

文章编号: 0254-0096 (2003) 05-0718-06

# 风光互补发电系统的优化设计 II 匹配设计实例

艾 斌<sup>1,3</sup>, 杨洪兴<sup>2</sup>, 沈 辉<sup>1</sup>, 廖显伯<sup>3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510070; 2. 香港理工大学, 香港九龙; 3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘 要:** 根据风光互补发电系统优化设计的 CAD 方法编制了相应的匹配计算程序, 并把该程序应用于一假定安装在香港横澜岛上的风光互补发电系统的优化设计。利用香港天文台提供的 1989 年全年每小时实测的太阳辐射、风速和温度数据以及全年负载用电分布等数据给出了满足两种供电可靠性要求即全年功率供给亏欠率 LPSP 分别等于 0.1 和 0.01 的优化了的系统配置。文章还比较并讨论了这两种优化的系统配置每小时、每日、每月和全年的性能表现。

**关键词:** 风光互补发电系统; 优化设计; CAD 方法

中图分类号: TK614 文献标识码: A

## 0 引言

国内外的研究结果都表明, 在满足偏远无电地区居民生产和生活用电以及向偏远地区的通讯系统供电方面, 风光互补发电往往被证明是一种比单一光伏或风力发电更经济、可靠的选择<sup>[1,2]</sup>。由于目前用来模拟光伏及其互补发电系统性能的大型工具软件包的价格昂贵或其他原因, 大部分光伏系统设计人员无法使用这样的软件工具来设计系统。他们往往凭借经验法则来确定系统各部分的容量, 或直接使用生产厂商已固定搭配好各组件容量大小的系统。这种较粗略的系统设计很难保证系统各部分工作在最经济合理的匹配状态下。由于风光互补发电系统同时使用两种起伏性都比较大并且具有很大随机性的自然资源, 准确合理的匹配设计对于风光互补发电系统的推广应用显得尤为重要, 它是充分利用风光资源在时间分布上所呈现出的一定的互补性的前提。系统匹配设计不合理将导致较高的系统供电成本和较差的性能表现, 甚至根本体现不出风光互补发电自身所固有的种种优越性。准确合理的匹配设计应根据用户所在地的地理位置、地形条件、详细的气象资料、组件(包括风力发电机、PV 组件和蓄电池)实际的工作特性以及用户用电要求等

数据来确定系统各部分的容量, 以使系统各部分尤其是蓄电池组工作在尽可能理想的状态下。

上一篇文章给出了一整套利用 CAD 进行风光互补发电系统优化设计的方法。本文将把这一优化设计方法应用于对一假定安装在香港横澜岛上的风光互补发电系统的优化设计。根据用户对该风光互补发电系统的具体要求、选用的组件的特性参数、该 CAD 方法所提出的描述组件特性和气象数据转换的数学模型以及香港天文台提供的 1989 年全年每小时实测的太阳辐射、风速和温度等数据, 由程序模拟计算了不同 PV 方阵和蓄电池容量组合全年的功率供给亏欠率 LPSP。然后根据用户给定的系统供电可靠性要求(即全年功率供给亏欠率 LPSP 等于 0.1 和 0.01)画出满足这种供电可靠性要求的表示 PV 方阵和蓄电池容量关系的平衡曲线。通过画用斜率表示 PV 组件和蓄电池成本关系的平衡曲线的切线, 最终确定出以最小投资成本满足这种供电可靠性要求的优化的系统配置。文章还比较并讨论了系统全年功率供给亏欠率 LPSP 分别对应于 0.1 和 0.01 的两种优化的系统配置每小时、每日、每月和全年的性能表现。

## 1 匹配设计的过程

### 1.1 香港横澜岛的概况

收稿日期: 2002-11-29

基金项目: 国家重点科技攻关计划 (96-A17-08-01); 中国科学院 1998 年度光电转换及功能材料“百人计划”

横澜岛位于北纬  $22^{\circ}3'$ , 东经  $114^{\circ}17'$ , 处于东八时区内(当地标准时间的经度为: 东经  $120^{\circ}$ ), 是香港水域东南部的一个孤岛。由于岛的周围没有高山等障碍物, 对风呈现出很好的暴露性, 该岛上测出的风力数据能基本代表香港地区风资源的状况。横澜岛上建有一个测量风速的自动气象站, 风力数据由离地面高 26m (距海平面高 82m) 的 Tele-dyne Geotech WS-21 型风速计测量, 并通过电话线每隔一分钟向香港天文台传送一次气象数据<sup>[3]</sup>。由于岛上没有测量太阳辐射的日射站, 我们在对风光互补发电系统进行优化设计时使用了香港其它地点日射站测得的太阳辐射和温度数据。

