

固定式光伏方阵最佳倾角的分析

杨 金 焕

(西安交通大学, 西安, 710049)

摘 要

对于负荷全年均衡分布的独立光伏发电系统, 在确定固定式光伏方阵的最佳倾角时应综合考虑方阵面上太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性。建议采用夏半年和冬半年时方阵面上所接收到的平均日辐射量作为判断的依据, 结合全年平均日辐射量, 分别三种情况来确定方阵的最佳倾角。对我国一些地区的最佳倾角进行了计算及分析。

一、前 言

地面应用的独立光伏发电系统, 方阵面通常朝向赤道, 相对地平面有一定倾角。倾角不同, 各个月份方阵面接收到的太阳辐射量差别很大。因此, 确定方阵的最佳倾角是光伏发电系统设计中不可缺少的重要环节。有人认为方阵倾角等于当地纬度为最佳^[1-3]。这样做的结果, 夏天方阵发电量往往过盈而造成浪费, 冬天时发电量又往往不足而使蓄电池欠充。所以这不一定是最好的选择。

目前普遍认为, 所取方阵倾角应使全年辐射量最弱的月份能得到最大的太阳辐射量为好, 推荐方阵倾角在当地纬度的基础上再增加 15° — 20° ^[4,5]。国外有的设计手册也提出, 设计月份应以辐射量最小的12月(在北半球)或6月(在南半球)作为依据^[6]。其实, 这种观点也不一定妥当, 这样往往会使夏季获得的辐射量过少, 从而导致方阵全年得到的太阳辐射量偏小。

二、分 析

在全年负荷均衡分布的独立光伏发电系统中, 蓄电池的充放电处在日夜小循环和季节性的大循环中。冬天方阵供电不足部分由蓄电池补充, 而夏天蓄电池最多只能充到额定容量, 多余电能全部被白白浪费。蓄电池本身处于全年浮充放状态, 一般来说, 各地的太阳辐射量都是逐月缓慢连续变化的, 即使某个月份太阳辐射量突然增大或减小, 对整个系统的工作状态影响也不会很大。例如, 夏季某个月份方阵发电量偏低, 造成蓄电池欠充, 到下个月就可能补上, 不会影响冬季蓄电池的放电状态。因此, 不应以某个月份作为依据, 而应以连续半年作为考虑问题的出发点。总体来看, 可以认为在夏天的半年中, 蓄电池处在充电状态, 而在冬天的半年中, 蓄电池处在放电状态。

根据以上分析, 方阵倾角的确定应结合以下要求进行综合考虑。

1. 连续性

在一年中太阳辐射总量大体上是逐月连续变化的, 通常可由气象资料查得某地各月水平辐射总量(取10年以上平均值), 并将水平辐射总量较大的连续六个月称为“夏半年”, 较小的

连续六个月称为“冬半年”。在北半球, 夏半年多数为 4—9 月, 冬半年为 10 月到次年 3 月。若以 H_1 和 H_2 分别表示夏半年和冬半年方阵面上接收到的平均日辐射量, 则相应于不同的倾角, H_1 和 H_2 值都不一样, 而在水平面上总有 $H_1 > H_2$ 。

2. 均匀性

选择倾角, 最好能使方阵面上全年接收到的平均日辐射量比较均匀, 即 H_1 与 H_2 比较接近, 以免夏天接收的辐射量过大, 造成浪费。

3. 极大性

选择倾角时, 还应尽量使方阵面上冬半年的平均日辐射量 H_2 达到最大值, 但不一定要使水平辐射量最弱的月份获得最大的辐射量。当然, 同时还要兼顾全年平均日辐射量 $\overline{H_T}$ 不能太小。

对于全年负荷不均衡分布的独立光伏系统(如光电水泵、光伏制冷等), 应着重顾及高峰负荷时的辐射情况。如高峰负荷在夏季, 则应适当减小方阵倾角。

三、计 算

众所周知, 在倾斜面上所接收到的太阳辐射总量 H_T 由直接辐射量 H_{bT} 、天空散射辐射量 H_{dT} 及地面反射辐射量 H_{rT} 三部分组成, 即

$$H_T = H_{bT} + H_{dT} + H_{rT} \quad (1)$$

H_{bT} 与水平面上直接辐射量 H_b 之间有如下关系:

$$H_{bT} = H_b \cdot R_b \quad (2)$$

对于朝向赤道的倾斜面, 两者的比值由下式确定:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{sT} + \frac{\pi}{180} \omega_{sT} \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta} \quad (3)$$

