

分布式光伏电站接入油田电网稳定性分析

黄涵¹ 成后炉² 金燕波³ 余简波¹

1 中国石化江汉石油管理局有限公司水电分公司, 湖北潜江, 433124;

2 中国石化江汉油田石油工程技术研究院, 湖北武汉, 430040;

3 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司双碳行动部, 湖北潜江, 433124;

摘要: 针对油田光伏并网容量增加可能引发的电网稳定性问题, 通过 ETAP 仿真平台构建油田电网模型, 并仿真分析电网潮流、短路特性、电能质量及光伏电站并网/切除瞬间的稳定性。通过模拟分析表明, 以目前油田光伏的接入容量, 光伏电站的运行不会影响油田电网的稳定性。

关键词: 光伏; ETAP; 油田电网; 电网稳定性

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.081

引言

“十四五”期间, 随着“双碳”政策逐步落地, 江汉油田提出了新能源、绿色低碳与传统产业融合发展的新要求。光伏发电作为一种绿色、可再生的能源形式, 近年来得到了迅猛发展。

对于油田企业而言, 生产过程中消耗大量电力, 且油区分布广泛、用电负荷分散。将分布式光伏接入油田电网, 不仅有助于油田优化自身能源结构, 减少对传统电网供电的依赖, 降低用电成本, 实现能源供应的多元化与可持续发展, 而且能够充分利用油田的闲置土地、井场等资源, 实现资源的有效利用, 契合油田绿色低碳发展的战略需求。随着油田光伏接入电网的容量不断增加, 当前针对分布式光伏接入油田电网稳定性研究相对不足, 如何使分布式光伏更好地适应油田电网的特殊需求, 确保油田电网在接入分布式光伏后的安全稳定运行, 是亟待深入研究的课题, 这也正是本文的研究切入点。

1 光伏电站与油田电网概述

1.1 光伏电站介绍

2020年以来, 江汉油田共组织建成光伏发电站46座, 总装机规模达107兆瓦, 历年累发绿电超1.8亿千瓦时, 减少碳排放超10万吨, 为企业高质量绿色发展提供了有力支撑。其中江汉油区并网光伏电站95MW, 110kV某枢纽变电站接入光伏31MW, 35kV侧接入20MW, 6kV侧接入接入11MW, 光伏电站均按照自发自用的模式运营。

1.2 油田电网分析

1.2.1 电网构架与布局

江汉油田电网始建于20世纪60年代末, 经过不断

的发展, 电网涵盖了多个电压等级, 包括110kV、35kV、6kV及0.4kV等。其中110kV和35kV电压等级主要用于电力的传输和分配, 将外部电网的电能引入油田区域, 并在油田内部进行高压输电; 6kV电压等级则作为配电网的主要电压等级, 负责将电能分配到各个采油站、注水站、联合站等生产场所; 0.4kV电压等级用于直接为油田的各类低压用电设备供电。

在电网结构方面, 油田电网采用放射状或树状结构, 以某一终端变电所母线为电源点, 通过多条配电线路向各个用电区域成放射状供电。随着油田的开发和生产规模的扩大, 油田电网的规模也在不断延伸和扩展, 导致网架结构较为复杂, 部分区域存在线路迂回、供电线路长等现象, 影响了电网的运行效率和可靠性。

1.2.2 负荷特性分析

江汉油区用电负荷主要由盐卤化工和油气生产两大板块构成, 其中盐卤化工用电量约7亿千瓦时左右, 其用电负荷受市场供需变化、生产装置周期性检维修等因素影响呈现一定波动特性, 而油气生产等工业负荷则相对平稳。

江汉油区由于光伏发电全额消纳, 油田电网与国网结算关口用电负荷呈现“午谷晚峰”曲线分布, 日间负荷因光伏出力的不确定性呈现一定的波动性。

2 分布式光伏接入对油田电网稳定性的影响

2.1 电压稳定性

分布式光伏的出力波动是导致油田电网电压波动的关键因素之一。其发电功率与光照强度、温度等气象条件密切相关, 具有显著的间歇性和随机性。在晴天, 随着太阳高度角的变化, 光照强度不断改变, 分布式光伏的输出功率也会随之快速波动。当云层快速移动遮挡

阳光时，光伏板接收的光照强度瞬间减弱，输出功率会急剧下降；而当云层移开，光照强度增强，功率又会迅速上升。这种频繁的功率波动会导致电网中的电流发生变化，根据欧姆定律 $U=IR$ ，电流的变化会引起线路电压降的改变，从而导致电网电压波动。

分布式光伏的接入位置对电压波动也有重要影响。若接入点位于电网的末端或远离电源的薄弱区域，由于该区域的电网阻抗相对较大，分布式光伏输出功率的变化会在较大的阻抗上产生明显的电压降变化。

