



典型分布式光伏发电 工程电力系统接入的优化设计

■ 李晟^{1,2*} 吴江^{1,2} 朱军峰^{1,2}

(1. 中冶华天工程技术有限公司; 2. 中冶华天南京电气工程技术有限公司)

摘要: 以典型工程为例, 研究了合理优化配置分布式光伏发电系统并网点数量、容量, 以匹配生产负荷电力消纳特性的设计思路, 从而提高自发自用率, 增强经济效益; 并且提出了应将包含分布式光伏发电系统的企业配电网看作整体, 从全局上考虑系统的无功功率平衡问题, 以满足电网安全、调度、平衡的需要; 为自发自用分布式光伏发电工程电力系统接入设计提供了有益参考。

关键词: 分布式光伏; 就地消纳; 负荷分析; 无功平衡

0 引言

分布式光伏发电是指利用工商企业厂房屋顶或者厂区内其他空间资源, 装机规模一般较小, 发电单元布置在负荷侧, 通常是以 10 kV 及以下电压等级接入的光伏发电系统。典型的分布式光伏发电项目消纳模式采用“自发自用, 余量上网, 电网调节”, 从技术性来看, 既可以减少能源的传输损耗, 又能保证用户能源供给的稳定可靠; 从经济性来看, 由于政策的引导, 收益也高于“标杆电价”全额上网的消纳模式。得益于技术性和经济性的独特优势, 以自发自用为主的分布式光伏发电工程的投资建设及技术研究受到了极大关注, 该电力系统接入设计也取得了丰富的研究成果^[1-2]。

在很多研究和工程实践中, 往往将分布式光伏发电系统与其所依存的企业配电网相割裂, 忽视了分布式光伏发电系统与企业配电网之间的相

互影响和相互制约, 降低了光伏工程的经济效益和配电网安全。本文以典型分布式光伏发电工程为例, 在深入分析和研究企业配电网现状与特性的基础上, 提出了分布式光伏发电工程电力系统接入优化设计的思路和方法。

1 企业配电网情况分析

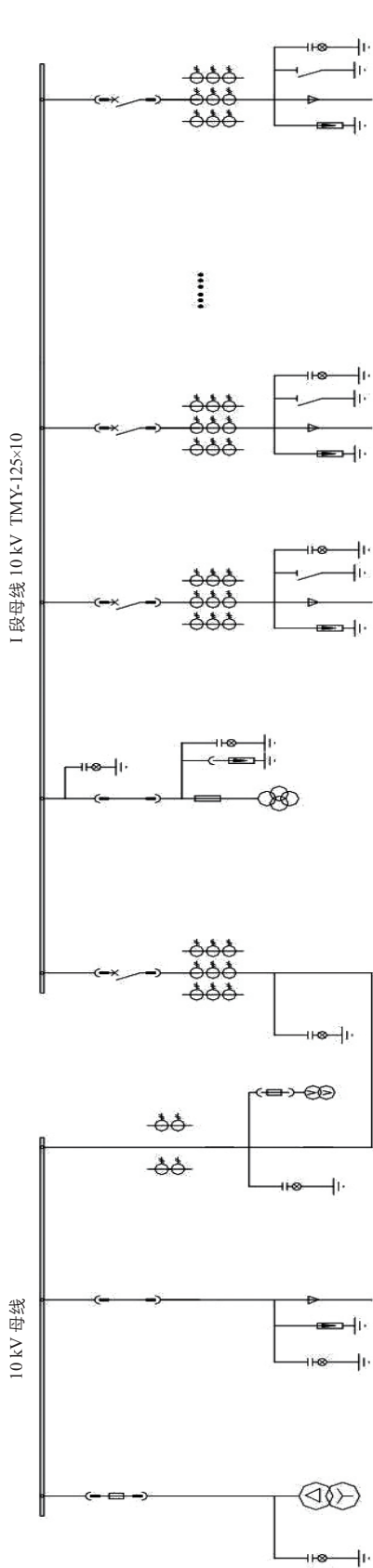
某汽车制造公司 10 kV 供电系统的电源来自上级 110 kV 变电站。厂区 10 kV 开闭所设置了 3 条独立母线, 不设母联。其中:

1) I 段母线电源由上级变电站 1F71 间隔引来, 该段母线设置 15 台配电设备, 主要供给焊装车间、总装车间、涂装车间、综合站房用电。I 段母线单线原理图如图 1 所示, II、III 段母线与之类似。

2) II 段母线电源由上级变电站 1F74 间隔引来, 该段母线设置 14 台配电设备, 主要供给焊

收稿日期: 2018-05-10

通信作者: 李晟 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事新能源、电能质量治理等方向的研究和工程设计。ls_view@163.com



编号	1AH1	1AH2	1AH3	1AH4	1AH5	1AH6	1AH7	1AH15
名称	所用变柜	10 kV 进线柜	10 kV 计量柜	10 kV 并网总柜	10 kV 母线设备柜	电容器组出线柜	出线柜	出线柜
柜型	中置柜	中置柜	中置柜	中置柜	中置柜	中置柜	中置柜	中置柜
主要设备参数	XNRT-12/31.5		CT: 600/5, 2 只		XNRP1-12/0.5	真空断路器 1250 A	真空断路器 1250 A	真空断路器 1250 A
	SC10-30/10	隔离手车 1250 A	0.2S/0.2S 级	真空断路器 1250 A	PT: 10 kV, 3 只	CT: 200/5, 3 只	CT: 200/5, 3 只	CT: 200/5, 3 只
	10/0.4 kV	YH5WZ-17/45, 5 kA	XNRP1-12/0.5	CT: 800/5, 3 只	(10/3)/(0.1/3)/(0.1/3)kV	0.2S/0.5/5P20 级	0.2S/0.5/5P20 级	0.2S/0.5/5P20 级
	D, yn11	DXN-12	PT: 10 kV, 10/0.1 kV	0.5/0.5/5P20 级	YH5WZ-17/45, 5 kA	YH5WZ-17/45, 5 kA	YH5WZ-17/45, 5 kA	YH5WZ-17/45, 5 kA
继保装置								
容量	30 kVA	10690 kVA				120 kVar(2 组 3 级, 450+750)	1600 kVA	
柜宽	800	800	800	800	800	800	800	800
备注						电容器组	焊装车间 AH1	备用

图 1 企业配电网 1 段母线单线原理图



装车间、总装车间、冲压车间、涂装车间、综合站房、高压空压机用电。

3) III段母线电源由上级变电站 1F75 间隔引来, 该段母线设置 13 台配电设备, 主要供给高压制冷机、焊装车间、涂装车间用电。但 III 段母线所接高压制冷机总柜 1AH1 负荷为 7158

kVA, 每年仅在夏季使用 5 个月左右, 为典型的季节性负荷。

根据负荷计算表和供电系统设计, 将各用电负荷计算参数分配至各条母线, 则 3 段母线的负荷计算数据(考虑了设备的利用系数、同时系数)如表 1 所示。

表 1 各段母线负荷计算数据

负荷参数	I 段母线	II 段母线	III 段母线	
			启用高压制冷机	停用高压制冷机
总设备装机容量 /kVA	11660	11693	11528	
视在功率 /kVA	7588	8038	8438	2204
有功功率 /kW	7057	7315	7172	2028
无功功率 /kVar	2789	3333	4445	864
计量点功率因数	0.93	0.91	0.85	0.92

考虑电气配电网在设计时, 负荷计算数据为最大生产率下的负荷工况, 而实际运行负荷应低于上述参数。假设实际运行时的有功功率为最大值的 70%, 则 I 段母线有功功率为 4940 kW, II 段母线有功功率为 5121 kW, III 段母线有功功率为 5020 kW(启用高压制冷机)和 1420 kW(停用高压制冷机)。

2 分布式光伏发电系统容量和发电功率预计

根据光伏可用空间面积和前期规划, 拟建分布式光伏发电系统总装机容量为 10 MW_p, 分为 9 个光伏发电单元; 每个单元的光伏阵列安装光伏组件约 1.11 MW_p, 每个单元配置 1 台 1 MW 集中式逆变器机房和 1 台箱式升压变压器。