式中, ϕ 是当地纬度, β 是倾角, 太阳赤纬 δ 可近似表示成:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (4)$$

其中, n 为一年中从元旦算起的天数。各月所取的 n 值见文献[7]。

水平面上日落时角:

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \phi \cdot \tan \delta] \quad (5)$$

倾斜面上日落时角:

$$\omega_{sT} = \min \{ \omega_s, \cos^{-1}[-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta] \} \quad (6)$$

在文献[7—10]中, 认为天空散射是各向同性的, 因而可得出较简单的表达式。实际上, 在北半球, 南半边天空全年平均散射辐射量显然要比北半边大, 而南半球则正相反, 可见天空散射辐射并不是均匀分布的。 H_{ay} ^[11]、Klucher^[12]、Perez^[13] 等人分别提出了天空散射各向异性的模型, 后来有些文献对这些模型又进行了分析比较, 认为 H_{ay} 模型比较简洁, 并具有足够的精确性, 其表达式为^[14,15]

$$H_{dT} = H_d \left[\frac{H - H_d}{H_o} R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{H - H_d}{H_o} \right) \right] \quad (7)$$

式中, H_d 和 H 分别为水平面上散射辐射及总辐射量, H_o 为大气层外水平面上辐射量, 它可由下式求出:

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0.033 \frac{360n}{365} \right] (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta) \quad (8)$$

其中, I_{sc} 为太阳常数。

地面反射辐射量的表达式为

$$H_{rT} = \frac{1}{2} \rho H (1 - \cos \beta) \quad (9)$$

式中, ρ 为地面反射率, 一般情况下 $\rho = 0.2$ 。

将式(2)、(7)及(9)代入式(1)即可得到倾斜面上太阳辐射总量的表达式:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \left[\frac{H - H_d}{H_o} R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{H - H_d}{H_o} \right) \right] + \frac{\rho}{2} H (1 - \cos \beta) \quad (10)$$

对于确定的地点, 如已知全年各月的水平太阳辐射资料, 即可确定夏半年和冬半年的月份范围, 由式(10)算出不同倾斜面上全年各月的太阳辐射量, 从而得出 H_1 及 H_2 值, 进行分析比较后即可确定最佳倾角。

对于光伏方阵的工作情况, 通常可从 $(\phi - 5)$ 开始, 每隔 5° , 到 $(\phi + 25)$ 共取七种倾角进行计算。从计算结果可以发现, 随着倾角增大, H_1 下降很快, 而 H_2 逐渐上升, 达最大值后又变小。而全年平均日辐射量 \bar{H}_T 在 ϕ 附近达最大值, 然后又下降。由于各地的 H_1 、 H_2 、 \bar{H}_T 变化的快慢不同, 最佳倾角可以根据以下三种不同情况, 分别选取:

1. 在倾角增大时, H_2 达到某一最大值, 同时始终有 $H_1 > H_2$, 这时就取 H_2 达最大值时所对应的角度为方阵倾角。

2. 在 H_2 到达最大值之前, 已有 $H_1 < H_2'$ 这表明夏天的辐射量已削弱太多, 倾角不宜过大, 这时可取 $H_1 = H_2$ 时所对应的角度作为方阵倾角。

3. 在以上角度范围内, 始终有 $H_1 < H_2$, 而且倾角越大, \bar{H}_T 越小, 这时方阵倾角可取相应于 \bar{H}_T 最大值的角度。

四、实 例

1. 确定武汉地区 ($\phi = 30.63^\circ$) 方阵的最佳倾角

由[16]提供的20年平均太阳辐射量 H 及 H_b , 可知夏半年为4—9月, 冬半年为10月至次年3月。根据式(10)分别计算七种倾角在不同月份的 H_T 、 H_1 、 H_2 及 \bar{H}_T 值, 结果列于表1。

