2,3}

(1. 广东技术师范大学自动化学院, 广东 广州 510665; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: [目的] 中国聚变工程实验堆 (CFETR) 旨在论证稳态燃烧等离子体的工程可行性。站内 110 kV 高压供电系统通过电缆等设备为超导磁体电源和无功补偿系统供电, 因此高压电缆的稳定工作对实验的开展至关重要。[方法] 电缆正常运行需要考虑金属护层感应电势和环流, 在对金属护层接地方式充分调研计算后, 确定站内 110 kV 高压 XLPE 电缆交叉互联接地。利用 ANSYS Maxwell 软件对三相电缆进行建模, 仿真护层感应电压; 最后将仿真结果代入 Simplorer 所构建的等效电路。[结果] 其仿真结果显示护层感应电势和环流满足国家标准要求。[结论] 为 110 kV 电缆护层设计的交叉互联接地方案安全可靠, 能够确保电缆长期稳定工作。

关键词: 中国聚变工程实验堆 (CFETR); 110 kV 高压电缆; 交叉互联接地; 护层感应电势; Maxwell; Simplorer

中图分类号: TL4; TM757

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0039-06

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



Research on CFETR 110 kV Cable Grounding Scheme

LI Peng^{1,✉}, WANG Yuchen^{2,3}, JIANG Jiafu³, HUANG Yiyun^{2,3}

(1. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, Guangdong, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

3. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] China Fusion Engineering Experimental Reactor (CFETR) aims to demonstrate the engineering feasibility of steady-state combustion plasma. The 110 kV high-voltage power supply and distribution system supplies the superconducting magnet and the reactive power system through cables and other equipment. Therefore, the stable work of the high-voltage cable is very important to the development of the experiment. [Method] The normal operation of the cable needs to consider the induced potential and circulating current of the metal sheath. In this paper, after fully investigating and calculating the metal sheathing method, it was determined that the 110 kV high-voltage XLPE cable was cross-connected and grounded. Use ANSYS Maxwell to model the three-phase cable, simulate the sheath induced voltage, and finally substitute the simulation results into the equivalent circuit constructed by Simplorer. [Result] The simulation results show that the induced electric potential and circulating current of the sheath meet the requirements of national standards. [Conclusion] The cross interconnection grounding scheme designed in this paper for the 110 kV cable sheath is safe and reliable, which can ensure the long-term stable operation of the cable.

Key words: CFETR; 110 kV high voltage cable; cross-connect grounding; induced potential; Maxwell; Simplorer

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

中国聚变工程实验堆(CFETR)是中国自主设计
和研制并联合国际合作的重大科学工程,是中国在

全面消化吸收国际热核聚变实验堆(ITER)相关技术
的基础上,预先开展下一代超导聚变堆研究的重大

收稿日期: 2021-10-27 修回日期: 2022-01-11

基金项目: 国家重点研发计划资助“CFETR 装置辅助系统设计”(2017YFE0300504)

项目,供配电系统是其重要组成部分。

按照供配电系统设计规范和 CFETR 实验项目性质,结合所在地周边 500 kV 电站情况,定义了 CFETR 供配电系统结构,包括一座 220 kV 变电站,根据供电负荷的要求,配电系统包括 110 kV、20 kV 和 10 kV 等级。其中 110 kV 供配电系统供电给脉冲功率负荷,即超导磁体电源和无功补偿系统。110 kV 供配电系统结构示意图如图 1 所示。其中负载电缆根据电压等级选用 110 kV 截面为 240 mm² 高压单芯 XLPE(交联聚乙烯)绝缘电缆^[1-2]。

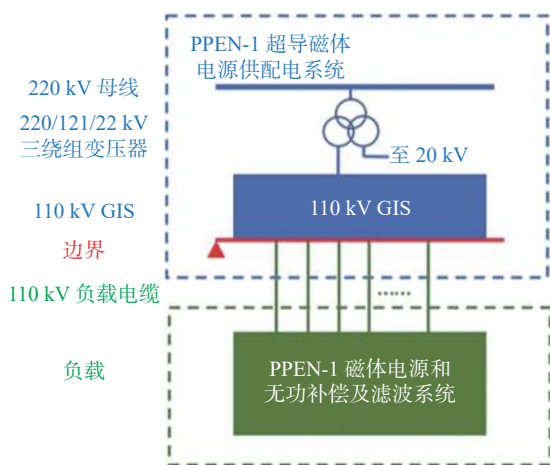


图 1 110 kV 供配电系统结构示意图

Fig. 1 110 kV power supply and distribution system structure diagram

本文通过对几种接地方式下电缆护层感应电压和环流的计算,依据《电力工程电缆设计标准》,确定护层接地方式及安装敷设过程中所要注意的事项。使金属护层中的感应电势和环流在安全限值以下,保障供配电系统稳定运行。