2.2 对电气设备的影响

电压不稳定会对油田电气设备的寿命产生负面影响。长期处于电压过高或过低的环境中，电气设备的绝缘性能会受到损害。当电压过高时，电气设备的绝缘材料会承受过高的电场强度，加速绝缘老化，缩短设备的使用寿命。以油田中的变压器为例，正常运行时其绝缘材料能够承受额定电压的作用，但当电压偏差超过一定范围，如持续高于额定电压 10%时，绝缘材料的老化速度会加快，可能导致变压器内部绕组短路、绝缘击穿等故障，使变压器提前损坏。

2.3 频率稳定性

分布式光伏接入后，对系统功率平衡产生重要影响，进而引发频率波动。传统电网中，频率主要由同步发电机的转速决定，当系统负荷与发电功率保持平衡时，频率能够维持在稳定的额定值。然而，分布式光伏的输出功率具有随机性和间歇性，其发电功率难以与油田电网的负荷需求实时匹配。在阴天或傍晚时分，光照强度减弱，分布式光伏的输出功率迅速下降，而此时油田的生产负荷可能并未发生明显变化，导致系统发电功率小于负荷需求，出现功率缺额。为了维持系统功率平衡，大电网中的同步发电机需要增加出力，这会导致发电机转速下降，进而使电网频率降低。相反，在光照充足且负荷较低的时段，分布式光伏输出功率可能大于负荷需求，多余的功率会使电网频率上升。

2.4 谐波问题

分布式光伏系统中的逆变器是产生谐波的主要来源。逆变器在将光伏板输出的直流电转换为交流电的过程中，采用了脉冲宽度调制（PWM）等电力电子技术。这些技术通过控制功率开关器件的快速通断来实现交直流转换，但在开关过程中，会使输出电流和电压的波形发生畸变，产生大量的谐波。

光伏阵列本身也可能产生谐波。在实际运行中，由于光伏板的特性差异、光照不均匀以及部分遮挡等因素，

会导致光伏阵列的输出电流不一致，从而产生谐波。

3 基于 ETAP 软件的稳定性分析

3.1 ETAP 软件功能介绍

ETAP 软件是一款功能强大的电力系统分析与仿真软件，在电力系统领域应用广泛。它具备全面的潮流计算功能，能够准确计算电力系统在各种运行工况下的电压、电流、功率分布等参数，通过对潮流的分析，可以评估电网的运行状态，判断是否存在线路过载、电压越限等问题。在暂态稳定分析方面，ETAP 软件可以模拟电力系统在遭受短路故障、负荷突变、发电机跳闸等大扰动时的暂态过程，分析系统的暂态稳定性，研究发电机的功角稳定性、电压稳定性以及频率稳定性等，为电网的安全稳定运行提供重要依据。

ETAP 软件的光伏发电系统模块，核心由光伏阵列与逆变器两部分构成，具备高度贴合工程实际的灵活配置能力。该软件内置强大的光伏电池数据库，支持用户结合项目需求，直接从设备库中选取适配的光伏电池与逆变器型号。用户可根据太阳能电池阵列的实际输出总功率，灵活设计光伏电池的串并联组合方案。

3.2 分布式光伏接入油田电网的模型构建

3.2.1 分布式光伏模型参数设置

在构建分布式光伏模型时，需精准确定关键组件的参数。光伏电站数据的录入包括 PV 板的功率、电压、电流、串联数、并联数、逆变器、环境参数等，通过输入不同的数据，可以模拟不同串并联组合的阵列输出特性，优化光伏站场布局，输入不同季节、时段的辐照度数据，模拟光伏并网后对电网潮流分布、电压稳定性的影响；通过暂态仿真，分析系统动态稳定性等。

3.2.2 油田电网模型搭建

依据油田实际电网的详细资料进行模型搭建。系统设备包括：变压器、传输线路、电缆等，其参数一般从设备名牌、厂家标准数据以及安装、施工和试验记录中获得。上级等效电网的实际运行电压和短路容量，从电网公司获得相关的参数，电力系统潮流计算的平衡节点选在与主网的连接点。

3.3 稳定性分析

3.3.1 潮流分析

对油田电网接入光伏电站后进行潮流分析，光伏电站接入后各母线电压、各线路电流均运行正常，未出现告警，其次是光伏接入后电网原有的潮流方向发生了改变，且在目前的负荷运行下，光伏电站所发的电量在该 110kV 变电站可以全部消纳，在光伏发电高峰期，负荷

