

太阳辐射长期变化对固定式并网光伏电站最佳倾角的影响分析——以北京地区为例

王欣雯^{1, 2} 郭鹏^{1, 2} 申彦波^{1, 2}

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081)

摘要: 最佳倾角是固定式并网光伏发电的关键设计参数之一, 不仅与当地经纬度有关, 还受气象条件的直接影响。以北京地区为例, 在分析地面太阳辐射(总辐射、直接辐射、散射辐射、直射比和散射比)长期变化的基础上, 计算分析固定式并网光伏电站最佳倾角的变化。结果表明: 北京地区近55a的总辐射呈下降趋势, 其中水平面直接辐射的下降是主要的, 散射辐射下降不明显, 相应地, 直射比明显降低, 散射比则明显增加; 最佳倾角总体亦呈下降趋势, 近5a比20世纪60年代下降了2°, 从计算方法来看, 这种下降趋势主要由直射比的降低所导致, 而直射比则受大气环境的影响。因此, 在光伏电站的设计和建设过程中, 应充分关注大气环境的变化及其对太阳辐射的影响, 选择合理的最佳倾角。

关键词: 总辐射, 直射比, 最佳倾角, 大气环境

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.015

Impacts of the Solar Radiation Variation on the Optimum Tilted Angle for the Fixed Grid Connected Solar PV Array —— A Case Study in Beijing

Wang Xinwen^{1,2}, Guo Peng^{1,2}, Shen Yanbo^{1,2}

(1 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Center for Wind and Solar Energy Resources, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: As one of the key design parameters for the fixed grid connected solar PV array, the optimum tilted angle is not only related with the geographic location, but also directly affected by atmospheric conditions. On the basis of long-term variations of the observed solar radiation (global radiation, direct horizontal radiation, diffuse radiation, direct irradiation ratio and diffuse irradiation ratio) in Beijing, the variations of the optimum tilted angle for the fixed grid connected solar PV array are calculated and analyzed in this paper. It is shown that: 1) there was a declining tendency in the global radiation during the recent 55 years, among various radiations, the decrease in the direct horizontal radiation took the main proportion while the decline in the diffuse radiation was not obvious, these lead to the significant decrease in the direct irradiation ratio while the obvious increase in the diffuse irradiation ratio. 2) The long-term optimum tilted angle variation also shows a downtrend. Compared with the optimum tilted angle in the 1960s, it falls by 2 degrees in the recent 5 years. It is presumable based on the calculation that the declining tendency in the optimum tilted angle is mainly caused by the significant decrease in the direct irradiation ratio, which is intensively affected by the atmospheric conditions. Therefore, the variations of atmospheric condition and its impacts on the solar radiation should be paid more attention for determining the optimum tilted angle in design and construction of the photovoltaic power plants.

Keywords: global radiation, direct irradiation ratio, optimum tilted angle, atmospheric condition

0 引言

当前, 太阳能资源开发利用在我国快速发展。光伏发电是太阳能利用的主要方式之一。从与电网的关系来看, 光伏发电可分为并网型和离网型; 从光伏组

件的安装方式来看, 光伏电站又可分为固定式、可调式、跟踪式等。我国目前的光伏电站以固定式并网型为主, 这种类型的光伏电站在设计 and 建设阶段, 往往需要以朝南的某个倾斜角度安装光伏组件, 以便获取最多的太阳辐射, 进而使发电量达到最大, 该倾斜角度即为最佳倾角。

由于太阳存在着东升西落的日变化和南北移动的季节变化, 最佳倾角的确定首先需要根据当地纬度和太阳位置的关系进行计算; 此外, 到达地面的太阳辐

收稿日期: 2016年8月24日; 修回日期: 2016年12月9日
第一作者: 王欣雯(1966—), Email: wxw15501068975@163.com
通信作者: 申彦波(1978—), Email: shenyb@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306048)

