

雾霾对光伏发电量的影响分析

倪春花¹, 李弘毅², 吴在军¹

(1.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096;2.南京外国语学校,江苏南京 210008)

摘要:太阳能被看作是抗击雾霾“最有力武器”的清洁能源,但太阳能发电却因雾霾侵袭而遭受严峻考验。文中简单介绍了光伏电池的基本原理,分析雾霾对光伏发电量的影响机制。根据相似日原理选出一组相似日,在控制其他影响因素基本相似条件下,分析雾霾对光伏发电量的独立影响,并通过浙江嘉兴某光伏电站实测数据验证分析结果的可靠性。

关键词:太阳能;光伏发电;雾霾;相似日

中图分类号: TM72

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2015)06-0077-05

光伏发电系统的输出受众多因素影响,主要分为外部气象因素(如太阳光辐射强度、辐射时长、温度等)和光伏发电系统自身特性(如光伏电站位置、转换效率、安装角度等)^[1]。因上述诸多因素的影响,光伏发电系统发电量是一个非平稳的随机变化过程,对大电网会产生冲击^[2]。故需对各影响因素的作用机制与影响程度进行深入分析。对于一个既定的光伏发电系统,其系统信息包含在具有高度自相关性的历史发电量时间序列中^[3],系统发电量主要取决于以太阳辐射强度为代表的气象因子,但它是不可控的非人为因素。业界关于气象条件对光伏发电影响的研究早已有之,但主要集中于太阳辐照强度、辐照时长、环境温度、相对湿度等“传统”气象因素^[4]。

近年来我国各地区越发频繁出现的不同程度的雾霾天气开始引起太阳能电力投资者的关注。因为发电量是衡量光伏发电系统性能优劣的最终指标,雾霾对发电量的影响程度直接关系到光伏电站投资的最终收益。雾霾严重程度的区域性差别大,且不同年份间的数据不存在必然规律,目前学界关于雾霾对光伏电站影响的研究刚刚开始,两者间具体的关联性尚未可知。本文以位于浙江嘉兴的某光伏电站实测数据为基础进行研究。由于光伏发电系统各气象影响因素间存在关联耦合作用^[5],为独立分析雾霾严重程度与光伏发电量的关系,采用控制变量法,根据相似度原理,选出一组除雾霾程度以外的其他主要气象条件接近的“相似日”。通过分析“相似日”的雾霾程度与发电量的关系,研究雾霾对光伏发电系统的影响。

1 光伏发电基本原理

光伏发电是指光伏电池利用“光生伏特效应”,把太阳辐射能直接转变成电能的发电方式。除了光伏电

收稿日期:2015-08-15;修回日期:2015-09-20
江苏省2015年度普通高校研究生实践创新计划项目(省立校助):SJLX15_0053
江苏省2015年度普通高校研究生实践创新计划项目(省立校助):SJLX15_0050

池这一最基本的单元,光伏发电系统还包括电池的充放电控制器,计算机监控设备和蓄电池及一些辅助设备。太阳能光伏发电的原理是当具有适当能量的光子入射于半导体时,光与构成半导体的材料相互作用产生电子和空穴,如半导体中存在PN结,那么电子向N型半导体扩散,空穴向P型半导体扩散,并分别聚集于2个电极部分,即负电荷和正电荷聚集于两端,用导线将这2个电极与外部电路连接,就有电荷流动,产生一定的输出功率,这是一个光能直接转化为电能的过程。

1.1 光伏电池结构与原理

光伏电池的基本结构是能够将光能转换为电能的PN结,图1是其精确的等效模型^[6],由二极管、光生电流源、串联和并联电阻组成。光生电流 I_L 与光照强度 λ 成正比,流经二极管的电流 I_d 随着结电压 U_d 及逆向饱和电流 I_0 的不同而变化。光伏电池输出电压 U 和电流 I 的关系为:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

式(1)中: I 为电池单元输出电流; I_L 为PN结电流,A; I_0 为反向饱和电流,A; V 为外加电压,V; q 为单位电荷; K 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度,K; n 为二极管指数; R_{sh} 为漏电阻; R_s 为串联电阻,它是构成光伏电池的半导体体电阻和透明电极电阻等的和。