根据项目所在地的太阳辐射数据, 一年中出现水平面辐射强度超过光伏组件标准测试条件要求的太阳辐射强度 1000 W/m² 的概率极少, 而光伏组件的容量都是按照标准测试条件标定的, 因此, 光伏发电系统的输出功率出现超发、满发的概率极低。即使短时太阳辐射强度达到了超发和满发的条件, 考虑到分布式光伏发电系统的一般系统转换率 (PR) 为 80% 左右, 则整个光伏发电系统的交流输出功率应在 8 MW 左右; 折算至每个发电单元, 最大交流输出功率约为 880 kW。

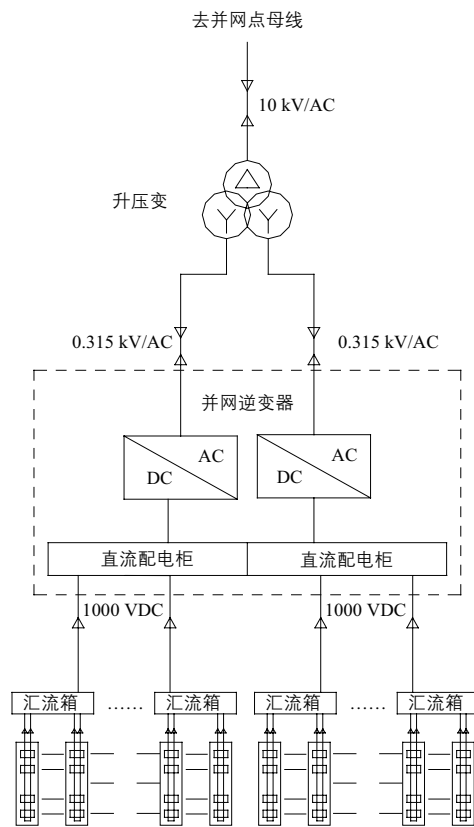
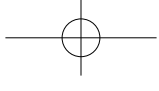


图 2 单个光伏发电单元的电气原理图

3 电力接入方案优化设计

3.1 并网点光伏装机容量分析

由于本项目的装机容量达到了 10 MW_p, 根据国家标准及国家电网公司的有关规范要求, 本



项目应采用 10 kV 电压等级接入企业配电网,并且设置不低于 2 个并网点,以满足单个并网点光伏装机容量不高于 6 MW 的要求^[3-4]。而企业配电网分为 3 段独立母线,具备设置 33 个光伏并网点的条件,因此,接入方案存在多种组合方式。在可能的组合方案中,必须考虑应满足如下几个前提:

1) 每个光伏并网点配置的装机容量必须固定,避免保护、调度系统调整参数,确保配电网的可靠性。

2) 考虑到在生产过程中可能出现负荷波动、特殊情况(如节假日、淡季时段、检修等)等主要生产负荷停用时段的情况,因此,并网点数目应尽可能多,以便在少量不停用负荷上得到尽可能多的消纳。

3) 在充分考虑了企业生产与用能特性的基础上,满足光伏电力最大比例的被生产负荷所消纳,尽量避免余电上网的情况。

表 2 为可选接入容量的匹配方案,并给出了 2 种方案的对比分析数据。

表 2 可选接入容量匹配方案

	并网点	I 段母线	II 段母线	III 段母线
	预计负荷有功功率 /kW	4940	5121	5020/1420
方案 1	光伏发电单元 / 个	3	3	3
	光伏装机容量 /kW _p	3333	3333	3333
	光伏最大输出功率 /kW	2666	2666	2666
	预期生产时段消纳比例	100% 就地消纳	100% 就地消纳	仅高压制冷机启用时可全部消纳
方案 2	光伏发电单元 / 个	4	4	1
	光伏装机容量 /kW _p	4444	4444	1111
	光伏最大输出功率 /kW	3555	3555	889
	预期生产时段消纳比例	100% 就地消纳	100% 就地消纳	100% 就地消纳

由于 III 段母线存在周期性负荷,其变化占比高达 72.69%,所以可以预期:如果采用方案 1,在周期负荷停用的时段内,该段母线上的光伏系统发电量至少有一半将不能实现自发自用。在相同的负荷工况下,若采用方案 2,通过合理调整各段母线并网点的光伏装机容量,各个并网点的理论自发自用率均可达到 100%,明显优于方案 1。