## 1.2 程序所需原始数据的获得

假想要在横澜岛上安装一风光互补发电装置为一照明系统提供电源。该照明系统使用的是节能灯, 总的负载功率为 300W, 天黑时自动开启, 天亮时自动熄灭, 并使用交流电源。对风光互补发电装置的要求如下: ①系统的工作电压(即逆变器输入端的电压)为直流 24V; ②PV 方阵朝正南倾斜放置, 倾角等于当地的纬度  $22^{\circ}3'$ 。③风光互补发电装置由一台 Fortis Espada 800W 风力发电机以及一定容量的 PV 方阵和蓄电池组组成。表 1 列出了所选定的组件的详细的技术及价格参数。

为了评估当地风能和太阳能资源的互补性以及校验匹配计算结果, 图 1 给出了风力发电机转轴高度处有效风能密度以及水平面和方阵平面上总辐射量的月际变化曲线。对于有效风能密度的计算请参考文献[1], 在计算有效风能密度时, 有效风速的区间取 Fortis Espada 800W 风力发电机的工作风速范围(3m/s ~ 25m/s)。由图 1 可知, 四月份的风能和太阳能资源都相对匮乏, 这意味着系统供电不足的情况主要在该月发生。对 1989 年实测的太阳辐射数据的研究发现, 在全年大多数日子里直接辐射强度都不占有优势, 因而导致计算出的方阵平面上接受到的总辐射量与水平面上总辐射量的差别不大。从四月份到八月份, 水平面上的总辐射量略高于方阵平面上的总辐射量, 而在其它月份情况则恰恰相反。另外, 还可以发现, 通过倾斜放置 PV 方阵, 方阵平面上总辐射量全年分布的均匀性得到了明显改善。

根据用户用电要求, 负载每小时的用电分布由下面的方法确定: 每月日出、日落的时间通过计算

表 1 选定组件的技术参数

Table 1 Technical parameters of chosen components

组件类型	参数类型	参数值
PV 组件	生产商及型号	Siemens Solar M35 组件
	最大输出功率 W	35.0
	最大功率点电压 V	17.0
	最大功率点电流 A	2.12
	开路电压 V	22.0
	短路电流 A	2.3
	电压温度系数 V/°C	-0.1152
	电流温度系数 A/°C	0.000224
	PV 组件的单价 ¥	1400.0
	风力发电机	生产商及型号
额定功率 W		800
12m/s 时的输出功率 W		600
启动风速 m/s		3.0
切断风速 m/s		25.0
转轴高度 m		12
叶片数		2
风力发电机的单价 ¥	12000.0	
蓄电池	生产商及型号	TOYO GFM-100
	额定电压 V	2
	额定容量 Ah	100
	每小时的自放电率	0.0001
蓄电池的单价 ¥	580.0	

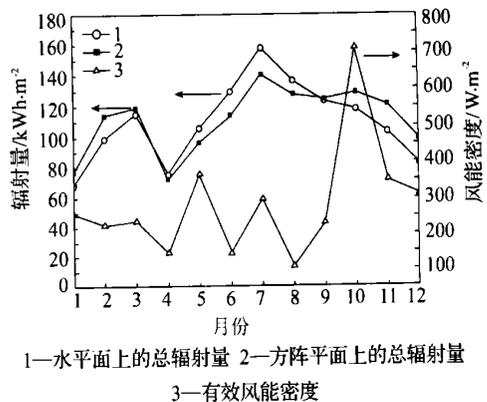


图 1 风力发电机转轴高度处有效风能密度以及水平面和方阵平面上总辐射量的月际变化曲线

Fig 1 Monthly variation of effective wind power density at the hub height and radiation on the horizontal surface and the array plane

水平面上每月平均日的日出和日落时角得到。考虑到天空散射的影响, 开灯的时间比日落时间推后半个小时, 而关灯的时间比日出时间早半个小时。表 2 列出了由这种方法确定的每月开、关灯的时间,

