第 52 卷 第 6 期：2929-2939 高电压技术 Vol.52, No.6: 2929-2939
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250986

柔直换流站 500 kV 高压电缆异常放电与发热现象仿真研究

王跃新[1,2]，杜志叶[1,2]，李　根[1,2]，赵梦达[1,2]，祝明智[1,2]，陈　鹏[3]
（1. 电网环境保护全国重点实验室，武汉 430072；2. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；
3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司，长沙 410014）

摘　要：柔直换流站紧凑化建设为目前的发展趋势，其电缆夹层中高压电缆的敷设也更为紧密，导致内部电磁环境越发复杂，异常放电与发热故障风险不断提高。为此，以国内一起柔直换流站内 500 kV 高压电缆出现的异常放电与发热故障现象为研究对象，提出了一种考虑异常谐波的电缆电磁-热耦合仿真分析方法，构建了石墨导电涂层(graphite conductive coating，GCC)涂覆条件下的电缆电磁-热耦合仿真模型，结合场路耦合理论开展 GCC 存在多接地点工况下的异常放电与发热仿真研究，明确了工程上产生异常放电与发热现象的主要原因，给出了优化 GCC 涂覆厚度的电缆多点接地缓解措施。研究结果表明：线路中异常谐波含量和 GCC 上的额外接地点是导致电缆出现异常放电与发热现象的主要原因，故障相电缆 GCC 干扰电压最高达到 461.30 V，电缆温度最高达到 149.94 ℃。经过缓解设计后，故障相电缆 GCC 干扰电压下降 62.25%，电缆最高温度下降 73.52%。研究成果可为工程上电缆异常放电与发热现象的仿真计算以及缓解设计提供有益参考。

关键词：电缆；电磁干扰；温度场；谐波；多点接地；有限元

Simulation Study on the Mitigation of Abnormal Discharge and Heating Phenomenon of 500 kV High Voltage Cables in Flexible Direct Current Converter Stations

WANG Yuexin[1,2], DU Zhiye[1,2], LI Gen[1,2], ZHAO Mengda[1,2], ZHU Mingzhi[1,2], CHEN Peng[3]
(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. PowerChina Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China)

Abstract：Compact construction has become a development trend for flexible direct current converter stations. High-voltage cables in cable interlayers are arranged more tightly, resulting in an increasingly complex electromagnetic environment and a higher risk of abnormal discharge and heating faults. Therefore, the abnormal discharge and heating phenomena of 500 kV high-voltage cables in a flexible direct-current converter station in China are taken as the research object. A cable electromagnetic-thermal coupling simulation and analysis method considering abnormal harmonics is proposed. A cable electromagnetic-thermal coupling simulation model under graphite conductive coating (GCC) conditions is constructed. Based on the field-circuit coupling theory, abnormal discharge and heating under multiple grounding points on the GCC are simulated, the main causes of the engineering phenomena are clarified, and a multi-point grounding mitigation design with optimized GCC coating thickness is then developed. The results show that abnormal harmonic contents in the line and additional grounding points on the GCC are the main causes of abnormal discharge and heating in the cable. The maximum GCC interference voltage of the faulty-phase cable reaches 461.30 V, and the maximum cable temperature reaches 149.94 ℃. After the mitigation design, the GCC interference voltage of the faulty-phase cable decreases by 62.25%, and the maximum cable temperature decreases by 73.52%. The research results can provide a useful reference for simulation and mitigation of cable abnormal discharge and heating phenomena in engineering applications.

Key words：cable; electromagnetic interference; temperature field; harmonics; multi-point grounding; finite element

基金资助项目：国家自然科学基金(52377015)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52377015).

0 引言

近年来，随着海上风电的快速开发和利用，其呈现出大容量、高电压、深远海、远距离等特点[1-2]。柔性直流输电技术凭借其独特的技术优势，成为目前远海送电场景的理想选择[3]。对于柔直换流站而言，紧凑化的布置可以显著增强换流站的可靠性，缩减施工与维护工作量，并有效降低工程成本[4-5]。电力电缆作为换流站电流传输的关键设备，在紧凑化设计中敷设的更为紧密，加之电力输送等级的不断提高，导致电缆所处空间的电磁环境越发复杂，电缆电磁干扰水平不断升高。与陆上电缆相比，海上电缆维修成本更高，耗时更长[6-7]。因此，保证换流站内电缆系统的长期可靠运行至关重要。

电缆的电磁干扰现象是导致异常放电与发热现象的主要原因。当线芯通入交流电时，电缆内部及临近空间会产生交变磁场，通过电磁感应现象在铝金属护套(aluminum metal sheath，AMS)等良导体上感应出干扰电压和干扰电流[8-10]。过量的干扰电压会降低电缆的绝缘性能，增加电缆外护套的击穿风险，威胁运维人员的人身安全；过量的感应电流会直接加剧电缆温升，降低电缆的载流量，导致绝缘材料的异常劣化，缩短电缆的使用寿命[11-14]。

因此，国内外专家学者针对电缆电磁干扰现象以及其导致的异常放电与发热现象开展了大量研究，并制定了可靠的技术标准[15-17]。其中，文献[18]针对海缆金属护层上环流干扰导致的载流量下降与温升问题，构建了记及环流的电磁-热-流多物理场耦合仿真模型，分析了环流作用下的海缆载流量和温度变化情况。文献[19]基于等效电路理论和双侧消去法建立隧道电缆故障环流模型，推导了隧道电缆在接地故障状态下护套的环流公式，计算了不同接地工况下的地表电势。文献[20]针对单芯海缆不同区段接地环流不匹配的问题，基于分布参数理论，提出了海缆金属护套和铠装在不同接地配置下的环流状态评价方法。文献[21]基于有限元法分析了 2 组平行敷设的地下电缆在不同排布方式下的电磁干扰特征以及发热特征，评估了不同设计参数下地下电缆的性能。文献[22]建立了用于计算电缆护套和铠装中感应环流的等效电路模型，提出了高压电缆运行过程中交叉互联接地配置的优化方案。

综上，现有研究大多在正常运行或常规故障工况下分析电缆的电磁干扰特性。由于海上风力发电的间歇性，运行过程中会产生更多的谐波[23-24]。柔性直流输电技术引入的大功率高频开关器件进一步加剧了系统中的谐波问题[25-27]。目前尚未明确谐波缓解措施失效或开关器件故障产生的异常谐波对换流站内电缆的电磁干扰与热影响。此外，为了防止高压电缆外护套在制造、运输和敷设过程中出现破损，电缆敷设完成后需在外护套表面涂覆一层石墨导电涂层(graphite conductive coating，GCC)，以检测外护套的绝缘性能[28-30]。GCC 在电缆运行中受到的电磁干扰机理尚未明确，工程上普遍未考虑电缆外表面 GCC 的电磁干扰水平[31-32]。