1 高压 XLPE 电缆基本结构

电力电缆的主要结构件为线芯、绝缘层和外护层如图 2 所示。电力电缆的种类很多,中低压电缆(一般指 35 kV 及以下):粘性浸渍纸绝缘电缆、不滴流电缆、聚氯乙烯绝缘电缆、交联聚乙烯电缆、乙丙橡皮绝缘电缆等;高压电缆(一般为 110 kV 及以上):自容式充油电缆、钢管充油电缆、聚乙烯(PE)电缆和交联聚乙烯(XLPE)电缆等。

考虑到 110 kV 电压等级,选用高压电缆;同时由于经济效益,干式电缆基本上已经取代了充油电

缆。对于聚乙烯电缆和交联聚乙烯电缆,交联聚乙烯是提高聚乙烯的一种重要技术,不仅在力学性能、耐环境应力开裂性能、耐化学药品腐蚀性能等方面有显著提升,而且非常明显地提高了耐温等级,大大拓宽了电缆的应用范围。因此我们最终选择 XLPE 高压电缆。

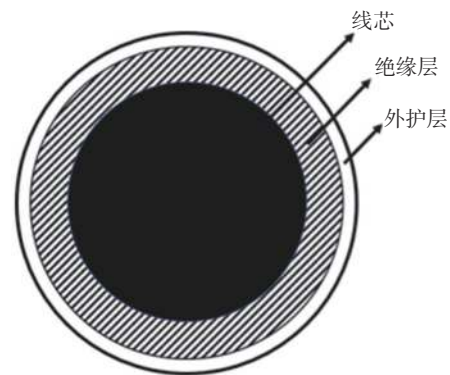


图 2 电缆结构示意图

Fig. 2 Cable structure diagram

2 高压 XLPE 电缆接地设计

2.1 电力电缆接地方式

高压电缆多为单芯电缆,电缆线芯和金属护层的关系可以看作变压器的一组绕组,线芯通过交流电流时产生磁力线交链金属护层产生感应电势。感应电势不加以限制会达到较大值从而威胁人身安全。保障电缆安全稳定运行的措施之一是电缆接地系统设计,高压 XLPE 电缆接地方式^[3-5]:

1) 金属护层两端接地

金属护层在两个终端位置直接接地,两端接地后不需装设保护器,适用于较短电缆线路,护层中感应电势较小,因此不会产生较大环流。

2) 金属护层一端接地

电缆线路较短时(500 m 以内),常采用一端直接接地,另一端通过保护器接地。当与架空线路连接时,连接的一端直接接地,另一端装设保护器。

3) 金属护层交叉互连接地

电缆线路很长,将线路分成三个等长小段,相互用绝缘接头相连,护层三相之间用同轴电缆经接线盒完成换位连接,护层保护器装设在换位箱内。电缆两个终端金属护层分别互联并接地。此接地方式常用于较长电缆线路,能有效减少金属护层感应电压及环流,交叉互连接地结构示意图如图 3 所示。

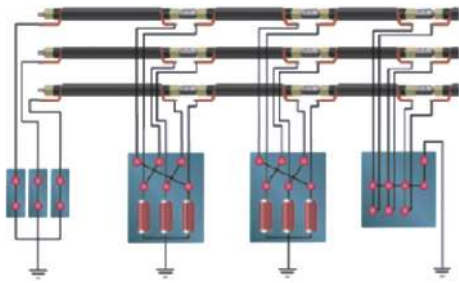


图3 金属护层交叉互互联接地

Fig. 3 Metal sheath cross interconnection grounding

2.2 金属护层感应电势及电流

《电力工程电缆设计标准》4.1.9 规定: 交流单芯电力电缆金属套上应至少在一端直接接地, 在任意非直接接地端的正常感应电势, 未采取安全措施时最大值不得大于 50 V。交流系统中单芯电缆各相按通常布置排列情况下, 电缆金属套上任意一点非直接接地处的正常感应电势值按下式计算^[6-7]:

$$E_s = LE_{s0} \quad (1)$$

式中:

E_s ——感应电势(V);