表 2 每月开灯及关灯的时间

Table 2 The time for lights turning on and off in each month

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
开灯时间	6: 00	6: 00	5: 00	5: 00	5: 00	4: 00	5: 00	5: 00	5: 00	5: 00	5: 00	6: 00
关灯时间	18: 00	18: 00	18: 00	18: 00	19: 00	19: 00	19: 00	19: 00	18: 00	18: 00	17: 00	17: 00

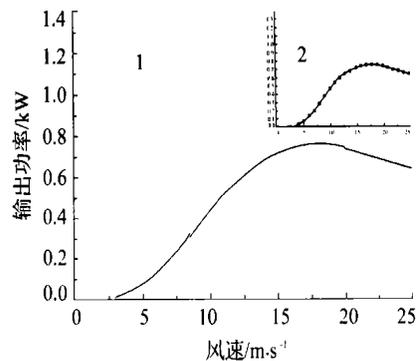
用最小二乘法对 Fortis Espada 800W 风力发电机输出特性曲线拟合得到的方程为:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & (v < 3.0) \\ 0.007 \cdot (v-6.0)^2 + 0.06 \cdot (v-6.0) + 0.13 & (3.0 \leq v < 8.5) \\ -0.005 \cdot (v-14.0)^2 + 0.04 \cdot (v-14.0) + 0.68 & (8.5 \leq v < 20.0) \\ 0.0008 \cdot (v-22.4)^2 - 0.02 \cdot (v-22.4) + 0.68 & (20.0 \leq v \leq 25.0) \\ 0 & (v > 25.0) \end{cases} \quad (1)$$

图 2 一并给出了该型风力发电机的输出特性曲线和由方程(1)得到的拟合曲线。由图 2 不难看出, 该型风力发电机的输出特性相当地差, 它在整个风速范围内始终没有达到 0.8kW 的额定输出功率。其最大输出功率 0.745kW 是在风速为 17.0m/s 时达到的。当风速达到 5.0m/s 时, 它的输出功率只有 0.068kW; 该型风力发电机在其它风速下的部分输出数据为: 0.2kW (7.0m/s), 0.464kW (10.0m/s), 0.714kW (15.0m/s), 0.745kW (17.0, 18.0, 19.0m/s), 0.736kW (20.0m/s), 0.677kW (23.0m/s)和 0.636kW (25.0m/s)。作为比较, 内蒙古商都牧机厂生产的 FD2.5—300 型风力发电机虽然标定的额定功率只有 0.3kW, 但是当风速达到 12.0m/s 时, 其输出已达到 0.46kW, 该型风力发电机在其它风速下的部分输出数据为: 0.06kW (3.0m/s), 0.11kW (5.0m/s), 0.245kW (8.0m/s), 0.4kW (10.0m/s), 0.47kW (13.0m/s), 0.46kW (14.0m/s), 0.45kW (15.0m/s), 0.38kW (17.0m/s), 0.27kW (20.0m/s)。通过比较不难看出, 在 10.0m/s 以下的风速区域, FD2.5—300 型风力发电机的输出特性明显优于 Fortis Espada 800W 风力发电机的输出特性。由于对于绝大部分地区, 距地面高 10m 处的风速主要集中在 10.0m/s 以下, 这意味着在大部分地区前者可能会比后者发出更多的电能。这个例子清楚地说明了必须使用风力发电机自身实际的输出特性来

时间已经四舍五入到小时值。一旦知道了每月开、关灯的时间, 负载全年每小时的用电分布也就确定了。

计算它的发电量, 倘若仅使用风力发电机的额定功率(容量)来设计系统, 不但会误导读者, 还会导致严重错误的系统设计。



1—拟合曲线 2—输出特性曲线

图 2 Fortis Espada 800W 型风力发电机的输出特性曲线及其拟合曲线

Fig 2 The output characteristic and its fitting curves of the Fortis Espada 800W wind generator

根据系统的工作电压确定出的 PV 组件和蓄电池的串联数为:  $N_{PVS}=2$ ,  $N_{bs}=12$ 。在匹配设计的过程中使用了如下参数值: 最大功率点跟踪器、控制器和逆变器的效率分别取 0.99, 0.99 和 0.92; 蓄电池组的充电效率取 0.85; 由连接损失和其它损失引入的因子  $F_c$  和  $F_0$  分别取 0.98 和 1.0。根据以上参数和年平均日负载用电量  $E_{Lpd}=3298.356\text{Wh}$  确定的蓄电池组的最小容量为