因此，本文针对国内一起柔直换流站内 500 kV 高压电缆 GCC 出现的异常放电与发热现象，提出了一种考虑异常谐波的电缆电磁-热耦合仿真分析方法，构建了 GCC 涂覆条件下的电缆电磁-热耦合仿真模型，结合场路耦合理论开展 GCC 存在多接地点工况下的异常放电与发热仿真研究，明确了工程上产生异常放电与发热现象的主要原因，设计了优化 GCC 涂覆厚度的电缆多点接地缓解措施，有效缓解了目标电缆的异常放电与发热现象，为工程上电力电缆的电磁干扰防护和缓解提供有益参考。

1 高压电缆异常放电与发热机理

高压电缆在实际运行过程中内部导体受到的电磁干扰主要包括电容耦合和电感耦合 2 类，分别源于电缆的静电感应和电磁感应现象[33-34]。电缆型号确定后，电容耦合水平主要受电缆长度、电压等级、频率等因素的影响[33]。对于电缆长度较短、接地良好的工况，电容耦合对总电磁干扰的贡献较为有限。电感耦合干扰产生于电磁感应现象，当电缆线芯通入交流电时，电缆内部及其临近空间会产生交变磁场，进而在 AMS 和 GCC 上感应出干扰电压和干扰电流，其传播规律满足 Maxwell 方程：

$$\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}+\partial\boldsymbol{D}/\partial t\\ \nabla\times\boldsymbol{E}=-\partial\boldsymbol{B}/\partial t\\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}=0\\ \nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度，A/m；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度，A/m^2；$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量，C/m^2；$\boldsymbol{E}$ 为空间中电场强度，V/m；$\boldsymbol{B}$ 为空间中的磁通密度，T；ρ 为电荷密度，C/m^3。对式(1)中的全电流定律两侧同求散度：

$$\nabla\cdot(\nabla\times\boldsymbol{H})=\nabla\cdot\boldsymbol{J}+\nabla\cdot\partial\boldsymbol{D}/\partial t=0\tag{2}$$

$$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}+\sigma\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}+\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{v}$ 为导体运动速度，m/s；σ 为电缆材料的电导率，S/m；$\boldsymbol{J}_e$ 为外部电流密度，A/m^2。进一步，为了求解电缆空间中的磁场分布，引入 $\nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}$，代入法拉第电磁感应定律可得：

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=\nabla\times(-\frac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}) \tag{4}$$

假设电缆材料为各项同性介质，叠加表征材料极化、磁化和导电特征的本构方程，将式(4)代入式(2)，可以得到如式(5)所示的双旋度偏微分方程。其中 ε 和 μ 分别为材料介电常数和磁导率。

$$\begin{aligned}\sigma\frac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}-\omega^2\varepsilon\boldsymbol{A}+\nabla\times(\mu^{-1}\nabla\times\boldsymbol{A})-\\ \sigma\boldsymbol{v}\times(\nabla\times\boldsymbol{A})=\boldsymbol{J}_e\end{aligned} \tag{5}$$

在温度场仿真方面，为了准确反映干扰电流变化在电缆导致的热效应，利用傅里叶定律进行表征：

$$\rho_m c_p\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla\cdot(k\nabla T)=Q_e \tag{6}$$

式中：ρ_m 为介质密度，kg/m^3；c_p 为介质的比热容，J/(kg·K)；k 为导热系数，W/(m·K)；Q_e 为总电磁损耗，W。Q_e 包含电流产生的焦耳热平均损耗 Q_r 和电磁感应在导电护层中的电磁平均损耗 Q_m，计算方法为：

$$\begin{aligned}Q_e=Q_r+Q_m=(\mathrm{Re}((\boldsymbol{J}+\partial\boldsymbol{D}/\partial t)\cdot\boldsymbol{E}^*)+\\ \mathrm{Re}(\partial\boldsymbol{B}/\partial t\cdot\boldsymbol{H}^*))/2\end{aligned} \tag{7}$$

式中：上标*表示为共轭复数。将式(7)代入式(6)中，可得到如式(8)所示的偏微分方程：

$$-\frac{\boldsymbol{E}}{\rho_0(1+\alpha(T-T_{\mathrm{ref}}))}-\varepsilon\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}+\nabla\times(\mu^{-1}\boldsymbol{B})=0 \tag{8}$$

式中：ρ_0 为材料的参考电阻率，Ω·m；α 为电阻率温度系数；T_{ref} 为参考温度。

求解式(5)、(8)即可计算模型的磁矢势 $\boldsymbol{A}$ 和温度 T，分析目标电缆的异常放电与发热现象。

2　电缆异常放电与发热现象仿真研究

根据已知工程数据，提出了一种考虑异常谐波的电缆电磁-热耦合仿真分析方法，构建了 GCC 涂覆条件下的电缆电磁-热耦合有限元仿真模型，明确了工程现场电缆发生异常放电与发热现象的原因。

2.1　仿真案例介绍

以国内一起柔直换流站内的 500 kV 高压单芯电缆为研究对象，其几何与材料参数见表 1。目标电缆型号为 ZA-YJLW02-Z-290/500 kV-1×2 500 mm^2，敷设长度为 65 m。电缆外护套表面涂覆有厚度为 0.2 mm 的 GCC，作为进行电缆外护套缺陷检测的外电极，详细结构如图 1 所示。实际工程中，AMS 采用单端接地，GCC 两端悬空不做接地处理，具体接地方式如图 2 所示。

表 1　换流站 500 kV 高压单芯电缆的几何参数与材料参数

Table 1　Geometric and material parameters of 500 kV high voltage single-core cables in converter stations

结构	外径/mm	电导率/(S·m^{-1})	相对磁导率	相对介电常数	导热系数/(W·(m·K)$^{-1}$)	密度/(kg·m^{-3})	恒压热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)
线芯	62.3	5.71×10^7	1	1×10^4	400	8 933	385
内屏蔽层	68.1	2×10^{-3}	1	12	0.4	960	1 900
绝缘层	130.1	1×10^{-14}	1	2.3	0.3	930	1 900
外屏蔽层	135.1	2×10^{-3}	1	12	0.4	960	1 900
缓冲层	145.1	2×10^{-3}	1	12	0.2	1 600	1 100
AMS	159.7	3.53×10^7	1	1×10^4	238	2 689	951
外护套	174.9	1×10^{-14}	1	8	0.17	1 400	1 200
GCC	175.3	1.25×10^5	1	1×10^4	155	1 950	710

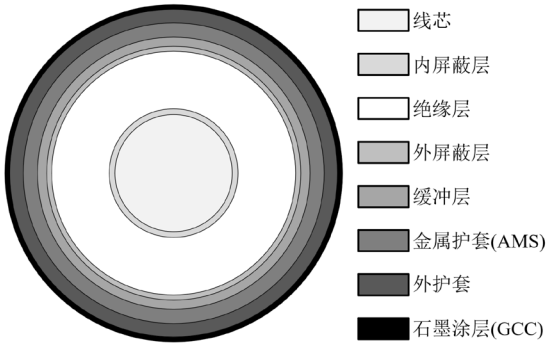


图 1　换流站内高压电缆详细结构示意图

Fig.1　Detailed structural diagram of the high voltage cable in the converter station