L ——电缆金属套的电气通路上任一部位与其直接接地处的距离(km);

E_{s0} ——单位长度的正常感应电势(V/km)。

E_{s0} 的计算与电缆的敷设方式有关, 三相电缆的排列敷设方式主要有等边三角形排列、水平排列、直角三角形排列, 为保证三相电缆金属套感应电势平衡, 采用等边三角形排列方式敷设, 排列方式如图 4 所示。

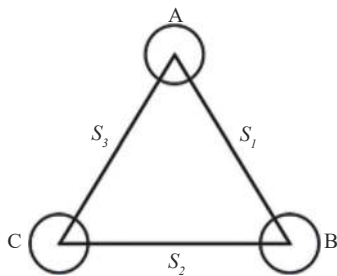


图4 电缆等边三角形排列

Fig. 4 Equilateral triangle arrangement of cables

这时三相电缆相互间距相同, 单位长度正常感应电势相同可用下式计算:

$$E_{s0} = IX_s \quad (2)$$

$$X_s = \left(2\omega \ln \frac{S}{r}\right) \times 10^{-4} \quad (3)$$

式中:

ω —— $2\pi f$, f 为工作频率;

r ——电缆金属护层的平均半径(m);

I ——电缆导体正常工作电流(A);

S ——各相电缆相邻之间中心距(m)。

本文所设计对象为 110 kV 单芯 XLPE 电缆, 选用 YJLW02 交联聚乙烯皱纹铝包 240 mm² 电缆, 线芯半径 8.74 mm, 绝缘层依据电压等级确定为 19 mm, 金属护层铝包厚度为 2 mm, 金属护层的平均半径 r 约为 28.74 mm, 电缆工作电流约为 500 A, 工作频率为 50 Hz, 各相电缆相邻之间中心距 S 一般为 250 mm, 电缆长度为按现场施工情况保守估计为 1 000 m, 代入上式(1)、(2)、(3)得到电缆金属护层的感应电压为 67.9 V。

CEETR 站点接地配置为共用地网, 变电站地网与 CFETR 站点接地网相连, 变电站接地电阻经设计约为 0.2 Ω , 金属护层环流可达到 340 A, 若电缆采取金属护层两端直接接地, 如此大接地环流足可以导致危险事故发生; 若采用金属护层一端接地, 未直接接地端感应电势超过 50 V, 不符合《电力工程电缆设计标准》; 电缆金属护层交叉互互联接地时, 将线路分为长度基本相等的 3 段或 3 的整数倍段, 三相电缆等边三角形排列, 电缆线芯中流过的电流相等, 因此在金属护层中的感应电势幅值相等相位相差 120°, 消除接地感应环流。

2.3 金属护层交叉互互联接地方案

长距离敷设 110 kV XLPE 高压电缆必须将电缆回路分为长度相等的三段或三的整数倍段。但分段后电缆交叉互互联接线易出现接点隐性失误, 导致换位不完全且不易及时发现, 本章分析交叉互互联正确接线方式及注意事项, 排除电缆运行中的故障。CFETR 高压供配电 110 kV 电缆金属护层交叉接地等效接线如图 5 所示^[8-10]。

由图 5 可知, #1、#2 绝缘接头分别通过同轴电缆和换位箱实现金属护层换位作用。A 相金属护层感应电流从 A_0 点经 A 相护层至 A_1 点, 再经 A 相 #1 接头同轴电缆内导体和换位箱换位箱至 C_2 点, 再经 C 相第 2 段电缆的护套至 C_3 点, 经 C 相 #2 绝缘接头的同轴电缆内导体和换位箱至 B_4 点, 再经 B 相第 3

段电缆的护层至 B_5 入地从而完成护套换位。在理想情况下,3 相电缆 3 段电缆长度相等,护层经换位后合电势为 0。

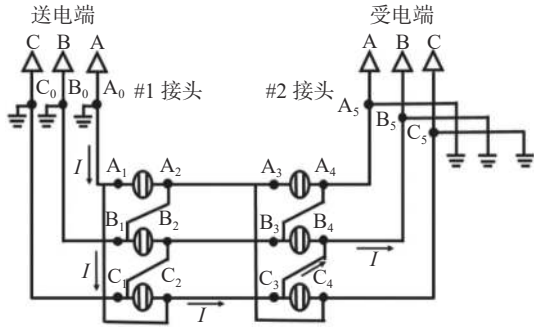


图 5 金属护层交叉互联接地等效接线图

Fig. 5 Equivalent wiring diagram of metal sheath cross interconnection grounding

受施工条件的影响,CFETR 电缆线路无法实现理想的三段等长。将电缆进行分段互联时,将第一段和第三段电缆长度确定为 330 m,中间第二段电缆长度偏长。由于三相电缆分段不完全相等,护层感应电压换位后会产生一定感应电压,下面计算感应电压及电流的大小。

