

核电厂500 kV GIL和高压电缆选择

景 影, 徐 奔

(中国核电工程有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 核电厂以发电机-变压器组单元接线升压接至厂内500 kV主开关站, 通过厂内500 kV主开关站接入当地电网。其中, 主变压器与500 kV主开关站的连接有多种方式可以选择。随着500 kV高压电缆技术日趋成熟, 应用愈加广泛, 根据收集的现场经验反馈及设备资料, 对核电厂采用500 kV气体绝缘管道母线(GIL)和500 kV高压电缆两种连接方式进行详细比较说明, 在技术、经济方面给出选择建议。
关键词: 500 kV高压电缆; 500 kV GIL; 主变压器进线

Selection of 500 kV GIL and high-voltage cables for nuclear power plant

JING Ying, XU Ben

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Hebei Branch, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The nuclear power plant is connected to the 500 kV main switch station through the connection of the generator-transformer unit, and then connected to the local power grid through the 500 kV main switch station. There are multiple ways to connect the main transformer to the 500 kV main switch station. With the increasing maturity and widespread application of 500 kV high-voltage cable technology, this article provides a detailed comparison and explanation of two connection methods for nuclear power plants: 500 kV Gas Insulated Line (GIL) and 500 kV high-voltage cable, based on collected experience feedback and equipment data. Technical and economic recommendations are given for selection.

Keywords: 500 kV high-voltage cable; 500 kV GIL; main transformer connection

0 引言

大型发电机组500 kV主变压器进线方案一般采用500 kV架空线、500 kV气体绝缘管道母线(GIL)及500 kV高压电缆三种方案。500 kV架空线方案是目前国内600 MW级、1 000 MW级大型常规燃煤火电厂常用方案; 500 kV GIL是目前国内核电厂常用方案; 500 kV高压电缆是大型水电厂、海上风电常用方案。随着制造技术及国产化率的提高, 500 kV高压电缆方案目前在城市电网^[1]、海底电网使用率大幅提高, 在核电厂已经有使用案例, 但还没有广泛应用。

随着500 kV高压电缆技术日趋成熟, 应用愈加广泛, 本文根据收集的现场经验反馈及设备资料, 对采用500 kV GIL和500 kV高压电缆两种连接方式进行详细比较说明, 为核电厂主变压器进线方式提供多样化的选择^[2]。

1 技术介绍

1.1 500 kV GIL

GIL起源于20世纪70年代, 并经历数次技术换代, 逐渐变得成熟可靠, 在全世界范围内运行案例丰富, 目前是国内核电站应用最普遍的主变压器进线方案。GIL具有许多显著的优点: 输电

传输容量特别大；热能和电能损耗很少，节能效果好；无电磁干扰，辐射低，不影响无线通信；防护性能好，维护量少，故障率低；抗冰雪和地震等灾害能力强，防火性能优良，安全可靠；使用寿命长等^[3]。但近年来包括核电厂在内的运行问题反馈较多^[4]。特别是设备安装及运行中，因设备温度变化导致出现热胀冷缩及安装误差等情况，存在运行故障隐患。

《南方电网公司反事故措施（2019版）补充条款》中曾提出“鉴于目前GIL设备运行发现问题较多，新建工程（未投运工程）应审慎使用GIL设备，若必须使用GIL设备，应对其安装空间、电磁环境、地形条件、环境条件、传输损耗等要求的必要性进行充分论证。”

1.2 500 kV高压电缆

500 kV高压电缆于1975年在日本问世^[5]。20世纪70年代末，意大利、美国等国家也着手开发750 kV及以上电压等级的特高压电缆。1988年，由日本研制的500 kV交联聚乙烯（XLPE）电缆问世，实现了电缆“无油化”的要求。1993年，日本开始长距离500 kV XLPE电缆的商业应用，如东京湾的新京叶工程和大阪、名古屋的城网工程。在欧洲，继丹麦的哥本哈根环网电缆工程之后，德国柏林的BAWAG也在建设420 kV XLPE电缆环网。

我国超高压电力电缆研究尽管起步较晚，但发展进程很快，至20世纪90年代的天荒坪已开始选用了XLPE电缆。2009年，海南联网500 kV海底电缆敷设成功，是我国第一条超高压、大容量、长距离的跨海联网工程，属亚洲首创、世界第二。2010年，上海世博会500 kV静安变电站输电线路全程采用了500 kV电力电缆，标志着我国500 kV超高压电缆在城市电网已进入实施阶段^[6]。500 kV高压电缆在我国电力领域的应用同样有着丰富的经验和可靠的运行业绩。