小于光伏发电量时会出现弃光现象。

3.3.2 短路分析

经计算,光伏电站接入后,110kV母线短路电流为2kA,35kV母线短路电流为7.1kA,6kV母线短路电流为34.7kA,各电压等级设备短路容量可满足要求。

3.3.3 电能质量分析

接入电网后引起电网公共连接点的谐波畸变率以及向电网注入的谐波电流符合《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)规定。公共连接点的电压符合《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325-2008)规定,对

于20kV及以下三相供电电压偏差为标称电压的±7%,对于220V单相供电电压偏差为标称电压的+7%, -10%。利用ETAP软件,对光伏接入系统进行了模拟分析,模拟计算结果满足规范要求。

3.3.4 稳定性分析

对江汉油田110kV变电站35kV侧光伏电站接入和切除暂态过程进行分析计算,设置运行总时长为10s,在第5秒钟模拟光伏电站接入和切除的暂态过程,分析计算结果如图1、图2所示。

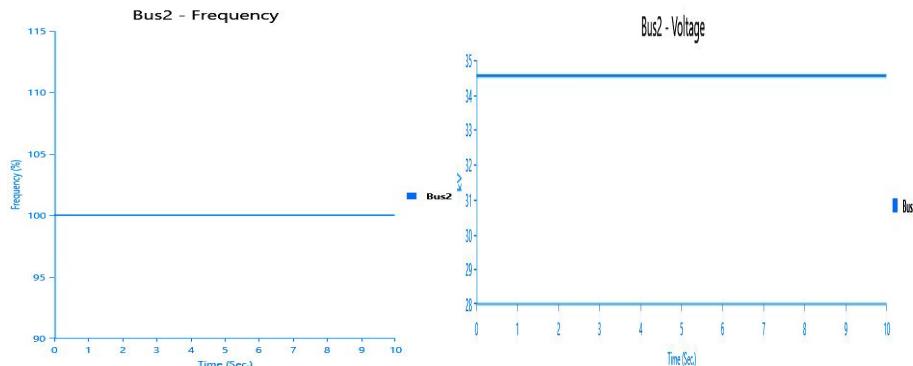


图1 暂态过程光伏接入计算结果

从图1中可以看出,在35kV侧光伏电站接入时母线电压、频率未发生变化,系统保持稳定。

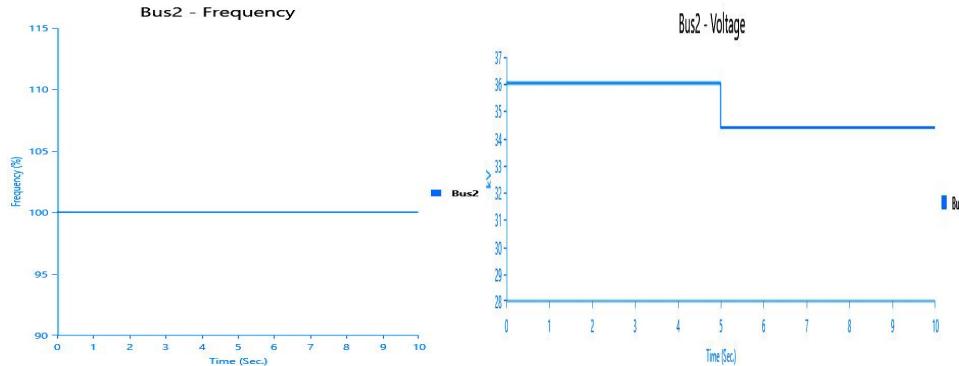


图2 暂态过程光伏电站切除计算结果

从图2可以看出,在35kV侧光伏电站切除时母线频率未发生改变,电压在切除的瞬间降低,但仍保持在电压偏差允许的范围内,系统保持稳定运行。

4 结语

本文针对分布式光伏电站接入油田电网后,对油田电网的稳定性问题进行分析,建立基于ETAP的光伏电站接入油田电网的模型,分析了光伏电站并网后对电网潮流、短路、电能质量及光伏电站并网/切除瞬间对电网的影响分析,结果表明:

(1) 在现有网架与负荷水平下,并入的分布式光伏全部自发自用,但在光伏发电高峰期,当发生负荷降低时,会出现弃光现象。

(2) 分布式光伏电站接入110kV变电站后,各电压等级母线潮流、短路容量、谐波与电压偏差均满足国标要求,光伏电站可自由并网/切除而不触发安稳装置动作。

参考文献

- [1] 王佳慧. 基于ETAP的分布式光伏发电系统仿真研究[J]. 建筑电气, 2025, 44(01): 19-25.
- [2] 桂峰. 基于ETAP的风电接入油田群电网暂态稳定性分析[J]. 化工管理, 2024, (36): 161-164.
- [3] 荆峰, 张利, 杜磊, 等. 光伏接入对胜利油田电网运行安全稳定性影响的研究[J]. 电气技术与经济, 2022, (03): 1-4.