3 交叉互联接地计算与仿真

3.1 等值电路建立

确定电缆接地方案后,对 1 km 的电缆进行分段,实际安装敷设过程无法满足三段电缆完全等长,将第一、三段电缆长度确定为 330 m,中间第二段电缆长度略长于一、三段电缆。接下来计算接地电流,建立金属护层交叉互联接地等值电路。将实际中的分布式参数简化为集总参数,构建与实际系统等效的等值电路如图 6 所示^[11-13]。

图 6 中:

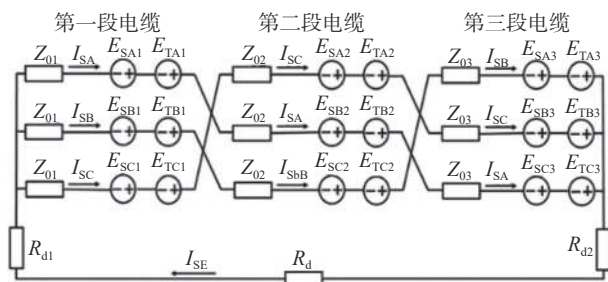


图 6 金属护层交叉互联等值电路

Fig. 6 Metal sheath cross interconnection equivalent circuit

R_{d1} 、 R_{d2} ——护层首末端接地引线电阻测量值,由于电阻值微小,可忽略不计;

R_d ——接地网等效电阻;

Z_{01} 、 Z_{02} 、 Z_{03} ——三段电缆护层自阻抗;

I_{SA} 、 I_{SB} 、 I_{SC} ——三相金属护层接地电流;

I_{SE} ——大地漏电流;

E_{SAi} 、 E_{Sbi} 、 E_{Sci} ——每段电缆中线芯中电流引起的感应电压;

E_{TAi} 、 E_{Tbi} 、 E_{TCi} ——每段护层中接地电流和大地电流引起感应电压,由于电缆护层电流和大地电流相对线芯电流要小很多,这部分感应电压在计算时可以忽略。

对于护层首末端接地电阻测量值,由于项目仍未正式施工无法测量,按照站点共用设计估计为 $R_d=0.2 \Omega$ 。对以上电缆分布参数的确定,计算种类众多,但其准确性及是否适用本系统接地设计无法保证。我们利用电磁分析软件对高压电缆建立模型,准确计算电缆阻抗及感应电压等分布参数,最后代入等值电路计算,为解决现实问题提供精确的数据。

3.2 ANSYS 有限元仿真

本文主要使用 ANSYS 软件中的 Maxwell 模块建模并进行电磁仿真。Ansoft Maxwell 是一种工业应用的电磁分析软件,它采用向导式操作界面、自适应剖分技术并且具有强大的后处理器,是一款高性能电磁设计软件。通过软件仿真可以给出三相电缆各类分布参数。电缆三维模型如图 7 所示。

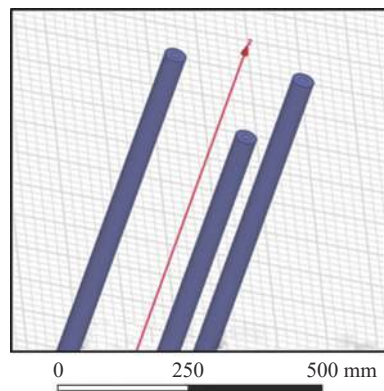


图 7 电缆 3D 模型

Fig. 7 Metal sheath cross interconnection equivalent circuit

首先三段电缆护层的自阻抗进行计算,由于电缆每段长度达几百米,无法直接用软件建模,因此先

在涡流场环境下对三相电缆进行自适应网格划分, 三相电缆剖分图如图8所示, 得到每米长电缆的阻抗和感应电压。仿真结果见表1。

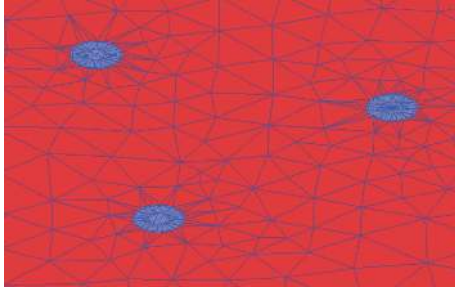


图8 三相电缆剖分图

Fig. 8 Three-phase cable dissection diagram

表1 Maxwell 仿真结果

Tab. 1 Maxwell simulation results

参数	电阻/ $(\mu\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	电感/ $(\mu\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	感应电压/ $(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$
仿真结果	105.91	0.76	0.067