除了在大型水电厂、城市电网、海底输电及海上风电项目上的广泛应用外，在我国核电建设领域，500 kV高压电缆已有核电供货及运行案例。福清核电站1、2号机组主变压器进线采用

500 kV高压电缆，该电缆为日本进口充油电缆，自2013年投运以来运行良好；华龙一号机组海外首堆巴基斯坦卡拉奇核电站主变压器进线采用500 kV高压电缆，该电缆为国内生产干式交联电缆（XLPE），自2021年投运以来运行良好。

1.3 500 kV架空线

500 kV架空线路暴露在大气中，为保证各种运行工况下的带电距离，出线走廊至少需要占用50 m的空间，且需要考虑倒塔对周围建构物的影响；运行过程中，线路长期受大气环境影响，可能发生雷击、污闪、覆冰等故障。若厂区内有多台机组及其配套的辅助、附属设施，在厂区布置十分紧凑的情况下，将不具备架空线布置条件。

500 kV架空线方案受厂区布置局限影响很大，不具有普适性，本文不再详细分析说明。

2 方案选择

2.1 厂区总平面布置

以建设两台压水堆核电机组单堆布置开展总平面布置为例。两台机组主变压器至主开关站的进线均采用地下廊道方式布置。

2.2 500 kV GIL

GIL是以SF₆等气体为绝缘介质，采用金属封闭外壳的电力传输设备，也是与GIS同步研发的成熟技术。GIL与GIS母线相比，标准单元长度和标准气室长度更长，安装允许土建误差更大，弯管段角度更广，大修的时间周期也更长，维护较简单。GIL在全世界电力行业内有50年以上的制造和运行经验，安全可靠，目前是我国核电领域应用最普遍的主变压器进线方案^[7-8]。

GIL主要电气特性如下：

- 1) 电阻损耗低，500 kV常用导体截面积1 300 mm²（外径280 mm、壁厚16 mm）。
- 2) 电流大，范围为2~8 kA。
- 3) 介质损耗低，SF₆绝缘几乎没有明显介质损耗。
- 4) 电容小，500 kV GIL电容约为50 pF/m，XLPE电缆约为170 pF/m。

5) 壳体的屏蔽效果好, 对外界电磁环境影响小。

GIL一般采用分相式, 外径为 $\Phi 650$ mm左右同轴圆柱绝缘结构, 具有体积小、安装布置灵活的优点。500 kV GIL主要有两种安装方式, 即架空管架安装和地下管廊安装。架空管架安装由于受外界环境影响, 雨淋日晒, 盐雾腐蚀严重, 对壳体防护等级及防腐措施要求高, 母线支架的土建造价也较高, 故核电厂应用推荐采用地下管廊安装方式。

500 kV GIL与主变压器连接采用油气套管直连方式, 在主变压器平台处设地下管廊, 每回主变压器进线所需地下管廊主体尺寸为 $4\ 800\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm}$ 。GIL母线段结构如图1所示。500 kV GIL及地下廊道断面如图2所示。

500 kV GIL结构复杂, 受现场安装、运输影响, 需要分段制造; SF_6 气体隔室较多, 段间连接准确度要求高, 现场试验工作量大; GIL导体及外壳均为硬金属, 对廊道不均匀沉降要求高, 抗振性能差; 因此导致现场安装复杂、施工周期长。项目投产后还需要有 SF_6 气体运行参数监测、水分检测和补充 SF_6 气体等运维工作。GIL在发生故障时抢修困难, 修复时间较长, 停电损失较大。