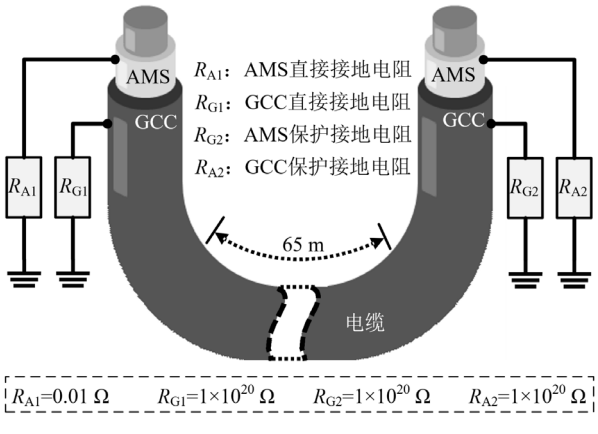


图 2　换流站内高压电缆接地方式示意图

Fig.2　Schematic diagram of high-voltage cable grounding method in the converter station

当电缆通入电压为 242 kV、线芯电流为 250 A 左右时，发现电缆 GCC 表面存在异常放电现象。

经测量，电缆AMS直接接地侧的接地电流为120 A，保护接地侧的对地电压为332.6 V；GCC的接地电流为0 A，保护接地侧的对地电压为230.6 V。接地电流通过在AMS和GCC与金属尾管的连接位置引出接地线至接地箱，在各自的接地线上利用罗氏线圈测得；接地电压利用VICTOR 6018万用表测得。同时，GCC表面的异常放电伴随着异常发热现象，电缆与电缆夹的接触部分温度骤升，沥青融化，GCC表面出现烧蚀点，红外测温仪器测得异常区域的护层温度达到 90 ℃。此外，运维人员反映电缆临近环境的电磁干扰较强，干扰电子设备的正常运行，导致实测结果准确性下降，仅供定性参考。

通过对电源系统进行排查，发现系统内存在绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor，IGBT)旁路损坏导致线路中存在高次谐波，系统监测到的谐波含量如图3所示。受限于监测设备和记录条件的影响，只获得轻载下谐波的总均方根(root mean square，RMS)值和一半谐波分量的幅值，各次谐波的相位未知。此外，经排查发现，存在电缆GCC表面与电缆夹之间的部分绝缘垫皮敷设不良的情况。

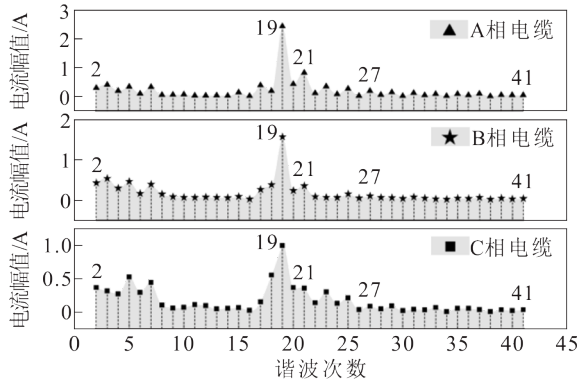


图3 监测到的电缆线路中的异常谐波

Fig.3 Abnormal harmonics detected in cable lines

经过分析可知，电缆发生异常放电与发热现象的主要原因可能为：线路中过量的谐波导致AMS和GCC上产生了过量的干扰电压和干扰电流，而电缆夹和电缆之间没有良好绝缘导致GCC与电缆夹存在额外的接地点，进而导致GCC内部出现环流干扰，引发电缆异常放电和过热烧蚀现象。

2.2 未知谐波激励推导

由于线路中存在高次谐波，无法在频域中进行电磁场分析，只能通过瞬态有限元仿真得到电缆区域的电磁场分布。谐波频率越高，对电缆的电磁干扰影响也越大。为了考虑未知谐波对电缆的影响，将图3中已知的谐波有效值进行叠加，与已知的总RMS值作差，得到的差值即为高次谐波的有效值总含量。将未知谐波归一化可有效简化谐波频谱特性，虽然会导致计算结果在一定程度上偏离实际值，但得到的仿真结果更加保守，不影响仿真结果正确性且能显著提升仿真效率。以工程现场实测的感应电压和电流作为基准，选取仿真后最接近实测电磁干扰结果的频率作为未知谐波有效值总含量的归一频率，最符合实测结果的谐波频率为47次谐波，将其作为未知谐波的归一化频率进行后续仿真计算。

此外，工程现场只测得如图3所示的轻载情况下的部分谐波数据，为了获得更高负荷下的谐波分布数据，假设电缆为纯电阻负载，各次谐波电压与工频电压的比例同各次谐波电流与工频电流的比例相同，故已知各次谐波电流即可得到相对应的各次谐波电压含量。进一步，将谐波电压作为激励施加在由电缆构成的等效电路中，通过调节纯电阻负载阻值的大小使工频电流达到250 A。此时，通过傅里叶分解得到的各个频率下的电流即为工频250 A下的各次谐波含量。最后，为了便于分析并节省计算资源，将含量较高的18、19、20、21、47次谐波作为单独激励；将其余含量较小的谐波进行有效值加和，统一归于27次谐波。整体的谐波推导过程如图4所示，推导得到的各次谐波数据如表2所示。

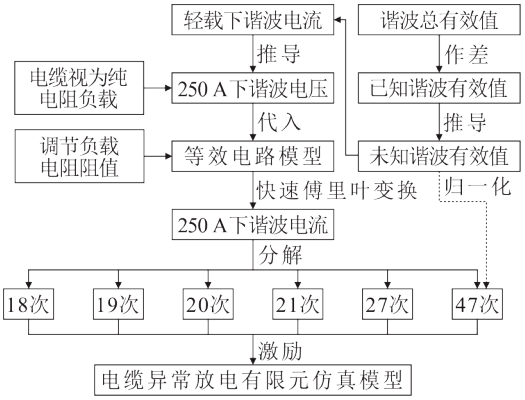


图4 高负荷下的电缆线路中谐波电流推导过程

Fig.4 Derivation process of harmonic currents in the cable under high loads

2.3 高压电缆异常放电仿真模型

表2中的相位分布为：在电缆异常放电仿真模型中推导的、可以使电缆产生最大电磁干扰的相位配置。电缆异常仿真模型采用如图5所示的二维截面有限元仿真模型进行研究，模型中采用的几何、材料和电气参数与实际工程一致。以在线芯部分施

加推导得到的谐波电流函数作为激励，通过设置面外厚度 65 m 来模拟电缆轴向长度。

表 2　推导后的 250 A 下各次谐波电流幅值与相位

Table 2　Derived amplitude and phase of each harmonic current at 250 A

谐波次数	幅值/A			相位/(°)		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1(工频)	353.55	353.55	353.55	−94.16	25.39	145.31
18	5.46	10.40	15.68	55	55	55
19	71.14	43.08	28.19	130	250	370
20	12.49	6.47	10.45	240	120	0
21	23.96	9.63	10.17	30	30	30
27	29.66	29.44	30.50	−10	−10	−10
47	89.32	85.32	87.56	80	80	80