第一、三段电缆长度为330 m, 可得到电缆电阻为 0.0349Ω , 电感为 0.6 mH , 感应电压为 22.11 V ; 第二段电缆电阻为 0.036Ω , 电感为 0.618 mH , 感应电压为 22.78 V 。将以上分布参数代入等值电路, 利用Simplorer软件建立电路模型进行接地电流的计算, 电路模型如图9所示, 得到单相接地电流为 2 A , 金属护层感应电压为 0.4 V , 符合《电力工程电缆设计标准》。

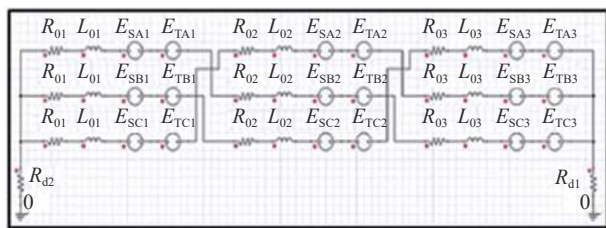


图9 仿真电路图

Fig. 9 Simulation circuit diagram

4 结论

本文结合CFETR 110 kV 供配电系统结构, 调研高压电缆的种类及特性, 选用110 kV 单芯XLPE 高压电缆作为负载电缆。后通过对电缆金属护层不同接地方式下感应电势及电流的计算, 确定电缆金属护层交叉互联接地。

电缆敷设过程中受到环境地形等条件限制, 无法实现电缆分段完全等长和对称排列, 会存在少量不平衡感应电流流过金属护层。为计算实际工程中金属护层交叉互联接地方式下的接地电流, 先建立交叉互联等值电路, 利用Maxwell软件模拟计算分布参数, 后将分布参数代入Simplorer软件求解护层感应电压及接地电流, 由上仿真结果可知, 电缆金属护层交叉互联接地方案有效降低护层感应电压和接地电流, 符合《电力工程电缆设计规范》, 保证电缆长期稳定工作, 可按此方案将CFETR 110 kV 电缆金属护层接地。

参考文献:

- [1] 张全胜, 王和亮, 周作春. 110 kV XLPE电缆金属护套交叉互联接地探讨 [J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2005.11.026.
ZHANG Q S, WANG H L, ZHOU Z C. Study on cross connection grounding of metallic sheath of 110 kV XLPE power cable [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2005.11.026.
- [2] 邵伍周. XLPE电力电缆接地感应环流分析及在线监测方案设计 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007. DOI: 10.7666/d.Y1189126.
SHAO W Z. Analysis and online monitoring approach design of grounding induced circulating current of XLPE power cable [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007. DOI: 10.7666/d.Y1189126.d.Y1189126.
- [3] 任保忠, 王军德, 焦文明, 等. 单芯高压电力电缆接地方式研究 [J]. 山东电力技术, 2013(3): 42-44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2013.03.012.
REN B Z, WANG J D, JIAO W M, et al. Study on the grounding modes of single core high voltage power cable [J]. Shandong Electric Power, 2013(3): 42-44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2013.03.012.
- [4] 王立. 运行交联聚乙烯电缆绝缘状态及接地系统的监测与评价 [D]. 天津: 天津大学, 2013. DOI: 10.7666/d.D439875.
WANG L. Monitoring and evaluation on insulation condition and grounding system of operating XLPE cable [D]. Tianjin: University, 2013. DOI: 10.7666/d.D439875.
- [5] 张锴. 高压交联聚乙烯电缆接地电流机理与故障分析 [D]. 天津: 天津大学, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2242051.
ZHANG K. Mechanism of grounding current and fault analysis of high voltage XLPE cables [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2242051.
- [6] 欧景茹, 祁树文, 杨世春, 等. 高压单芯电缆线路金属护套接地方式 [J]. 吉林电力, 2005(2): 19-21+25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2005.02.008.