3.2 电力接入方案确定

根据上述比选分析,按照方案 2 给出的并网点光伏装机容量,依照国家电网公司发布的参考设计方案^[4],设计本分布式光伏发电工程的电力系统接入方案,如图 3 所示。

4 分布式光伏发电系统接入企业配电网后的无功平衡

一般情况下,由于光伏发电系统并网点处功

率因数接近 0.99,其输出功率绝大部分为有功功率,无功功率非常低。虽然可以通过调节控制参数,使光伏并网逆变器可输出一定的容性或感性无功功率,但这需要占用逆变器自身的输出能力,会降低发电效益。

在特定时间内,假定配电网中用电设备的有功负荷为 P ,无功功率为 Q ,此时光伏发电系统输出有功功率为 P_1 ,必然对配电网计量点(或者系统接入点, PCC) 处的功率因数存在影响^[5-6]。

光伏发电系统接入前的功率因数 ϕ 为:

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

光伏发电系统接入后的功率因数 ϕ_1 为:

$$\cos \phi_1 = \frac{(P - P_1)}{\sqrt{(P - P_1)^2 + Q^2}} \quad (2)$$

在忽略光伏发电系统输出的无功功率的情况下,结合表 1 和表 2 中的数据,可计算出光伏发

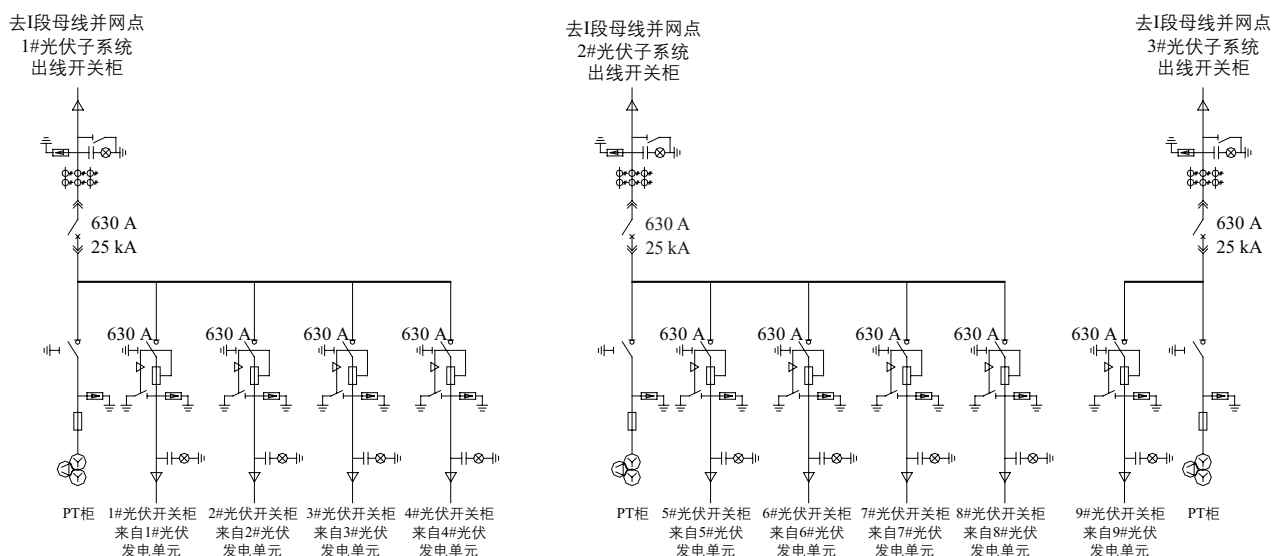
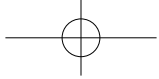


图 3 本分布式光伏发电工程的电力系统接入方案示意图

电系统接入后对配电网无功平衡的影响，具体数据如表 3 所示。

表 3 接入光伏发电系统前、后的计量点功率因数对比

负荷参数	I 段母线	II 段母线	III 段母线	
			启用高压制冷机	停用高压制冷机
总设备容量 /kVA	11660	11693	11528	
视在功率 /kVA	7588	8038	8438	2204
有功功率 /kW	7057	7315	7172	2028
无功功率 /kVar	2789	3333	4445	864
接入光伏发电系统前的计量点功率因数	0.93	0.91	0.85	0.92
光伏发电系统最大有功功率 /kW	3555	3555	889	889
接入光伏发电系统后的计量点功率因数	0.78	0.75	0.82	0.80