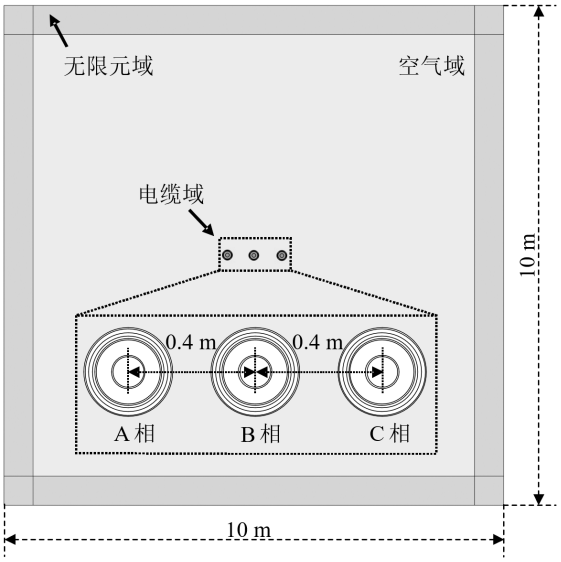


图 5　高压电缆异常放电二维截面仿真模型

Fig.5　Two-dimensional cross-sectional simulation model for abnormal discharge of the high voltage cable

在边界条件设置方面，通过场路耦合的方法将电缆 AMS 和 GCC 与外部电路耦合，以模拟二者的接地条件；模型外部采用无限元域，以模拟电缆外部的开放电磁空间；模型外边界施加齐次狄利克雷边界，以控制边界磁矢势 $\boldsymbol{A}$ 与边界上的法向单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 平行，即边界上只存在法向磁场。

在网格剖分方面，电缆和内部空气域采用非结构化三角形网格剖分，外部无限元域采用扫掠网格剖分，最小单元质量为 0.44 以上，总体包括 46 844 个域单元和 3 044 个边界单元。为了确保网格可以解析高频谐波产生的电磁干扰，基于 47 次谐波在电缆导体层的趋肤深度，将现有网格下的计算结果与包括 691 826 个域单元的细化网格计算结果进行对比，相对误差不超过 0.03%，网格无关性验证通过。

瞬态仿真时间步长设置为 40 μs，为 47 次谐波周期的 1/10，以准确解析各次谐波在电缆上产生的电磁干扰特征。共仿真 2 个完整 50 Hz 工频周期，以验证仿真结果的正确性，采用一阶线性形函数进行瞬态求解。

2.4　高压电缆异常发热仿真模型

谐波导致的电缆电磁干扰变化为亚毫秒级，而电缆温升的时间尺度为秒级，二者仿真的时间尺度相差巨大。因此，不能直接通过电磁-热强耦合的“瞬态”或“频域-稳态”方法完成电缆的温度场仿真。

对于电缆结构而言，谐波导致的总损耗可等效为各次谐波单独作用下产生损耗的叠加[35-37]。因此，制定电缆异常发热仿真方案如下：首先，分别计算各次谐波单独作用下产生的线芯、AMS 和 GCC 损耗平均值；随后，将不同谐波产生的损耗叠加得到各层导体的总损耗密度，将总损耗密度作为热源项施加至温度场仿真模型中计算电缆温度；最后，将得到的电缆温度作为初始值，在此温度下仿真各频率下的损耗密度并不断迭代电缆温度，迭代过程中考虑导体的电阻率温变效应。当电缆温度增长水平小于 1%时，即可得到最终的电缆异常发热仿真结果。电缆异常发热计算过程如图 6 所示，其与图 4 构成了电缆异常放电与发热现象总仿真过程。

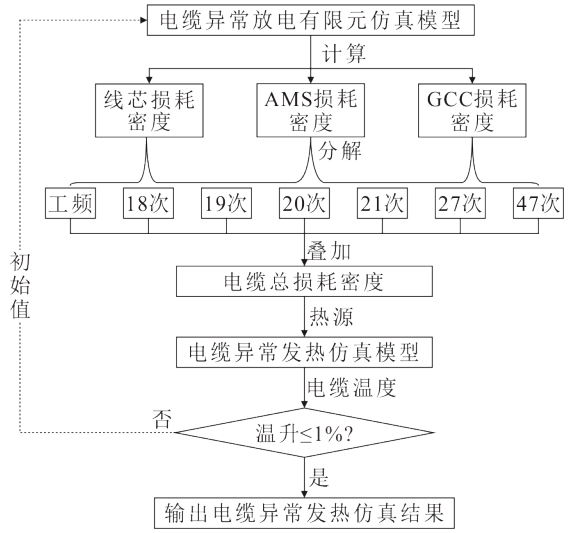


图 6　电缆异常发热仿真过程

Fig.6　Simulation process for abnormal cable heating

由于所研究的电缆位于柔直换流站的电缆夹层内，因此设置换流站环境温度为 20 ℃，不考虑外部太阳辐射影响；在电缆外边界设置传热系数为

2 的热通量边界条件，以模拟电缆室内的自然空气对流情况。将所有谐波下得到的线芯、AMS 和 GCC 的损耗密度叠加后作为热源，分别施加在 A、B、C 三相电缆中，实现电缆温度场分布的准确模拟。

2.5 电缆异常放电与发热仿真结果

基于第 2.3、2.4 节描述的电缆异常放电与发热仿真方法，计算目标电缆在异常谐波作用下的 AMS 与 GCC 干扰电流、干扰电压，结果如表 3 所示。

表 3 高压电缆电磁干扰幅值与损耗密度仿真结果

Table 3 Simulation results of electromagnetic interference amplitude and loss density in the high voltage cable

干扰参数	AMS 参数取值			GCC 参数取值		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
干扰电压/V	465.09	463.38	442.75	462.24	461.30	440.83
干扰电流/A	0	0	0	0	0	0
损耗密度/(W·m^{-3})	152.99	140.15	120.45	8.26	1.51	8.41

由第 1 章可知，存在谐波干扰时电容耦合对 65 m 长电缆的电磁干扰影响有限，故忽略沿电缆绝缘传播至 AMS 和 GCC 的泄漏电流。同时，实际工程中 AMS 采用单端接地，GCC 两端不做接地处理，均没有与大地构成回路，故仿真得到的 AMS 和 GCC 上的干扰电流近似为 0 A，由 I^2R 构成的欧姆损耗也几乎为 0 W/m^3。因此，电缆的发热量绝大多数由线芯提供，AMS 和 GCC 的发热量较小。仿真得到的 A、B、C 三相电缆线芯的损耗密度分别为 376.57、341.31、339.95 W/m^3。将线芯、AMS、GCC 的损耗密度依次代入电缆异常发热仿真模型中，计算得到电缆的发热结果。为了验证仿真模型的准确性，根据标准 JB/T 10181-2014[38]建立相同参数下的电缆热路仿真模型与电缆异常发热模型仿真结果进行对比分析，结果如图 7 所示。