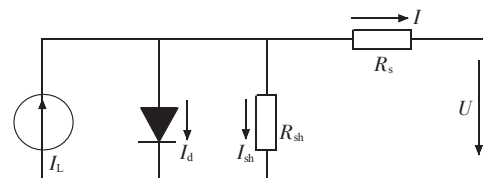


图1 光伏电池等效电路图

1.2 光伏发电输出功率特性

光伏系统的输出功率受光照强度、环境温度、光伏阵列的安装角度、太阳入射角度、转换效率等很多因素的影响,具有波动性和间歇性。单位面积的光伏系统发电功率^[3]:

$$P_s = \eta SI[1-0.005(t_0+25)] \quad (2)$$

式(2)中: I 为光照强度, kW/m^2 ; η 为光伏电池转换效率; t_0 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; S 为光伏阵列的面积, m^2 。

转换效率 η 和阵列面积 S 等参数已经隐含在历史发电数据中,但太阳辐照强度 I 和大气温度 t_0 的变化在输入变量的选择中必须考虑,较之大气温度 t_0 ,太阳辐射强度 I 对光伏输出功率的影响更突出。

2 雾霾对光伏发电功率的影响机制

地球表面接受的太阳辐射要受到大气条件的影响而衰减,主要原因是由空气分子、水蒸气和尘埃引起的大气散射和由臭氧、水蒸气和二氧化碳引起的大气吸收。在晴朗夏天的正午时刻,大约有70%的太阳辐射穿过大气层直接到达地球表面;另有7%左右的太阳辐射经大气分子和粒子散射以后,也最终抵达地面;其余的被大气吸收或经散射返回空间^[7]。雾霾天气越严重,即大气中的悬浮颗粒物和二氧化氮浓度越高,大气中各污染物对太阳光吸收和反射的越多,导致光伏组件表面接收到的太阳光辐照强度降低,从而导致光伏电站发电量降低。同时,如果雾霾天气频繁持续出现,电池组件表面的颗粒物不断累积,在组件表面会形成难以清洗的积尘遮挡,造成电池组件表面污染。组件表面的积尘具有反射、散射和吸收太阳辐射的作用,会降低太阳的透过率,造成面板接收到的太阳辐射减少,导致光伏系统发电量降低。另外,积尘吸收太阳辐射后,可使光伏面板升温,并且积尘中含有一些腐蚀性的化学成分,这些均会导致光电转换效率的降低^[8]。

3 相似日选取原理

光伏发电系统的输出功率受多种因素的影响,且与多个因素形成非线性、强耦合的关系。为独立分析雾霾对光伏发电量的影响,需控制其他因素的影响,尽量保证其他影响因素基本一致。考虑到天气类型不同,太阳辐射强度差异很大,光伏系统发电量差异也很大。本文重点关注天气类型、大气温度和雾霾对光伏发电量的影响。

3.1 模糊变量的量化

天气预报中给出的天气参数一般为较模糊的类型描述,如晴天、晴转多云、阴天、阴有小雨、小雨转大雨等。根据不断完善的光伏监控系统数据库,对大量有效的历史发电量数据进行统计分析,将模糊的描述性天气类型映射为0~1的具体数值,如表1所示。

考虑到参与空气质量评价的污染物为 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 CO 等6项,空气质量指数(K_{AQI})代表了 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等一些细小颗粒物在空气中的含量,且易于获取公开数据^[9]。而雾霾的形成主要与空气

表1 天气类型编码表

天气类型	量化值	天气类型	量化值
晴	0.9	多云	0.7
雾	0.7	霾	0.7
多云转雷阵雨	0.5	多云转小雨	0.2
多云转大雨	0.1	阴转多云	0.5
雷雨	0.4	雷阵雨	0.4
阵雨	0.4	阴	0.3
阴有小雨	0.2	小雨	0.15
小到中雨	0.1	中到大雨	0.05
中雨	0.1	大雨	0.05
中雪	0.05	暴雨	0.005