- OU J R, QI S W, YANG S C, et al. Grounding- protection means for metal jacket on high-voltage and single-core cable line [J]. *Jilin Electric Power*, 2005(2): 19-21+25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2005.02.008.
- [7] 张林利, 曹丽丽, 李立生, 等. 不接地系统单相断线故障分析及区段定位 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 1-7. DOI: 10.7667/PSPC171178.
- ZHANG L L, CAO L L, LI L S, et al. Analysis and fault section location of single-phase open fault for ungrounding system [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 1-7. DOI: 10.7667/PSPC171178.
- [8] 李建南, 张慧媛, 王鲜花, 等. 中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 105-109. DOI: 10.7667/PSPC152207.
- LI J N, ZHANG H Y, WANG X H, et al. Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 105-109. DOI: 10.7667/PSPC152207.
- [9] 谢宝星. 高压单芯电缆接地回流线的功能和应用 [J]. *水电站机电技术*, 2006, 29(1): 22-23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5387.2006.01.007.
- XIE B X. Function and application of backflow line of high voltage single-core cable [J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2006, 29(1): 22-23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5387.2006.01.007.
- [10] 田二胜, 汪兴宁, 史志鸿, 等. 新型电缆地线断线监测保护装置的研制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(1): 134-138.
- TIAN E S, WANG X N, SHI Z H, et al. Development of new cable ground wire breaking monitoring protection equipment [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(1): 134-138.
- [11] 徐欣, 陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一—感应电流的计算和预控 [J]. *电线电缆*, 2010(5): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2010.05.014.
- XU X, CHEN Y. Investigation of the induced current in the metallic sheath of single core HV power cables, part 1 [J]. *Electric Wire & Cable*, 2010(5): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6901.2010.05.014.
- [12] 王伟, 王永亮, 刘冲, 等. 110 kV三相交叉互联电缆的频变模型及局放仿真分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(1): 117-122. DOI: CNKI: SUN: ZGDC.0.2011-01-019.
- WANG W, WANG Y L, LIU C, et al. Partial discharge simulation analysis and frequency-dependent model for 110 kV three-phase cross-bonded cable [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(1): 117-122. DOI: CNKI: SUN: ZGDC.0.2011-01-019.
- [13] 黄宏伟. 电力工程电缆设计规范 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- HUANG H W. Standard for design of cables of electric power engineering [M]. Beijing: China Planning Press, 2014.

作者简介:



李朋

李朋 (第一作者, 通信作者)

1984-, 男, 山西运城人, 博士, 讲师, 主要从事聚变工程接地防雷技术方面的研究工作 (e-mail)349893672@qq.com。

王禹晨

1994-, 男, 安徽合肥人, 博士研究生在读, 主要从事聚变工程接地防雷技术方面的研究工作 (e-mail)yuchen.wang@ipp.ac.cn。

江加福

1976-, 男, 安徽桐城人, 博士, 副研究员, 研究方向为聚变工程接地防雷系统设计 (e-mail)jiafujiang@ipp.ac.cn。

黄懿赞

1974-, 男, 浙江宁波人, 博士, 研究员, 主要从事聚变工程辅助加热电源技术方面的研究工作 (e-mail)yyhuang@ipp.ac.cn。

项目简介:

项目名称 中国聚变工程实验堆集成工程设计研究

承担单位 中国科学技术大学

项目概述 中国聚变工程实验堆 (China Fusion Engineering Testing Reactor, CFETR) 是在吸收消化 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 设计基础上, 并借鉴 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 及我国多年托卡马克聚变装置主机设计经验设计的超导托卡马克装置, 旨在充分弥补 ITER 与 DEMO 之间的差距。核聚变装置的高效运行与其供电网络的可靠性及稳定性密切相关, 本项目旨在完成 CFETR 装置电源系统拓扑方案设计, 以及电源稳态、动态以及故障态运行分析; 完成稳态及脉冲交流配电、应急电源、磁体电源、接地及电磁兼容、辅助加热电源、聚变堆发电及功率补偿设计各分系统工程设计。

主要创新点 立足于 EAST 超导托卡马克装置的研究基础, 着眼 CFETR 设计, 参考现有技术和最新工业技术发展, 在消化吸收 ITER 关键技术基础上, 在大功率直流失超保护开关、低次谐波抑制以及内真空电源的核心技术方面开展深入研究, 电源设计将围绕设计技术要求、数值模拟、配套设备研制以及实验验证四个方面进行方案设计。

(责任编辑 李辉)