射还会受到云、气溶胶、大气成分的影响，这种影响最终也会反映到最佳倾角以及该倾角所对应的太阳辐射（下文简称为“最佳斜面总辐射”）的变化上。关于最佳倾角及最佳斜面总辐射的计算方法，国内外已有很多研究。刘祖明等^[1]采用Hay模型计算了云南一个固定式并网光伏方阵的最佳倾角；杨刚等^[2]研究了固定式光伏阵列最佳倾角的CAD计算方法；孙韵琳等^[3]、李芬等^[4]对比了多种斜面总辐射和最佳倾角的计算方法；杨金焕等^[5]计算了不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角；王炳忠等^[6]从资源角度讨论了太阳能装置的最佳倾角。

上述研究工作以建立、验证或改进最佳倾角及最佳斜面总辐射的计算方法为主，其中的输入数据多数是某一段时间的平均值，所得结论也是“静态”的，没有考虑最佳倾角可能会在气候尺度上随时间发生变化。本文以北京地区为例，重点分析近50余年地面太阳辐射的长期变化及其对最佳倾角的可能影响，以期光伏电站的设计提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据资料

本文采用北京南郊观象台1961—2015年记录的逐月和逐年总辐射、直接辐射和散射辐射辐照量，所有数据均来源于国家气象信息中心，并经过严格的质量控制和均一化处理。

北京南郊观象台始建于1913年，1997年4月1日迁至现址，位于116°28'10"E、39°48'22"N，海拔高度31.3m，为国家气象观测基准站。南郊观象台于1956年1月2日开始观测地面太阳辐射，目前为辐射观测一级站，观测项目包括总辐射、直接辐射（法向直接辐射，以及计算得到的水平面直接辐射）、散射辐射、反射辐射和净辐射，其中总辐射传感器、散射辐射传感器、反射辐射传感器为TBQ-2-B型，直接辐射传感器为FBS-2-B型，净辐射传感器为FNP-1型。

1.2 最佳倾角计算方法

根据固定式并网型光伏电站的特点，方阵表面全年接收到的总辐射辐照量最大时所对应的角度即为最佳倾角。确定最佳倾角首先需要计算从0°（水平放置）~90°（垂直放置）之间任意角度的年总辐射辐照量，然后从中选择最大值，即最佳斜面总辐射所对应的角度，为最佳倾角。

任意角度年总辐射辐照量的计算方法有很多，为符合国内工程设计的习惯，本文采用Klein-Hay模型，该方法由国家标准《光伏电站设计规范》（GB 50797—2012）^[7]所推荐，其中斜面散射考虑各向异

性，包含环日辐射和各向同性散射两部分。该模型的主要计算方程如下：

$$Q_s = D_s + S_s + R_s, \quad (1)$$

$$D_s = D_H \cdot R_b, \quad (2)$$

$$S_s = S_H \cdot \left[\frac{D_H}{Q_H} R_b + \left(1 - \frac{D_H}{Q_H} \right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right], \quad (3)$$

$$R_s = Q_H \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot \rho, \quad (4)$$

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta}, \quad (5)$$

式中， Q_s 、 D_s 、 S_s 、 R_s 分别是倾斜面上的总辐射、直接辐射、散射辐射和反射辐射月辐照量； Q_H 、 D_H 、 S_H 分别是水平面上的总辐射、直接辐射和散射辐射月辐照量，为符合太阳能发电工程的习惯，本文的辐照量单位均为 kWh/m^2 ； R_b 是方位角为正南时，倾斜面与水平面上的日太阳直接辐射之比的月平均值； φ 是纬度， β 是倾斜面与水平面之间的夹角（倾角）， δ 是各月代表日的太阳赤纬， ω 是各月代表日的日落时角，这4个量的单位均为角度； δ 和 ω 根据天文公式计算得到； ρ 是月平均地表反照率，这里取0.2。