中细颗粒物有关,故采用 K_{AQI} 量化雾霾天气程度的模糊描述。

3.2 相似日选取原理

考虑影响光伏发电量的主要因素为天气类型、温度和雾霾。为独立分析雾霾的影响,构造以天气类型和温度为相似因子的气象特征向量,计算相似度并排序,选取相似度高的若干相似日。根据相似度原理可知,各相似日的天气类型和大气温度基本一致,可用于单独分析 K_{AQI} 与光伏发电量 P 的关系。

3.2.1 构造气象特征向量

根据前文对光伏阵列发电功率特性的分析,选取大气温度和天气类型(反映太阳辐射强度)作为影响光伏阵列输出功率的气象影响因素,构造每天气象特征向量^[10]:

$$\mathbf{Y} = [T_{\max} \quad T_{\min} \quad w] \quad (3)$$

式(3)中: T_{\max} 为最高温度; T_{\min} 为最低温度; w 为天气类型。

3.2.2 计算相似度

(1) 首先采用“极差法”对各分量进行归一化:

$$x_i(j) = \frac{y_i(j) - m(j)}{M(j) - m(j)} \quad (4)$$

式(4)中: $y_i(j)$ 为第 i 日的第 j 个分量; $m(j)$ 和 $M(j)$ 分别为第 j 个分量的最小值和最大值, $j=1,2,3$ 。

归一化后基准日和第 j 日的特征向量为:

$$\mathbf{x}_0 = [x_0(1), x_0(2), x_0(3)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_j = [x_j(1), x_j(2), x_j(3)]^T \quad (6)$$

(2) 计算 \mathbf{x}_0 和 \mathbf{x}_j 第 k 个因素的关联系数^[11]:

$$\varepsilon_j(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_j(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_j(k)|}{\min_k |x_0(k) - x_j(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_j(k)|} \quad (7)$$

式(7)中: ρ 为分辨系数,其值一般取0.5。

(3) 综合各影响因素的关联系数,定义 x_0 和 x_j 的相似度:

$$F_j = \prod_{k=1}^3 \varepsilon_j(k) \quad (8)$$

采用连乘方式定义相似度,可以简单、自动地识别主导因素,并解决各因素权重设定问题^[12]。按相似度由高到低排序选取前若干个相似日,利用这组相似日的公开气象数据和光伏电站实际发电数据进行进一步分析。

4 算例分析

4.1 直接分析

相关性是指 2 个变量之间变化趋势的一致性,用 SPSS 软件对变量进行相关性分析是常用数学统计分析方法,通过输入待分析变量并选择合适的相关系数类型,软件输出结果可直观的显示变量间的相关系数值 r ,对应的实际显著性水平 L_{sig} 以及样本数量 N 。 r 的绝对值越接近 1,说明变量间相关性越大; L_{sig} 代表假设检验中的显著性,通常 $L_{sig} < 0.05$ 表明得到的相关系数具有统计学意义,变量间的确存在显著相关。利用浙江嘉兴某光伏电站实测功率数据与公开气象数据,得到 2014 年 6 月至 10 月的 K_{AQI} 与发电量变化曲线如图 2 所示。2 个变量间的关系比较随机和复杂。对 K_{AQI} 与发电量作相关性分析前先画两者的散点图,如图 3 所示。可直观地看到 2 个变量的数据点分布杂乱,无明显规律。为进一步分析两者关系,利用 SPSS 对两组数据进行相关性分析。相关性分析结果如表 2 所示,发电量与 K_{AQI} 的相关系数为 $r=0.259 > 0$,这表明两者存在正相关,但相关系数不大。显著性指标 $L_{sig}=0.0259 > 0$,这表明两者间存在极显著的相关,具有较强的统计意义。