从表 3 数据可明显看出，接入分布式光伏发电系统后，对于配电网计量点而言，由于各段母线上负荷所需要的无功功率未发生改变，而光伏发电系统输出了大量有功功率，因此减少了负荷从电网中获得的有功功率，必然导致了计量点处功率因数的下降。

又由于光伏发电系统输出功率会随着光照情况而发生变化，生产负荷也会随着工况变化不断变化。针对这种情况，如果不在原有配电网增设合适容量的动态无功补偿装置，如静止无功发生器 (SVG) 装置，将会由于低功率因数问题导致企业需缴纳电网公司的低力率调整电费。

根据分析计算，本项目在 3 段母线上各设计

安装了 1 套 2 MVar 的 SVG 装置，并将配电网计量点功率因数作为控制目标，以满足配电网无功平衡的需要。

5 优化设计方案实际运行效果

根据项目并网运行一年的统计分析，由于合理匹配并网点的光伏装机容量，分布式光伏发电系统年平均自发自用率达到 90% 左右 (由于节假日及生产检修期间用电量较少，存在余电上网情况，因此必然低于生产时段的自发自用率)，取得了良好的经济和技术效益。同时，统计数据显示，系统月平均功率因数均高达 0.98，验证了企业配电网无功平衡问题已得到了良好的解决。(转第 6 页)



持下,研究论证本地区电网消纳新增并网风电的能力,以电网企业测算的消纳能力为上限合理控制新增并网风电装机规模,统筹已核准存量项目、新建平价上网风电项目及新增需补贴风电项目建设,提出2019年度风电建设实施方案,报国家能源局论证后有序组织建设。

请各省(区、市)能源管理部门切实落实有关要求,及时向我局报告预警机制落实情况。

附件:2019年全国风电投资监测预警结果

国家能源局
2019年3月4日

附件

2019年全国风电投资监测预警结果地区

地区	预警结果	备注	地区	预警结果	备注
北京	绿色		湖北	绿色	
天津	绿色		湖南	绿色	
河北	绿色	张家口市、承德市按橙色管理	广东	绿色	
山西	绿色	忻州市、朔州市、大同市按橙色管理	广西	绿色	
内蒙古	橙色		海南	绿色	
辽宁	绿色		重庆	绿色	
吉林	绿色		四川	绿色	
黑龙江	绿色		贵州	绿色	
上海	绿色		云南	绿色	
江苏	绿色		西藏	绿色	
浙江	绿色		陕西	绿色	
安徽	绿色		甘肃	红色	榆林市按橙色管理
福建	绿色		青海	绿色	
江西	绿色		宁夏	绿色	
山东	绿色		新疆(含兵团)	红色	
河南	绿色				

太阳能

(接第37页)

6 总结

本文以典型工程为例,研究了合理优化配置光伏发电系统并网点数量、容量,以匹配生产负荷电力消纳特性的设计思路,从而提高自发自用率,增强经济效益;并且提出了应将包含光伏发电系统的企业配电网看作整体,从全局上考虑系统的无功功率平衡问题,以满足电网安全、调度、平衡的需要。通过对分布式光伏发电工程电力系统接入优化设计,为类似工程提供了有益借鉴。

参考文献

- [1] 刘伟,彭冬,卜广全,等.光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J].电网技术,2009,33(19):1-6.
- [2] 李英姿.分布式光伏并网系统运行中存在的问题[J].建筑电气,2014,(11):44-50.
- [3] Q/GDW 11147-2013,分布式电源接入配电网设计规范[S].
- [4] 国家电网公司.分布式电源接入系统典型设计[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [5] 王子健,刘永革,李德育.自发自用光伏发电项目功率因数问题浅析[J].资源节约与环保,2018,(3):68-69.
- [6] 郑能,丁晓群,郑程拓,等.考虑负荷特性的配电网无功优化[J].智慧电力,2018,46(3):31-37,43. 太阳能