由图1可见, 在 $(\phi - 5)$ 到 $(\phi + 25)$ 范围内, H_1 和 H_2 不相交, 始终有 $H_1 > H_2$, 且在 $(\phi + 15)$ 时 H_2 达最大值, 故选择方阵倾角为 $\beta = \phi + 15 = 45.6^\circ$ 。

如仅从水平辐射量最弱的12月份考虑, 在 $(\phi + 25)$ 时辐射量还未达最大值, 似乎应取 $\beta > (\phi + 25)$, 但此时在夏天六、七月份日辐射量下降很大, \bar{H}_T 也减少很多, 所以只照顾12月份是不合适的。

表1 武汉地区($\phi = 30.63^\circ$)不同倾斜面上的辐射量[卡/厘米²·天]

月份 \ 角度	0	$\phi - 5$	ϕ	$\phi + 5$	$\phi + 10$	$\phi + 15$	$\phi + 20$	$\phi + 25$
1	193.8	255.7	263.7	270.1	274.9	278.1	279.7	279.6
2	223.2	267.4	271.8	274.6	276.0	275.8	274.1	270.8
3	257.4	277.1	276.8	275.0	271.9	267.4	261.6	254.5
4	320.1	319.0	314.0	307.5	299.5	290.1	279.4	267.4
5	374.1	350.7	341.2	330.1	317.7	304.0	289.0	273.1
6	424.6	385.0	372.0	357.5	341.5	324.2	305.7	286.3
7	474.9	432.8	418.0	401.3	382.7	362.5	340.8	317.8
8	468.5	456.7	446.7	434.2	419.5	402.5	383.5	362.7
9	354.1	378.5	376.9	373.2	367.4	359.6	349.8	338.1
10	280.3	336.1	341.2	344.4	345.6	344.7	341.9	337.0
11	219.8	296.6	299.5	306.6	312.0	315.4	316.9	316.6
12	185.4	255.2	264.5	272.3	278.5	283.0	285.8	286.9
H_1	403.3	387.6	378.5	367.6	355.0	340.7	324.9	307.7
H_2	226.8	280.5	286.4	290.7	293.3	294.3	293.5	291.1
\bar{H}_T	315.1	334.1	332.5	329.2	324.2	317.5	309.2	299.4

2. 确定济南地区($\phi = 36.68^\circ$)方阵的最佳倾角

此处夏半年为4—9月, 冬半年为10—3月, 计算结果见表2, 相应的 $H-\beta$ 曲线如

表2 济南地区($\phi = 36.68^\circ$)不同倾斜面上的辐射量[卡/厘米²·天]

月份 \ 角度	0	$\phi - 5$	ϕ	$\phi + 5$	$\phi + 10$	$\phi + 15$	$\phi + 20$	$\phi + 25$
1	200.1	329.7	343.2	354.5	363.4	369.9	374.0	375.6
2	261.0	368.5	377.6	384.4	388.7	390.6	390.0	386.9
3	344.5	410.9	412.8	412.2	409.2	403.7	395.8	385.6
4	398.4	409.4	402.9	394.1	383.3	370.4	355.5	338.9
5	496.1	460.7	446.2	429.5	410.6	389.8	367.3	343.2
6	502.9	444.1	426.7	407.3	386.2	363.4	339.1	313.7
7	400.7	363.5	351.2	337.2	321.8	304.9	286.9	267.8
8	374.1	368.4	360.2	350.0	338.1	324.4	309.1	292.3
9	355.5	405.4	404.4	401.0	395.1	386.9	376.3	363.5
10	288.8	394.1	402.2	407.7	410.6	410.8	408.5	403.5
11	217.1	348.0	361.2	372.0	380.4	386.3	389.6	390.4
12	182.9	318.1	332.7	345.1	355.2	362.9	368.2	371.1
H_1	421.3	408.4	398.4	386.3	372.2	356.4	338.7	319.6
H_2	249.0	361.5	371.6	379.3	384.5	387.3	387.6	385.5
\bar{H}_T	335.2	385.0	385.0	382.8	378.4	371.9	363.2	352.6

图2所示。可见 H_1 与 H_2 两条曲线相交,在 H_2 达最大值之前已有 $H_1 < H_2$,因此,方阵倾角可取 $H_1 = H_2$ 时对应的角度,约为 43°