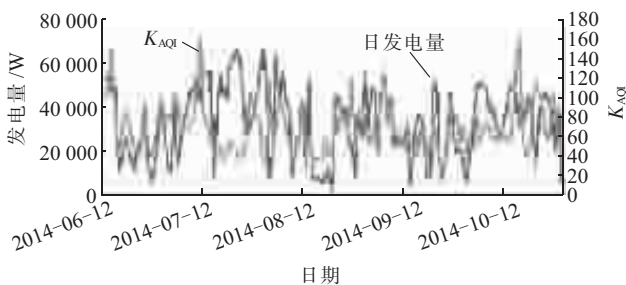


图 2 总体 K_{AQI} 与发电量变化曲线

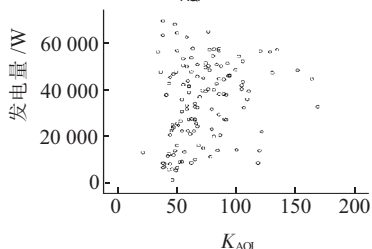


图 3 总体 K_{AQI} 与发电量散点图

表 2 总体 K_{AQI} 与发电量相关性分析结果

数据	日发电量	K_{AQI}
Pearson 相关性	1	0.259*
日发电量 显著性(双侧)	—	0.003
N	132	132
Pearson 相关性	0.259*	1
K_{AQI} 显著性(双侧)	0.003	—
N	132	132

*:在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

这与理论预期结果相悖,需进一步分析出现此结果的原因。考虑到光伏发电量受多种因素综合影响,太阳辐射强度、辐射时长、天气类型等正相关因素的影响可能淹没空气质量指数对光伏发电量影响的趋势。直接将受多种不同因素综合影响的光伏发电量与 K_{AQI} 进行相关性分析,分析结果可能呈现不同程度的甚至相反的趋势。

4.2 基于相似日原理的分析

为得到光伏发电量与 K_{AQI} 实际可靠的相关性分析结果,首先利用 2014 年 6~10 月的公开气象数据,根据前文所述相似日选取原理选取若干相似日,对相似日的发电量与 K_{AQI} 利用 SPSS 软件进行相关性分析。考虑到历史数据库的有限性,每个研究样本选取 15 个相似日。

4.2.1 晴相似日

选取气象特征向量为 $Y_1=[20 \ 8 \ 晴]$ 的 15 个相似日,其 K_{AQI} 与发电量变化曲线如图 4 所示,呈现明显的负相关走势。2 个变量的数据点分布如图 5 所示,分布杂乱,有一定规律但不明显。利用 SPSS 软件对 2 组数据进行相关性分析,分析结果如表 3 所示。根据相关性分析结果,发电量与 K_{AQI} 的相关系数为 $r=-0.591 < 0$,这表明 2 个变量为负相关,相关程度为中度相关。显著性指标 $L_{sig}=0.02 < 0.05$,这表明两者间存在显著的相关,具有较强的统计意义。

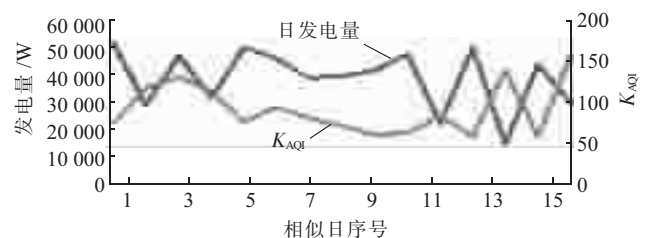
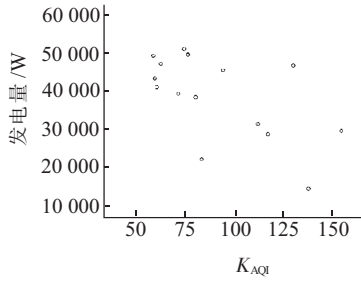