由上述计算方法可以看出，在一个确定的地点（经纬度不变），决定斜面总辐射的主要因素是所要输入的水平面上的总辐射、直接辐射和散射辐射，由于水平面直接辐射和散射辐射之和等于水平面总辐射，因此，决定因素可以归结为水平面直接辐射和散射辐射，或两者在水平面总辐射中所占的比例（下文分别简称为“直射比”和“散射比”）。而直接辐射和散射辐射的多少则取决于大气的清洁程度，当大气十分清洁时，直接辐射占比高，当大气十分浑浊时，则散射辐射占比高。两种辐射成分占比随大气环境所发生的气候尺度上的变化，最终会影响到斜面辐射的计算结果以及最佳倾角的大小。

2 结果分析

2.1 北京地区太阳辐射的长期变化特征

图1给出了1961—2015年北京地区水平面总辐射、水平面直接辐射和散射辐射的时间变化曲线。从图中可以看出，北京地区的水平面总辐射近50余年来总体呈下降趋势，其中20世纪60—80年代末的下降趋势最为明显，90年代以来的变化则相对平稳；决定总辐射时间变化的主要辐射成分是水平面直接辐射，从图1中相关方程的斜率来看，水平面直接辐射的权重占到86%（-4.893/-5.676）；而散射辐射的变化相

对比较平稳, 下降趋势不明显, 其对总辐射变化的影响权重也仅有14% ($-0.783/-5.676$)。上述时间变化特征与全球和中国大多数台站总辐射的变化趋势一致^[8-9], 尤其是1990年前后的变化, 基本符合全球从“变暗”到“变亮”的研究结论^[8]。赵东等^[10]的研究认为, 直接辐射的变化主要与气溶胶的变化有关, 近年来, 北京地区雾霾天气增加可能是引起直接辐射下降的主要原因。至于总辐射变化的原因, 则比较复杂, 是云、自然和人为气溶胶、水汽等多种因素共同

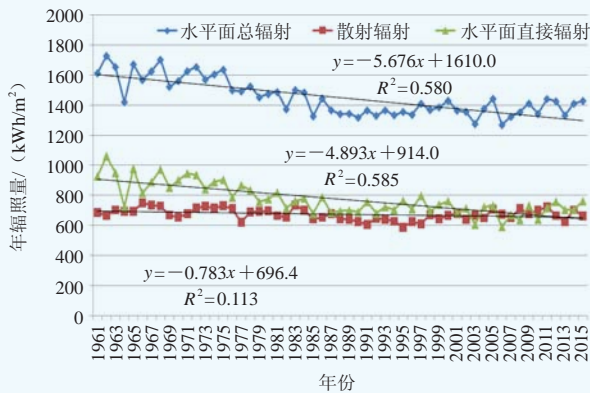


图1 北京地区水平面总辐射、水平面直接辐射和散射辐射的时间变化特征 (1961—2015年)

Fig. 1 The annual variations of global radiation, direct horizontal radiation and diffuse radiation in Beijing

作用的结果^[11], 由于不是本文研究的重点, 这里不再做深入分析。

图2是1961—2015年北京地区直射比和散射比的时间变化曲线。从图中可以看出, 直射比明显下降, 从20世纪60年代最高的60%以上下降到近10a最低的50%以下; 相应的, 散射比则明显上升, 在21世纪的15a中, 有4a的散射比超过了直射比。总辐射年辐照量的变化以及直、散两种辐射成分占比的变化将直接影响到北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角的变化。

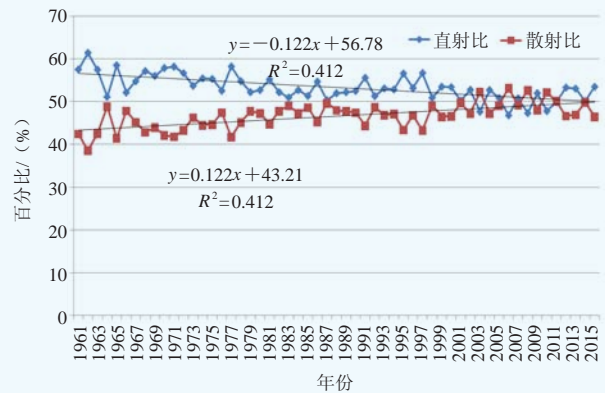


图2 北京地区直射比和散射比的时间变化特征 (1961—2015年)