3. 确定拉萨地区($\phi = 29.70^\circ$)方阵的最佳倾角

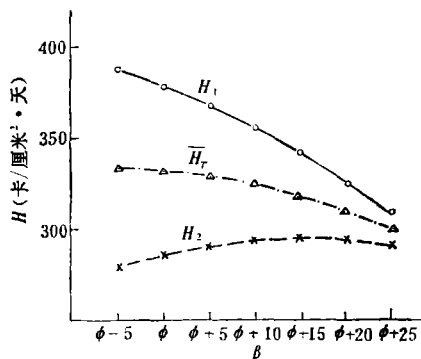


图1 武汉地区 $H-\beta$ 曲线

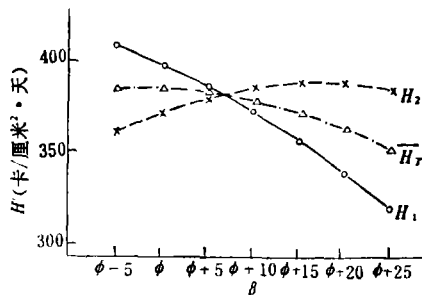


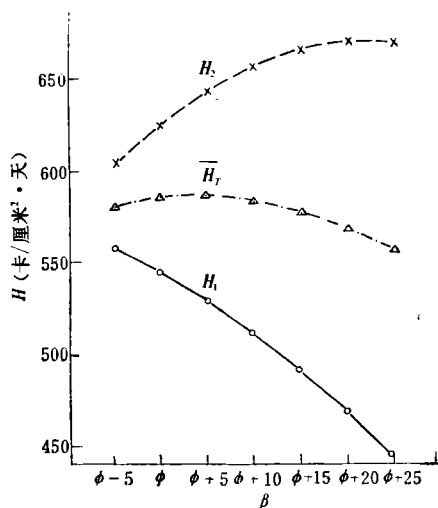
图2 济南地区 $H-\beta$ 曲线

此处夏半年为3—8月,冬半年为9月至次年2月,计算结果见表3,相应的 $H-\beta$ 曲线如图3所示。

表3 拉萨地区($\phi = 29.7^\circ$)不同倾斜面上的辐射量[卡/厘米²·天]

月份 \ 角度	0	$\phi - 5$	ϕ	$\phi + 5$	$\phi + 10$	$\phi + 15$	$\phi + 20$	$\phi + 25$
1	395.4	605.0	636.1	662.8	684.8	702.1	714.4	721.7
2	449.3	597.9	617.0	631.8	642.4	648.7	650.6	648.2
3	509.4	586.5	591.3	592.5	589.8	583.5	573.4	559.7
4	552.6	559.5	551.1	539.5	524.7	507.0	486.4	463.1
5	625.5	578.6	559.6	537.6	512.9	485.6	455.9	424.2
6	635.9	563.9	540.7	514.9	486.8	456.4	424.2	390.3
7	588.2	534.9	516.0	494.6	471.0	445.2	417.5	388.2
8	542.1	527.7	516.1	501.8	484.8	465.2	443.3	419.2
9	508.4	555.1	554.5	550.4	542.9	532.0	517.9	500.6
10	494.7	637.2	654.0	666.3	674.0	677.2	675.8	669.7
11	425.2	632.3	662.3	687.7	708.3	723.9	734.4	739.8
12	375.6	598.4	632.4	661.9	686.7	706.7	721.7	731.6
H_1	575.4	557.5	545.4	530.5	512.9	492.9	470.6	446.2
H_2	441.0	605.2	627.1	644.8	658.2	667.0	671.3	671.0
\bar{H}_T	508.2	581.4	586.3	587.7	585.6	580.0	571.0	558.6

由图3可见,虽然在 $(\phi + 20)$ 时 H_2 达最大值,但此时 H_1 比 H_2 小很多,而且在 $\beta > (\phi - 5)$ 范围内始终是 $H_1 < H_2$ 。计算表明, H_1 与 H_2 约在 $(\phi - 12)$ 处相等,但此时 \bar{H}_T 减少很多,所以方阵倾角应取 \bar{H}_T 为最大值时对应的角度(34.70°)。