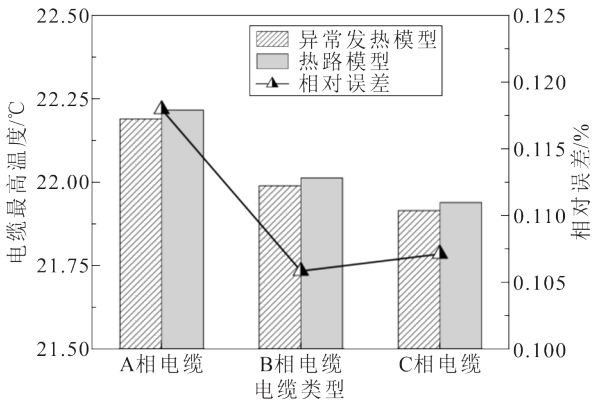


图 7 电缆异常发热仿真模型与热路法计算结果对比

Fig.7 Comparison of simulation models for abnormal cable heating with results from the thermal path method

由图 7 可知，电缆异常发热模型和热路仿真模型的温度计算结果之间的相对误差在 0.1%左右，验证了电缆异常发热仿真模型的准确性。证明在 AMS 和 GCC 接地措施良好的情况下，250 A 负荷时电缆几乎不存在异常发热现象。

3 多接地点下电缆异常放电发热研究

电缆发生异常放电与发热现象之后，运维人员发现 GCC 在部分位置与电缆夹之间存在绝缘不良现象，可能导致 GCC 表面存在额外的接地点。多接地点下的 GCC 通过接地点与大地构成回路，产生干扰环流，增大电缆的发热水平。因此，针对 GCC 存在多接地点下的电缆异常放电及发热现象进行仿真研究，分析不同接地点数量对电磁干扰和发热水平的影响规律，设计电缆异常放电与发热缓解措施。

3.1 多接地点下电缆异常放电与发热仿真模型

如第 2 章所述，电缆最外层存在厚度为 0.2 mm 的 GCC，同时线芯流过亚毫秒级的 47 次谐波电流，表明仿真模型存在典型的空间、时间跨尺度特征。为了在保证计算效率的同时准确模拟多点接地工况下的电缆异常放电与发热特征，提出一种考虑谐波影响的电缆多点接地电磁-热耦合 2.5 维仿真方法，其实现过程如图 8 所示。

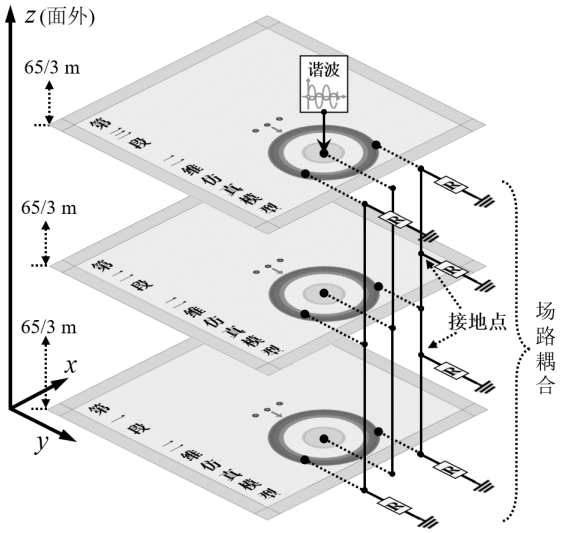


图 8 多点接地电磁-热耦合 2.5 维仿真方法

Fig.8 A 2.5-dimensional simulation method for electromagnetic-thermal coupling of multipoint grounding

以 GCC 的 2 点接地为例，分别构建 3 段面外长度为 65/3 m 的二维电缆仿真模型，通过场路耦合将 3 段电缆仿真模型中的 GCC 利用节点电路法进

行连接，在连接处设置接地点，实现总长度为 65 m、GCC 分别在 21.7 m 和 43.3 m 处接地的 2.5 维仿真模型。进一步，通过 2.5 维电缆仿真模型计算得到电缆多点接地下各导体护层的损耗密度之后，将其代入至温度场仿真模型中，实现多点接地下电缆温度场的仿真计算。由于 2.5 维模型共构建了 3 段二维电缆仿真模型，故在仿真过程中需要 3 倍于第 2 章中二维模型的仿真时长，但相比于 3 维模型依旧节省了大量的计算资源，极大地提高了仿真效率。

为了验证多点接地电磁-热耦合 2.5 维仿真方法的正确性，以 2 点接地工况为例，构建几何、材料和电气参数完全相同的等效电路模型，将 2.5 维模型计算结果同等效电路模型计算结果对比，如图 9 所示。可以看到，AMS、GCC 干扰电压与电流相对误差均在 4.57%以内，证明了仿真方法的正确性。

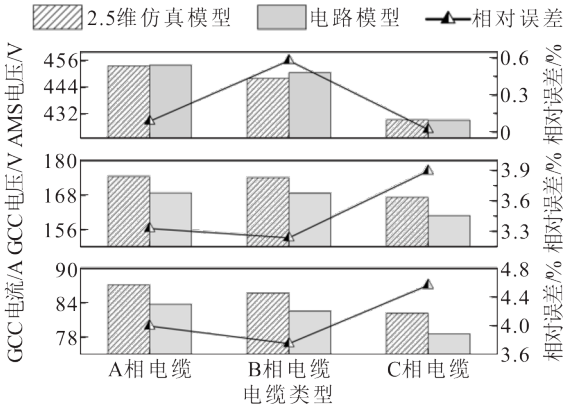


图 9　2.5 维仿真方法与等效电路法对比结果

Fig.9　Comparison results between 2.5-dimensional simulation method and equivalent circuit method

3.2　多点接地后的电缆异常放电与发热仿真结果

完成考虑谐波影响的电缆多点接地电磁-热耦合 2.5 维仿真模型的构建之后，分别分析三相电缆 GCC 均匀存在 1、2、3 接地点工况下，AMS 和 GCC 的干扰电压与干扰电流水平，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，多点接地会有效降低接地导体(GCC)的干扰电压，对未接地导体(AMS)的影响则较为有限；当接地点数量大于 2 时，由于环流的存在，GCC 上产生了最高 87.15 A 的干扰电流，将极大增加电缆的发热水平；接地点数量的增加会有效降低导体的干扰电压，但不与接地点数量的变化呈等比例关系；当接地点数量大于 2 之后，干扰电流水平与接地点数量无关。

进一步分析多点接地对 GCC 的影响，以较为典型的 B 相电缆电磁干扰结果为例，将表 4 与表 3 中的数据进行对比分析，得到结果如图 10 所示。由图 10 可知，相较于不多点接地工况，1 点接地时 GCC 干扰电压降低了 43.5%，2 点接地后 GCC 干扰电压进一步降低了 18.8%，而 3 点接地后 GCC 干扰电压仅降低了 9.4%，说明随着接地点数量的不断增多，其对干扰电压的缓解水平不断衰减。

表 4　不同多点接地工况下电缆电磁干扰水平仿真结果

Table 4　Simulation results of electromagnetic interference levels of cables under different multi-point grounding conditions