Fig. 2 The annual variations of direct irradiation ratio and diffuse irradiation ratio in Beijing

2.2 北京地区光伏电站最佳倾角时间变化特征

2.2.1 年际变化

表1给出了根据上述计算方法和南郊观象台逐月实测辐射数据得到的逐年最佳倾角, 图3是相应的最佳倾角时间变化曲线。从图表中可以看出, 北京地区的最佳倾角主要集中在 $36^\circ \sim 38^\circ$, 占比达76%; 其中最大值为 41° (1995年), 最小值为 34° (1991年), 两者相差 7° , 差异明显; 从变化趋势来看, 近55年的最佳倾角总体下降, 1990年前后波动较大, 与前述总

辐射的变化趋势基本一致。

2.2.2 年代际变化

根据《光伏电站设计规范》的要求, 太阳能资源分析和计算至少要用10a以上的辐射数据。这里基于南郊观象台逐月实测辐射数据, 首先计算每10a (年代) 的各月平均辐照量, 然后再计算相应的最佳倾角。表2列出了北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角逐年代计算结果, 图4是相应的最佳倾角年代际变化。

表1 北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角逐年计算结果

Table 1 The annual values of the optimum tilted angle for the fixed grid connected solar PV array in Beijing

年份	最佳倾角/(°)	年份	最佳倾角/(°)	年份	最佳倾角/(°)	年份	最佳倾角/(°)	年份	最佳倾角/(°)	年份	最佳倾角/(°)
1961	39	1971	39	1981	37	1991	34	2001	36	2011	37
1962	38	1972	36	1982	36	1992	35	2002	38	2012	37
1963	38	1973	39	1983	37	1993	36	2003	37	2013	37
1964	36	1974	36	1984	37	1994	36	2004	38	2014	36
1965	37	1975	38	1985	38	1995	41	2005	39	2015	35
1966	37	1976	37	1986	38	1996	39	2006	36		
1967	40	1977	37	1987	36	1997	37	2007	37		
1968	37	1978	37	1988	39	1998	38	2008	39		
1969	38	1979	37	1989	36	1999	38	2009	36		
1970	39	1980	38	1990	36	2000	36	2010	38		

表2 北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角逐年代计算结果

Table 2 The decade value of the optimum tilted angle for the fixed grid connected solar PV array in Beijing

年代	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2010	2011—2015
平均最佳倾角/(°)	38	37	37	37	37	36

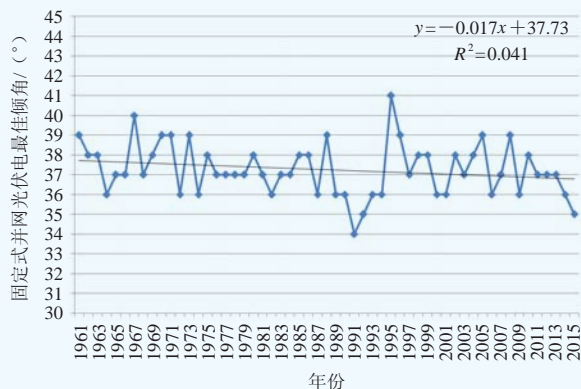


图3 北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角年际变化
Fig. 3 The inter-annual variation of the optimum tilted angle for the fixed grid connected solar PV array in Beijing

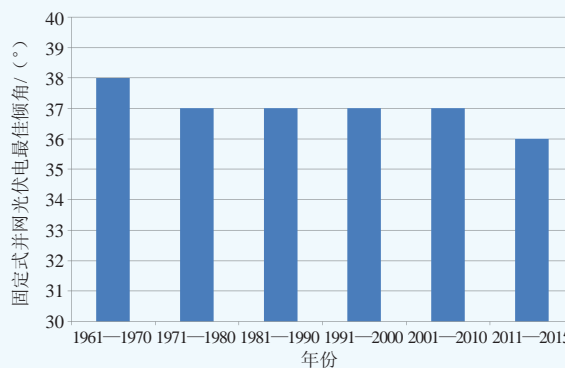


图4 北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角年代际变化
Fig. 4 The inter-decadal variation of the optimum tilted angle for the fixed grid connected solar PV array in Beijing