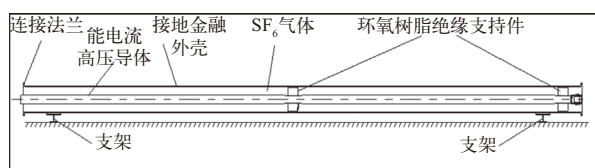


图1 GIL 母线段结构

Fig. 1 GIL structure

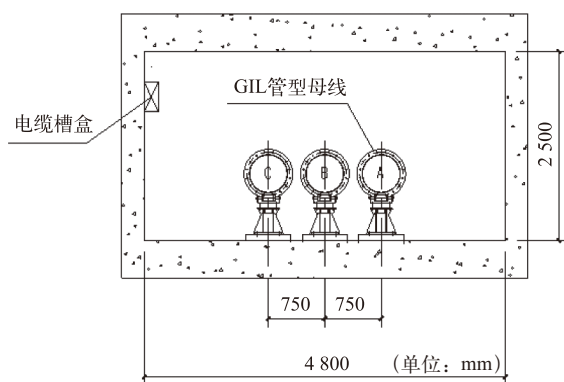


图2 500 kV GIL 及地下廊道断面图

Fig. 2 500 kV GIL underground gallery section drawn

2.3 500 kV高压电缆

500 kV高压电缆分为两类, 即干式和充油式。充油式电缆因防火要求高、运行维护困难和施工要求高, 而逐步被干式电缆替代^[9]。干式电缆根据绝缘材料的不同, 分为交联聚乙烯绝缘电缆 (XLPE) 和低密度聚乙烯绝缘电缆 (LDPE) 两类。本次比较采用500 kV XLPE电缆, 采用地下电缆隧道敷设^[10], 每回主变压器进线所需电缆隧道主体截面尺寸为 $2\ 200\text{ mm} \times 2\ 000\text{ mm}$, 断面图如图3所示。

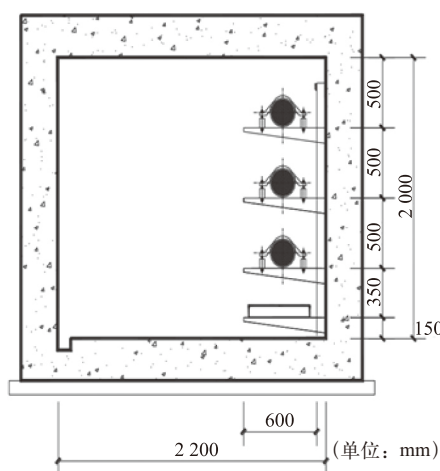


图3 500 kV 电缆及地下廊道断面图

Fig. 3 500 kV cable underground gallery section drawn

500 kV高压电缆为整根制造, 具有一定的柔韧性, 敷设时基本不受路径角度限制, 对廊道不均匀沉降要求小, 抗振性能好。由于电缆外形尺寸和重量较小, 整根电缆卷在一个电缆盘上安装和运输, 仅电缆终端需在现场制作, 所以安装比较方便, 施工周期短, 电缆投运以后几乎不需进行专门的运行维护工作。

目前国内500 kV高压电缆线路运行质量总体稳定。据国网、南网统计, 高压电缆附件故障占所有电缆故障的70%。相对而言, 电缆本体出现故障概率较小。

500 kV高压电缆线路长度在 $400 \sim 1\ 100\text{ m}$ 之间, 根据国内电缆制造厂的生产能力, 500 kV高压电缆可以大长度制造, 不需要用中间接头; 为防止电缆终端故障, 在电缆线路两端的电缆终端处需要预留一定长度的电缆, 一旦电缆终端出现重大故障, 可用预留的电缆快速更换电缆

终端。

2.4 厂址条件

考虑500 kV GIL及高压电缆方案规划结构尺寸、荷载及对沉降的敏感性，GIL廊道地基处理费用较高，高压电缆廊道方案地基处理费用较低。

3 更换与维修

3.1 故障抢修

500 kV高压电缆故障大致分为两类：①电缆附件故障，抢修方案及所需周期见表1；②电缆本体故障，抢修方案及所需周期见表2。

表1 电缆附件故障抢修

Tab. 1 Cable accessories fault repair

序号	故障部位	电缆是否有裕长	抢修方案	最快抢修周期 / 天	
				有备品	无备品
1	电缆终端	有余长	移动电缆就位 + 安装 1 个新终端	17	90+17
2	电缆终端	无余长	新电缆敷设 + 安装终端 + 安装 1 个中间接头	19	无电缆时：50+19 无附件时：90+19
3	中间接头	有余长	移动电缆就位 + 安装 1 个中间接头	7	无附件时：90+7
4	中间接头	无余长	新电缆敷设 + 安装 2 个中间接头	19	无电缆时：50+19 无附件时：90+19