接地方式	干扰参数	AMS 参数取值			GCC 参数取值		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1 点接地	干扰电压/V	495.24	493.51	472.54	261.21	260.74	250.41
	干扰电流/A	0	0	0	0	0	0
2 点接地	干扰电压/V	453.67	448.03	429.26	174.46	174.12	167.21
	干扰电流/A	0	0	0	87.15	85.67	82.21
3 点接地	干扰电压/V	440.72	434.61	416.34	130.99	130.74	125.55
	干扰电流/A	0	0	0	87.42	85.93	82.46

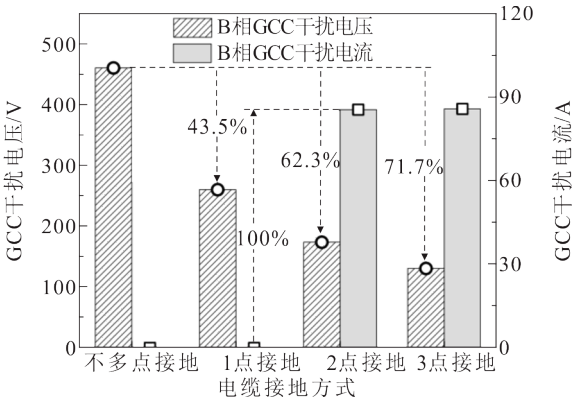


图 10　B 相电缆 GCC 干扰电压与干扰电流结果对比

Fig.10　Comparison of GCC interference voltage and interference current results for the B-phase cable

通过以上分析可知，1 点接地时 GCC 上干扰电压降低了将近一半，而几乎不存在干扰电流，代价是 AMS 的干扰电压提升 30 V 左右，证明多点接地可以有效缓解 GCC 干扰电压水平。若进一步降低干扰电压则会在 GCC 内部引入环流干扰，造成异常发热现象。因此，为了明确实际工程中出现的异常发热现象机理，进而设计有效的电缆异常放电与发热缓解措施，提取多点接地下的 B 相电缆线芯、AMS、GCC 损耗密度，代入第 2.4 节构建的电缆异常发热仿真模型中，计算得到的电缆 1 点和 2 点接地工况下的发热情况如表 5 所示。

由表 5 可知，电缆 GCC 在 2 点接地后的温度

为 149.94 ℃，远超过电缆最高允许工作温度，需要设计电缆异常放电与发热现象缓解措施。此外，通过仿真结果可知，多点接地下谐波产生的环流干扰为导致电缆出现异常发热现象的主要原因。

表 5 多点接地后 B 相电缆损耗密度、干扰电流与发热水平

Table 5 B-phase cable loss density, interference current and heating level after multi-point grounding

接地工况	损耗密度/(W·m^{-3})			干扰电流/A			电缆温度/℃
	线芯	AMS	GCC	线芯	AMS	GCC	
1 点接地	342.0	140.3	1.52	353.6	0	0	21.993
2 点接地	435.9	186.7	1.3×10^6	353.6	0	85.67	149.94

可以注意到，多点接地前后线芯损耗密度变化不大，而电缆温度却有较大提升，原因在于 2 点接地产生的环流干扰在横截面积极小的 GCC 上产生了较大的损耗密度。为了明确电缆内部温度分布特征，以 2 点接地工况为例，保持 GCC 和 AMS 损耗密度不变，逐渐提高线芯损耗密度，计算电缆温度变化结果如图 11 所示。可以看到线芯温度始终高于 AMS 与 GCC 的温度。根据傅里叶定律，电缆热通量的方向始终沿着温升梯度的负方向。由于单芯电缆为同心圆结构，因此在 GCC 损耗密度较大的情况下，线芯热量无法透过 GCC 散出，导致内部温度持续升高，达到与 GCC 温度相同水平时热量才可以正常向外传递。因此，当线芯损耗密度较小时，线芯与 AMS 和 GCC 的温差极小，随着线芯损耗密度的增加，线芯、AMS 和 GCC 的温差越发明显。

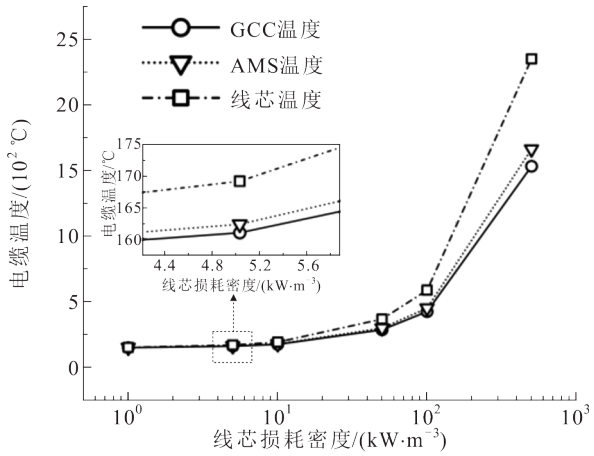


图 11 电缆温度随线芯损耗密度变化曲线

Fig.11 Curve of cable temperature varying with wire core loss density

3.3 基于多点接地的异常放电与发热缓解设计

根据 GB50217—2018 标准，高压单芯电缆存在安全措施时，金属护层感应电压不应超过 300 V[39]。在多点接地之前，由表 3 可知，B 相电缆 GCC 感应电压为 461.30 V，超过标准规定的安全限值。2 点接地之后，B 相电缆 GCC 感应电压为 174.12 V，下降比例为 62.25%，有效避免了电缆异常放电现象的发生。多点接地可以有效缓解电缆 GCC 的异常放电现象，但会导致电缆出现异常发热。因此，需要尽可能保证多点接地下干扰电压缓解效果的同时，降低电缆 GCC 的环流干扰水平或发热水平。

在干扰电流不变的情况下，增加导体横截面积会显著减小损耗密度水平，从而缓解电缆的异常发热。因此，在 2 点接地工况下，将 GCC 涂覆厚度从 0.2 mm 提高至 1 mm，计算电缆发热水平。实际工程中，对 GCC 的应急接地往往在 GCC 表面缠绕铜带，这同样会间接增大 GCC 环流流过的横截面积。此外，改善电缆室内的散热条件同样能有效降低电缆温度，在仿真中反映为对流换热系数的提高。

缓解之后的电缆发热水平如表 6 所示。可以看到，增加 GCC 厚度可以有效降低电缆发热水平。以对流换热系数为 2 的工况为例，GCC 厚度提高至 1 mm 后，电缆温度下降 48.16%；电缆室散热条件的改善会进一步缓解电缆的发热水平，对于 GCC 厚度 1 mm 工况，当对流换热系数从 2 升高至 6 时，电缆温度下降 48.93%。此外，随着对流换热系数的提高，增大 GCC 厚度对于电缆发热的缓解效果逐渐减弱。当对流换热系数为 2 时，提高 GCC 厚度使得电缆温度下降 48.16%；而当对流换热系数为 6 时，提高 GCC 厚度仅使得电缆温度下降 37.80%。因此，当散热条件较差时应优先考虑提高 GCC 的涂覆厚度。故障现场采用 GCC 表面缠绕铜带的方式在多点接地的同时增加 GCC 的通流面积，有效缓解了电缆的异常放电及发热现象，验证了所提缓解方法的有效性。由于 GCC 的涂覆通常在电缆敷设完成之后进行[29-30]，故提高 GCC 的涂覆厚度不