图3 拉萨地区 $H-\beta$ 曲线

作者根据[16]所提供的20年平均太阳辐射量,对我国66个地点进行了计算,发现有以下规律:在我国南方($\phi \leq 32^\circ$)的32个地点,基本上都属于第一种情况,其中约有半数最佳倾角为 $(\phi + 15)$,有些是 $(\phi + 10)$,只有极少数是 $(\phi + 5)$ 。在北方($\phi > 32^\circ$)的34个地点,除极少数几个属于第一种情况外,差不多都属于第二种情况, H_2 在 $(\phi + 20)$ 或 $(\phi + 15)$ 时有极大值,但此时已有 $H_1 < H_2$,所以方阵倾角应取 $H_1 = H_2$ 处所对应的角度。在西藏等一些地区,冬半年直接辐射分量在辐射总量中所占比例很大,在 $\beta < \phi$ 时即有 $H_1 < H_2$,属于第三种情况,此时方阵倾角可取 \bar{H}_T 最大值所对应的角度。

五、结 论

1. 对于全年负荷可看作均衡分布的固定式独立光伏发电系统,其方阵倾角的选择应结合方阵面上所接收太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性进行综合考虑,不应只考虑某个月份的极大性。

2. 分别计算不同角度下夏半年和冬半年的平均日辐射量 H_1 及 H_2 ,经比较后可具体确定方阵的最佳倾角。有三种情况:

- (1) H_2 达极大值以前始终有 $H_1 > H_2$,则取 H_2 极大值所对应的角度;
- (2) H_2 达极大值之前,已有 $H_1 < H_2$,则取 $H_1 = H_2$ 时所对应的角度;
- (3) 若在 $\beta < \phi$ 时就有 $H_1 < H_2$,则取倾斜面上全年平均日辐射量 \bar{H}_T 达最大值时所对应的角度。

我国南方($\phi \leq 32^\circ$)、北方($\phi > 32^\circ$)及西藏等一些直接辐射分量较大的地区,大致分属以上三种情况。

3. 对于全年负荷不均衡的独立光伏发电系统,应着重照顾高峰负荷时的光照情况。如高峰负荷在夏季,则应适当减小方阵倾角。

作者曾与赵富鑫、崔容强教授,崔兴祥及甘肃自然能源所王鸿雁等同志进行了深入有益的讨论,在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] (日)高桥清等,《太阳光发电》,新时代出版社, p.351, 1987.
- [2] (日)过高辉,《太阳能电池》,机械工业出版社, p.111, 1989.
- [3] (美)理查德,《实用光伏技术》,航空工业出版社, p.34, 1988.
- [4] (澳)格林,《太阳电池》,电子工业出版社, p.237, 1987.
- [5] J.M.GORDON, *Solar Cells*, 20(1987), 295-313.
- [6] R.N.CHAPMAN, SANDIA REPORT SAND87-1087.UC-63.
- [7] S.A.KLEIN, *Solar Energy*, 19(1977), 325-329.
- [8] Y.H.LIU, et al., *Trans. ASHRAE* (1962), 526-541.
- [9] J.R.SIMONSON *Solar Energy*, 27(1981), 445-447.
- [10] J.P.CHIOU, et al., *Solar Energy*, 36(1986), 471-478.
- [11] J.E.HAY, Rep.79-12. Atmospheric Environment Service, Ontario (1979).
- [12] T.M.KLUCHER, *Solar Energy*, 23(1979), 111-114.
- [13] R.PEREZ, et al., *Solar Energy*, 36(1986), 481-497.
- [14] M.A.ABDELRAHMAN, et al., *Solar Energy*, 37(1986), 239-243.
- [15] C.C.Y.MA, et al., *Solar Energy*, 31(1983), 313-317.
- [16] 《1961—1980中国太阳辐射资料》第五册, 气象出版社.

ANALYSIS OF OPTIMUM TILTED ANGLE FOR FIXED PHOTOVOLTAIC ARRAYS

Yang Jin-huan

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract

In choosing optimum tilted angle of fixed array for a stand-alone photovoltaic power system with steady load over a year, the continuity, uniformity and maximum of solar radiation on the surface should be considered comprehensively. It is suggested that the average daily solar insolation during the half year including summer or winter on the inclined surface can be used as a criterion, sometimes the daily mean insolation over a year should be considered, and then the optimum tilted angle can be determined in these three cases. The detailed calculation and analysis have been made here about some cities in China.