表2 电缆本体故障抢修

Tab. 2 Cable fault repair

序号	故障部位	电缆是否有裕长	抢修方案	最快抢修周期 / 天	
				有备品	无备品
1	电缆附件附近	有余长	切除故障电缆及附近附件 + 移动电缆就位 + 安装 1 个附件	14	90+14
2	电缆附件附近	无余长	切除故障电缆及附近附件 + 新电缆敷设 + 安装 2 个附件	17	无电缆时：50+17 无附件时：90+17
3	电缆长度中间位置	有余长	移动电缆就位 + 安装 1 个中间接头	14	无附件时：90+7
4	电缆长度中间位置	无余长	切除故障电缆 + 新电缆敷设 + 安装 2 个中间接头	19	无电缆时：50+19 无附件时：90+19

表1及表2给出的是电缆故障抢修所需要的时间，其中包括电缆敷设所需要的施工周期。考虑到核电停机损失较大，如果要进一步缩短抢修时间，可以增加一根500 kV备用相电缆，与其他工作电缆一起敷设，库房内预留备用电缆附件，这样可以减少电缆敷设工作消耗的时间，若有备用相电缆，可在8~10天完成故障相与备用相切换。

500 kV GIL结构相对较复杂，故障排除所需要的时间，与故障位置的母线结构、气室大小、有无合适的备件都有关系，不确定条件较多，GIS制造商反馈不同条件下的故障排除所需时间为7~45天。

3.2 寿命到期更换

500 kV高压电缆目前的设计使用寿命为30年（海缆为40年），在核电60年设计寿命的周期内，需要进行一次整体更换，可利用机组停堆换料的时间更换。

GIL设计使用寿命为25~40年，对于国内核电厂，在按期进行检修维护的条件下，制造商普遍能够满足主体结构60年使用寿命的要求，这期间部分二次元件及设备需要多次更换，更换成本预计占设备投资的10%左右。

值得注意的是，包括缆芯在内，500 kV高压电缆结构中有大量可回收材料，占电缆制造成本的

50%左右。由于初始投资降低、旧电缆材料回收以及电缆制造工艺进步使得造价不断下降等因素，30年后电缆整体更换的经济比较并不只是单纯的投资增加，其经济性从设计角度难以准确考量。

4 经济性

针对上述方案，经咨询国内主要设备供货商，进行了初步的经济比较。主要边界条件如下：

- 1) 500 kV管道母线方案均按照4 000 A、63 kA/2 s选择，此为管道母线最小规格。敷设方式按照地下廊道方案。
- 2) 500 kV高压电缆方案均按照XLPE型选择；考虑到主变压器进线的重要性，为保证

500 kV高压电缆运行的安全性和可靠性，以及后期运行维护的便利性和可更换性，敷设方式按照地下廊道方案。

- 3) 500 kV高压电缆按照热负荷消减后机组出力1 200 MW选择，电缆截面积选择为2 500 mm²、63 kA/2 s。考虑电缆敷设系数，电缆长度按照高压电缆廊道长度的1.1倍估算。
- 4) 立足于设备国产化，500 kV GIL及500 kV高压电缆均按国内生产厂家进行询价，500 kV高压电缆附件因国内尚无供货经验，所以按照国外厂家询价。
- 5) 土建部分造价考虑建筑工程综合造价。两个方案初始投资估算见表3。

表 3 初始投资估算表
Tab. 3 Investment estimation

序号	项目	型式及规范	数量	估价 / 万元	
				单价	总价
一、500 kV 高压电缆					
1	500 kV 交联聚乙烯电缆 /m	500 kV，XLPE 单相，2 500 mm ² ，63 kA/2 s	1 485	0.4	594
2	500 kV GIS 电缆终端 / 个	550 kV，干式	12	40	480
3	500 kV 高压电缆沟道 /m	2 m 宽，2 m 深	450	1.43	643.5
4	安装费	按照设备造价的 15% 计取			150
	合计				1 867.5
二、500 kV GIL					
1	500 kV GIL/m	550 kV，4 000 A，63 kA/2 s	1 350	1.1	1 485
2	500 kV GIL 终端 / 个	550 kV	12	40	480
3	管道母线地下管廊 /m	4.8 m 宽，2 m 深	450	3.51	1 579.5
4	安装费	按照设备造价的 30% 计取			650
	合计				4 194.5

表3中500 kV高压电缆及管道母线投资估算均为国产化报价，不包括500 kV高压电缆备用相投资。可以看出，若采用500 kV GIL方案，初始投资比500 kV高压电缆方案高。