表 6 提高 GCC 厚度后 2 点接地下 B 相电缆发热水平对比

Table 6 Comparison of heat generation levels in 2-point ground-bound cables after increasing the thickness of GCC

对流换热系数	电缆温度/℃		温度下降比例/%
	GCC 厚度 0.2 mm	GCC 厚度 1 mm	
2	149.94	77.735	48.16
3	106.88	58.717	45.06
4	85.355	49.207	42.35
5	72.437	43.502	39.95
6	63.826	39.698	37.80

会对电缆弯曲半径、敷设难度产生影响。

对于高压交联聚乙烯(crosslinked polyethylene，XLPE)绝缘交流电缆，其长期工作温度需在 90 ℃以下，以保证电缆的绝缘性能[40]。因此，为了缓解工程现场出现的异常放电与发热现象，对于长度不超过 65 m 的 500 kV 高压单芯电缆，GCC 应进行至少 2 点的多点接地处理，增加 GCC 涂覆厚度或在 GCC 表面缠绕接地铜带，同时对电缆室内的散热条件进行优化，可避免异常放电与发热现象的产生。从根本上需要排除电源系统故障，消除异常谐波含量，以保证电缆的安全稳定运行。

4　结论

1）线路中的异常谐波含量是导致电缆出现异常放电现象的主要原因，B 相电缆 AMS 最大干扰电压为 463.38 V，GCC 最大干扰电压为 461.30 V。当 GCC 表面不存在额外接地点时，电缆最高温度仅为 22.18 ℃，不会发生异常发热现象。

2）当 GCC 存在额外接地点时，异常谐波在 GCC 内部产生的环流干扰是导致电缆出现异常发热现象的主要原因。多点接地下 B 相电缆 GCC 最高出现 85.93 A 的环流干扰，电缆温度最高达到 149.94 ℃，高于电缆最高运行温度。

3）GCC 进行至少 2 点的多点接地处理，增加 GCC 涂覆厚度或在 GCC 表面缠绕接地铜带，同时对电缆室内的散热条件进行优化。经过缓解后，B 相电缆 GCC 干扰电压从 461.30 V 降至 174.12 V，下降 62.25%；最高温度从 149.94 ℃降至 39.698 ℃，下降 73.52%，可避免异常放电与发热现象的产生。

参考文献　References

[1] 朱介北，史美琦，索之闻，等. 基于直流电压补偿的海上风电-多端柔直送出系统惯量协调控制[J]. 电网技术，2025，49(2)：522-532.
ZHU Jiebei, SHI Meiqi, SUO Zhiwen, et al. DC voltage compensation-based inertia coordinated control of VSC-MTDC integrated offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 522-532.

[2] 冯立杰，谭龙，肖世昌，等. 考虑维护策略与运维船型组合的海上风电机组多目标运维优化[J]. 电网技术，2025，49(11)：4536-4544.
FENG Lijie, TAN Long, XIAO Shichang, et al. Research on multi-objective operation and maintenance optimization of offshore wind turbines considering the combination of maintenance strategy and operation and maintenance vessel type[J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4536-4544.

[3] 齐磊，吴思航，史丹，等. 海上风电送出系统直流耗能技术[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4333-4352.
QI Lei, WU Sihang, SHI Dan, et al. DC chopper technology for offshore wind power transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4333-4352.

[4] 蔡放，李政轩，宋强，等. 基于单向电流型混合 MMC 的海上风电柔性直流紧凑化换流阀设计方法[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2759-2769.
CAI Fang, LI Zhengxuan, SONG Qiang, et al. Design method of compact converter valve for offshore wind power HVDC transmission based on unidirectional current hybrid MMC[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2759-2769.

[5] 肖晃庆，甘慧辰，黄莹，等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2702-2719.
XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2702-2719.

[6] 徐方维，李鑫玥，刘桐雨，等. 计及多电压等级电缆分布参数的海上风电场谐波不稳定灵敏度分析[J]. 电网技术，2025，49(12)：5070-5079.
XU Fangwei, LI Xinyue, LIU Tongyu, et al. Sensitivity analysis of harmonic instability in offshore wind farms considering distribution parameters of multi-voltage cables[J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5070-5079.

[7] SRINIL N. Cabling to connect offshore wind turbines to onshore facilities[M]//NG C, RAN L. Offshore Wind Farms. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2016: 419-440.

[8] 赵鹏，陈铮铮，胡凯，等. 交直流电缆混合敷设的基频电磁感应特性计算与分析[J]. 高电压技术，2020，46(2)：576-585.
ZHAO Peng, CHEN Zhengzheng, HU Kai, et al. Calculation and analysis of the fundamental frequency electromagnetic induction of hybrid laying AC and DC cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 576-585.

[9] 严有祥，朱婷，张那明，等. 交直流电缆共沟敷设电磁环境影响因素[J]. 电工技术学报，2022，37(6)：1329-1337.
YAN Youxiang, ZHU Ting, ZHANG Naming, et al. The influence factors of electromagnetic environment in the tunnels with DC cables and AC cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1329-1337.

[10] 刘广军. 轨道交通供电电缆单相接地感应电压仿真研究[J]. 铁道工程学报，2020，37(8)：77-80.
LIU Guangjun. Research on the induced voltage for single-phase ground fault in power supply cable of urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(8): 77-80.

[11] 刘士利，罗英楠，刘宗烨，等. 基于电磁-热耦合原理的三芯铠装电缆在低频输电方式下的损耗特性研究[J]. 电工技术学报，2021，36(22)：4829-4836.
LIU Shili, LUO Yingnan, LIU Zongye, et al. Study on loss characteristics of three core armored cable under low-frequency transmission mode based on electromagnetic, thermal coupling principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4829-4836.

[12] BINDI M, LUCHETTA A, LOZITO G M, et al. Frequency characterization of medium voltage cables for fault prevention through multi-valued neural networks and power line communication technologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3227-3237.

[13] CHANDRAN C V, SUNDERLAND K, BASU M. An analysis of harmonic heating in smart buildings and distribution network implications with increasing non-linear (domestic) load and embedded generation[J]. Renewable Energy, 2018, 126: 524-536.

[14] 潘文霞，谢晨，赵坤，等. 计及护层环流的电缆温升分析与故障定位方法研究[J]. 电机与控制学报，2021，25(1)：38-45.
PAN Wenxia, XIE Chen, ZHAO Kun, et al. Cable temperature rise analysis and fault location considering sheath circulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 38-45.

[15] SCHURIG O R, KUEHNI H P, BULLER F H. Abridgment of losses in armored single-conductor lead-covered A-C. cables[J]. Journal of the American Institube of Electrical Engineers, 1929, 48(3): 206-210.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力工程电缆设计标准：GB 50217—2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for design of cables of electric power engineering: GB 50217—2018[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2018.