从图表中可以看出，北京地区的最佳倾角总体呈下降趋势，20世纪60年代为38°，其后的4个年代一直维持在37°，到最近5a则下降到36°。与总辐射、直接辐射和散射辐射的长期变化趋势结合起来看，最佳倾角的这种下降趋势与总辐射和直射比的下降有关。对我国绝大部分地区的光伏电站而言，将组件朝南倾斜放置能够增加直接辐射和一部分反射辐射，但会损失散射辐射（组件背后的散射辐射）；这种情况下，如果直射比下降、散射比上升，则意味着组件上直接辐射的增量减少，散射辐射的损失量增多，进而导致斜面总辐射减少；此时，如果适当降低倾斜角度，则可减少散射辐射的损失，提高斜面总辐射。具体反映到北京地区，最佳倾角随着总辐射和直射比的下降而降低了2°。

综上分析，一个地区的光伏电站最佳倾角并非固定不变，除了受经纬度影响之外，还会受到总辐射和直射比变化的影响，而这种变化最终会归因到大气环境的变化。如果大气环境变好，总辐射和直射比增加，则最佳倾角可能提高；反之，如果大气环境恶化，总辐射和直射比减少，则最佳倾角可能降低。对于光伏电站工程设计而言，最佳倾角抬高会增加光伏组件的阴影面积，进而增大光伏阵列前后排之间的距离，使得占地面积和投资成本相应增加。因此，在目前大气环境发生明显变化的背景下，应当充分了解这种变化对太阳辐射产生的影响，基于可靠的数据合理设计最佳倾角。

3 结论与讨论

1) 北京地区近55a的总辐射总体呈下降趋势，其中水平面直接辐射的下降趋势明显，在总辐射的下降趋势中权重占比达86%，而散射辐射仅占14%；相应的，直射比亦明显降低，散射比则明显增加。

2) 受总辐射和直射比下降的影响，北京地区固定式并网光伏电站最佳倾角也呈下降趋势，近5a的最佳倾角为36°，比20世纪60年代减小2°。

参考文献:

- [1] 刘祖明,李迎军,谢建,等.固定式联网光伏方阵的最佳倾角.云南师范大学学报(自然科学版),2000,20(6):24-28.
- [2] 杨金焕,毛家俊,陈中华.不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算.上海交通大学学报,2002,36(7):1032-1036.
- [3] 杨刚,陈鸣,陈卓武.固定式光伏阵列最佳倾角的CAD计算方法.中山大学学报(自然科学版),2008,47(S2):165-169.
- [4] 孙韵琳,杜晓荣,王小杨,等.固定式并网光伏阵列的辐射量计算与倾角优化.太阳能学报,2009,30(12):1597-1601.
- [5] 李芬,赵晋斌,段善旭,等.三种斜面月平均总辐射模型评估及光伏阵列最佳倾角研究.太阳能学报,2015,36(2):502-509.
- [6] 王炳忠,申彦波.从资源角度对太阳能装置最佳倾角的讨论.太阳能,2010,159(7):17-20.
- [7] 中国电力企业联合会.光伏发电站设计规范(GB 50797—2012).北京:中国计划出版社,2012.
- [8] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. Science, 2005, 308(5723):847-850.
- [9] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961—2000. Geophys Res Lett, 2005, 32(6):347-354.
- [10] 赵东,罗勇,高歌,等.我国近50年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化.太阳能学报,2009,30(7):946-952.
- [11] 申彦波,赵宗慈,石广玉.地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能气候效应的最新研究进展.地球科学进展,2008,23(9):915-923.