5 综合对比

两种方案的各项参数综合对比见表4。

6 结束语

对于核电项目来说，500 kV GIL与500 kV高压电缆两种方案均可行。

500 kV高压电缆和电缆终端运行寿命较短，核电运行周期内需更换电缆和电缆终端，电缆故障需更换整条电缆，恢复时间较长；但在电缆敷设距离较长的情况下，使用500 kV高压电缆有显著经济性优势，此种情况下，推荐采用500 kV高压电缆。随着500 kV高压电缆产品材料进步、制造工艺成熟性提高，500 kV高压电缆及附件一体化敷设、安装技术愈发完善，确保了安装质量，其在核电工程领域应用会日趋广泛。

表 4 综合对比

Tab. 4 Comprehensive comparison

方案	项目	500 kV 高压电缆	500 kV GIL
技术比较	安全性	早期的 500 kV 高压电缆采用充油电缆存在火灾隐患风险；目前均采用交联电缆，安全性大幅提高	因 SF ₆ 气体在强电场下有分解为有毒气体的可能性，在发生泄漏或外力破坏后，需进行通风处理
	可靠性	目前国内 500 kV 高压电缆线路运行质量总体稳定，据国网、南网系统统计，高压电缆附件故障占所有电缆故障的 70%。相对而言，电缆本体出现故障概率较小	从核电厂运行经验反馈来看，GIL 存在外壳锈蚀、局部放电等缺陷
	运行管理	运行管理简单、方便	运行管理复杂
	维护检修	电缆投运以后不需进行专门的维护工作，检修工作量较小	因结构复杂，检修周期长，维修工作量大。需定期维护，备品备件多，检修工作量大。如某核电厂由于 GIL 故障，导致停机半年检修
	施工安装	施工安装比较方便，周期短	施工安装周期长，技术要求高 对于高温堆机组，由于母线廊道距离超过了 1 km，使得施工安装更加复杂
经济比较	试验	电缆本体在出厂前已经过严格的出厂试验，在现场与附件连接后需做直流耐压试验（日本标准）或只做护层耐压试验（法国标准），直流试验电压相对较低，试验设备容量相对较小。现场试验简单	GIL 各组件在现场连接完成和充气后，投运前必须进行交流耐压试验，耐压值为 75% ~ 80% 的工厂试验电压值。由于母线长、电容电流大，所需试验设备的容量也大。现场需配备试验设备。现场试验复杂。对于高温堆机组，由于母线廊道距离超过了 1 km，现场需要配套超常规的试验设备
	初始投资	项目初始投资低	项目初始投资高
停电损失		电缆本体或电缆终端故障，现场抢修周期 10 ~ 15 天。为缩短检修周期，可采取在电缆厂家设置备用电缆终端，现场廊道内设置备用相，抢修周期可缩短到 8 ~ 10 天	管道母线由多个单元段组成，一般 6 ~ 10 m 一段，结构复杂，元器件多，故障几率较电缆高。任何一个单元段故障，均需停电检修。根据调研，检修时间短则 7 天，长则 45 天以上

参考文献

[1] 王卿玮, 叶键民, 叶剑. 城网 500 kV 电缆与气体绝缘金属封闭输电线路操作过电压计算分析及比较[J]. 电力与能源, 2021, 42(6): 622-625.

[2] 徐劲松, 姚明. 35 kV GIL 通管采用电缆替代技术研究[J]. 华东电力, 2007, 35(10): 81-84.

[3] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路 (GIL) 的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.

[4] 王典浪, 曹鸿, 李国良, 等. 500 kV GIL 三支柱绝缘子隐患分析及整治[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 195-203.

[5] 杨东. 500 kV 国产 XLPE 电缆选型及应用实践[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(6): 113-116.

[6] 田诗语, 卢奕城. 500 kV 电缆纳入城市综合管廊的应用研究[J]. 电工技术, 2019(8): 58-59.

[7] 尚涛, 李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 81-84.

[8] 龙伟军. GIL 设备在火力发电厂中的应用分析[J]. 科技创新与应用, 2013, 27: 176.

[9] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.

[10] 徐霞, 王斌. 电力隧道内长距离 500 kV 电缆敷设设计[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 529-532.

作者简介

景影（1992—），女，工程师，研究方向为机电工程。

（收稿日期：2025-06-30）