[17] 李自强，李睿，孙抗. 基于时序拓扑数据分析的电力电缆局部放电模式识别[J]. 电子科技大学学报，2024，53(3)：440-446.
LI Ziqiang, LI Rui, SUN Kang. Power cable partial discharge pattern recognition based on topological data analysis for time series[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2024, 53(3): 440-446.

[18] 周远翔，付新亚，吕微微，等. 考虑环流的双回异构登陆段海底电缆温度与载流量仿真分析[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2748-2758.
ZHOU Yuanxiang, FU Xinya, LYU Weiwei, et al. Simulation analysis of temperature and current carrying capacity of submarine cables in the dual loop heterogeneous landing section considering circulation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2748-2758.

[19] 王恩哲，陈向荣，张添胤，等. 基于双侧消去法的隧道电缆系统故障环流计算及接地散流优化[J]. 中国电机工程学报，2025，45(3)：1160-1171.
WANG Enzhe, CHEN Xiangrong, ZHANG Tianyin, et al. Fault circulation calculation and grounding scattering optimization in tunnel cable system based on double-sided elimination method[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1160-1171.

[20] 李岩，王毛桃，乔俊杰，等. 单芯海缆两端环流不匹配问题及评价方法研究[J]. 电网技术，2024，48(4)：1770-1778.
LI Yan, WANG Maotao, QIAO Junjie, et al. Mismatched circulation conditions and evaluation of single-core submarine cables[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1770-1778.

[21] DEMIROL Y B, KALENDERLI Ö. Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 227: 109987.

[22] CANDELA R, GATTUSO A, MITOLO M, et al. A model for assessing the magnitude and distribution of sheath currents in medium and high-voltage cable lines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6250-6257.

[23] ECN part of TNO. Large offshore wind harmonics mitigation (LOWHarM)-final summary report[R/OL]. (2019-10-30) [2025-08-04]. https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/613/5d4/e41/6135d4e412485508377080. pdf.

[24] WU D, SEO G S, XU L, et al. Grid integration of offshore wind power: standards, control, power quality and transmission[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2024, 5: 583-604.

[25] YIN S L, SUN Y Y, XU Q S, et al. Multi-harmonic sources identification and evaluation method based on cloud-edge-end collaboration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 156: 109681.

[26] 汪颖，罗代军，肖先勇，等. 超高次谐波问题及其研究现状与趋势[J]. 电网技术，2018，42(2)：353-365.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Review and development tendency of research on 2~150 kHz supraharmonics[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 353-365.

[27] HU Z, HAN Y, ZALHAF A S, et al. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 218: 109234.

[28] EBERT S, SILL F, DIEDERICHS J. Extruded XLPE DC underground-cable technology and experiences up to 525 kV—a key building block for the German "Energiewende"[C]//VDE High Voltage Technology 2016；ETG-Symposium. Berlin, Germany: VDE, 2016: 1-6.

[29] FRANCISCO E, CRUZ J, SILVA J, et al. External conductive layer on EDP medium voltage underground cables leads to new oversheath requirements[J]. CIRED, 2017, 2017(1): 163-165.

[30] PODKORITNIK S, ZIMA N. On-site tests after installation of 110 kV cable systems[C]//2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika). Pilsen, Czech Republic: IEEE, 2020: 1-6.

[31] 梁国华. 110 kV 交联电缆外护层制造新工艺[J]. 电线电缆，2006(3)：15-16，19.
LIANG Guohua. A new process to make the outer sheath in 110 kV XLPE cables[J]. Electric Wire & Cable, 2006(3): 15-16, 19.

[32] 丁剑，郭强，潘国梁，等. 超高压电缆护套外表面高分子耐磨导电涂层制备与性能研究[J]. 润滑与密封，2007，32(7)：38-41.
DING Jian, GUO Qiang, PAN Guoliang, et al. The preparation and properties of conductive and wear resistant polymer coatings on insulated layer of super-high voltage cable[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 38-41.

[33] 赖胜杰，夏成军，池梓斌，等. 考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析[J]. 高电压技术，2024，50(2)：765-774.
LAI Shengjie, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Calculation and analysis of circulating current in metal sheath for HV cable considering leakage current and interlayer coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 765-774.

[34] 陈晓儒，黄龙毅，赖胜杰，等. 高压电缆护套环流泄漏电流分量的分析与计算[J]. 电气传动，2024，54(3)：23-29.
CHEN Xiaoru, HUANG Longyi, LAI Shengjie, et al. Analysis and calculation for leakage current component of circulating current in high voltage cable sheath[J]. Electric Drive, 2024, 54(3): 23-29.

[35] 杜林，张科，冯辉，等. 计及趋肤效应的套管载流结构损耗分析[J]. 电工技术学报，2023，38(17)：4746-4756.
DU Lin, ZHANG Ke, FENG Hui, et al. Analysis on active power loss of bushing conductor considering skin effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4746-4756.

[36] 程晨，位金辉，傅中，等. 谐波环境下交流高压电缆温升与损耗仿真研究[J/OL]. 电气工程学报，2025，1-11[2025-09-08]. https://link.cnki. net/urlid/10.1289. TM. 20250624.1729.004.
CHENG Chen, WEI Jinhui, FU Zhong, et al. Simulation study on temperature rise and loss of AC high voltage cables under harmonic environment[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 1-11 [2025-09-08]. https://link.cnki.net/urlid/10.1289.TM. 20250624.1729.004.

[37] 黄艺英，曾江. 基于有限元法的谐波作用对电缆及其接头的影响研究[J]. 电测与仪表，2024，61(1)：52-58.

HUANG Yiying, ZENG Jiang. Research on the influence of harmonic action on cable and its joint based on FEM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 52-58.

[38] 中华人民共和国工业和信息化部. 电缆载流量计算：JB/T 10181—2014[S]. 北京：机械工业出版社，2015.
Ministry of Industry and Information Technology. Calculation of the current rating of electric cables: JB/T 10181—2014[S]. Beijing, China: China Machine Press, 2015.

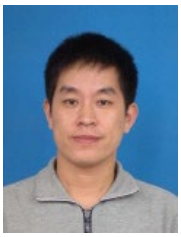
[39] 牛海清，陈泽铭，颜天佑，等. 基于文化基因算法的隧道多回路电缆优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2021，49(10)：141-150.
NIU Haiqing, CHEN Zeming, YAN Tianyou, et al. Optimization of tunnel multi-loop cable based on memetic algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(10): 141-150.

[40] 边晓燕，谌云峰，周歧斌，等. 基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J]. 高电压技术，2023，49(2)：793-802.
BIAN Xiaoyan, CHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 793-802.



王跃新
1999—，男，博士生
主要从事电缆多物理场仿真计算、电缆电磁环境方面的研究
E-mail: w1104141754@163.com

WANG Yuexin
Ph.D., candidate



杜志叶(通信作者)
1974—，男，博士，教授，博导
主要从事多物理场耦合仿真计算、电力系统电磁环境、特高压直流关键技术、智能电气设备等方面的研究
E-mail: duzhiye@126.com

DU Zhiye
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-07-01　在线出版日期　2025-10-17　　编辑　程子丰