图 4 晴相似日的 K_{AQI} 与发电量变化曲线

4.2.2 多云相似日

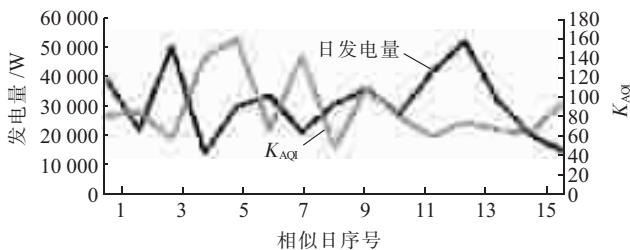
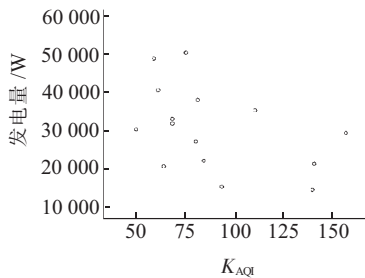
选取气象特征向量为 $Y_2=[20 \ 8 \ 多云]$ 的 15 个相似日,其 K_{AQI} 与发电量变化曲线如图 6 所示。2 个变量数据点分布如图 7 所示,分布杂乱,无明显规律。利用 SPSS 软件对 2 组数据进一步进行相关性分析,分析结果如表 4 所示。根据相关性分析结果,发电量与 K_{AQI}

图5 晴相似日的 K_{AQI} 与发电量散点图表3 晴相似日的 K_{AQI} 与发电量相关性分析结果

数据	功率	K_{AQI}
Pearson 相关性	1	0.591*
功率 显著性(双侧)	—	0.020
N	15	15
Pearson 相关性	0.591*	1
K_{AQI} 显著性(双侧)	0.020	—
N	15	15

*: 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

的相关系数为 $r=-0.443<0$, 这表明 2 个变量为负相关, 相关程度为中低度相关。显著性指标 $L_{sig}=0.098>0.05$, 这表明两者间不存在显著的相关, 统计意义不强。

图6 多云相似日的 K_{AQI} 与发电量变化曲线图7 多云相似日的 K_{AQI} 与发电量散点图表4 多云相似日的 K_{AQI} 与发电量相关性分析结果

数据	功率	K_{AQI}
Pearson 相关性	1	0.443
功率 显著性(双侧)	—	0.098
N	15	15
Pearson 相关性	0.443	1
K_{AQI} 显著性(双侧)	0.098	—
N	15	15

由上述图表结果分析可知, 晴相似日和多云相似日的光伏发电量与 K_{AQI} 大致呈负相关, 其中晴相似日的结果具有显著相关性, 而多云相似日的结果的显著

性指标不合格, 统计意义较弱。这可能是由于多云天气的气象条件复杂多变, 简单地通过计算相似度选取相似日并不能保证各多云相似日的其他气象条件基本一致。另外所采用的历史数据库数据比较有限, 并不能保证所选到的相似日的相似度都很高。这些均可能导致相关性分析结果的显著性指标不合格, 但可以确定的是, 在其他影响因素基本一致的前提下, 光伏发电量与 K_{AQI} 呈负相关, 即雾霾对光伏发电量带来的独立影响是负面的。进一步的研究中, 可通过回归分析、卡方检验、参数检验等方法对两者的关系进行定量的更准确的分析, 以更好地掌握雾霾对光伏发电量的影响程度, 减小雾霾带来的经济损失。

5 结束语

关注到近年来雾霾频发对光伏发电的经济和效益产生了一定的影响。为保证光伏电站投资的最终收益, 需进一步了解掌握雾霾的影响机制, 以采取相应的防治措施。本文通过量化天气类型和雾霾程度, 根据相似日选取原理选择相似日, 控制除雾霾外的其他气象因素相似, 进而分析雾霾对光伏发电量的独立影响。最后利用我国浙江嘉兴某光伏发电系统的实测数据, 比较了直接分析雾霾(以 K_{AQI} 为量化指标)对光伏发电量的影响和分析相似日条件下的雾霾对光伏发电量的影响, SPSS 软件的相关性分析结果可以体现出“相似日”原理与“控制变量”的研究方法对掌握雾霾对发电量实际影响的重要性。通过分析比较验证了雾霾对光伏发电量存在中高度的负面影响, 在后续的研究中, 可将“雾霾”作为光伏发电量预测的输入变量之一, 有望提高光伏发电量预测的精度。

参考文献:

- [1] 李卫良, 黄 堃, 陈 璐, 等. 采用可控负荷平滑光伏发电功率波动的需求响应策略[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(2): 40-43.
- [2] 杨德全. 基于神经网络的光伏发电系统发电功率预测[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [3] 赵 杰. 光伏发电并网系统的相关技术研究[D]. 天津大学, 2012.
- [4] 吕学梅, 朱 虹, 王金东, 等. 气象因素对光伏发电量的影响分析[J]. 可再生能源, 2014(10): 1423-1428.
- [5] 郭 佳. 并网型光伏电站发电功率与其主气象影响因子相关性分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [6] 易桂平, 胡仁杰. 太阳能光伏电池建模与动态特性仿真[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 32-35.
- [7] 刘大为, 彭文博, 鲍亮亮, 等. 考虑空气污染因素的光伏发电量回归分析[J]. 可再生能源, 2014(12): 1785-1790.
- [8] 温 岩, 赵 东, 袁春红, 等. 积尘对光伏系统发电的影响研究综述[J]. 太阳能, 2014(11): 36-41.
- [9] WANG X H, LIU Y Y. Discussion on the Air Quality Index and Air Pollution Index [J]. China Terminology, 2011(6): 49-51.

- [10] 王晓兰,葛鹏江. 基于相似日和径向基函数神经网络的光伏阵列输出功率预测[J]. 电力自动化设备, 2013(1):100-103, 109.
- [11] 傅美平,马红伟,毛建容. 基于相似日和最小二乘支持向量机的光伏发电短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012(16): 65-69.
- [12] 孟洋洋. 风电场发电功率短期预测模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.

作者简介:

倪春花(1992),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为分布式发电与微电网;

李弘毅(1997),男,江苏南京人,高中在读,协助从事能源与环保相关试验工作;

吴在军(1975),男,江苏南京人,博士生导师,研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量监测与控制。

Impact Analysis of Haze on Photovoltaic System's Power Generation

NI Chunhua¹, LI Hongyi², WU Zaijun¹

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Foreign Language School, Nanjing 210008, China)

Abstract: Solar energy is regarded as the most powerful weapon to resist haze, while photovoltaic (PV) generations are facing severe challenge due to frequently-occurring haze. In this paper, the basic principle of PV cells is introduced and the mechanism of haze's affection to PV output power is analyzed. A group of so called similar days are chosen, and then the standalone affection of haze to PV output is analyzed while other factors are guaranteed to be nearly the same. The actual output power of a certain PV plant in Jiaying validates the reliability of the proposed method.

Key words: solar energy; photovoltaic power generation; haze; similar day

(上接第 73 页)

Research and Analysis for the Factors of Local Oscillation of the Electric Network of Large-sized Mine

ZHOU Rongling, CHEN Qian, JU Ping, ZHANG Zhengli, ZHANG Hao

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The local oscillation occurs occasionally in the electric network of large-sized mine. This paper focuses on the oscillation problem in a steel enterprise with a mass of special loads. The possible reasons of the local oscillation is analyzed firstly, and then the simulation considering the mentioned reasons including the impact characters of special load, the excitation mode of local generators, etc. are implemented. It is manifested that the changes of impact load, the location of impact load and the excitation mode of a local generator may significantly affect the oscillation in the small grid. Moreover, the larger the change of impact load is, the larger possibility of the oscillation will be, and the closer the distance between the impact load and generators is, the more significant the oscillation will be. If the exciter of local generator is operated in the constant power factor mode, the generator tends to oscillate more easily than in other modes. The simulation results suggest that the constant voltage mode is a good choice for the exciting regulator, connecting the local grid to the outer power grid improves its reliability, and the impact loads should be reasonably distributed.

Key words: local power grid; oscillation; special power load; excitation mode

(上接第 76 页)

Project Management Improvement on the Commission of Intelligent Substation's Secondary Systems

WU Jun¹, WAN Luofei², WU Chonghao²

(1.State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing, 210019, China;

2.NARI Technology Co.Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Due to the application of many new technologies, complicated system structures and virtual electrical secondary circuits, the commission of intelligent substation becomes a long period, much manpower, complicated commissioning process and quality hard to control project. In this paper, the method of project management is used to improve the management of intelligent substation. By analyzing the statistical data between before and after using the method, it is found that the improved management can shorten the period, promote the quality and control the costs effectively.

Key words: intelligent substation; project management; costs control; human resource