7170.34Wh, 它可以满足负载一天的用电需要。而由上篇文章中的(13)式及(12)式确定出的程序模拟的蓄电池和 PV 组件串的并联数的下限为:  $N_{bp, \min} = 3$ ,  $N_{PVP, \min} = 7$ 。程序计算了  $N_{bp}$  从 3 变到 45 而  $N_{PVP}$  从 3 变到 70 的不同系统配置的全年的 LPSP 值。图 3 给出了部分计算结果并连同斜率等于

$$-\frac{C_{sb} \cdot N_{Is}}{C_{spv} \cdot N_{PVS}} = -\frac{580 \times 12}{1400 \times 2} = -\frac{87}{35}$$

的平衡曲线的切线。

根据用户给定的两种系统供电的可靠性(即 LPSP 值等于 0.01 和 0.1)确定出的优化的系统配置为:  $N_{bp} = 5$ ,  $N_{PVP} = 17$ (对应于 LPSP=0.01 的系统供电可靠性要求, 在下文中将被称为配置 1)和  $N_{bp} = 3$ ,  $N_{PVP} = 7$ (对应于 LPSP=0.1, 它将被称为配置 2)。以下将给出这两种优化的系统配置的性能表现。

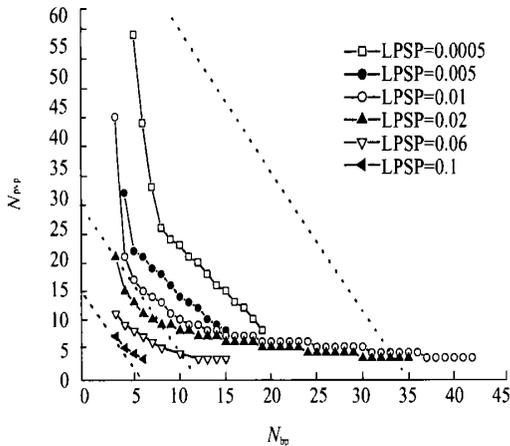


图 3 满足不同供电可靠性即 LPSP 值要求的蓄电池和 PV 组件串的并联数之间的平衡曲线

Fig 3 Trade off curves between the parallel connection numbers of battery and PV module strings for the different LPSP values

## 2 匹配设计的结果及讨论

图 4 给出了这两种系统配置蓄电池组全年每小时荷电状态 SOC 的变化。对于配置 1, 蓄电池组处于最小荷电状态的情况主要发生在 4 月份(在 2161 到 2880h 之间); 而对于配置 2, 蓄电池组的 SOC 几乎每月都会达到放电的下限, 蓄电池组处于最小荷电状态的情况主要发生在 4 月份, 8 月份(在 5089 到 5832h 之间)和 12 月份(在 8017 到 8760h 之间)。图 5 给出了这两种系统配置每日的

能量产出和消耗状况。从图 5 可以看出, 负载最大的日用电量是 12 月份的 3900Wh, 最小的日用电量是 6 月份的 2700Wh; 此外, 这两种系统配置的总输出的变化都相当剧烈, 并且风力发电机输出的变化远比 PV 方阵输出的变化剧烈, 这是由风能和太阳能资源本身分布的不均匀程度造成的。两种系统配置的不同之处在于 PV 方阵对配置 1 总输出的贡献要大于对配置 2 的贡献。

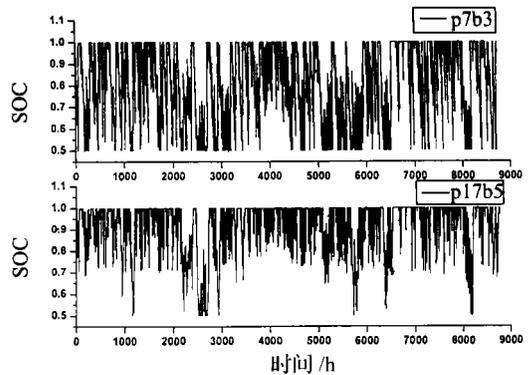
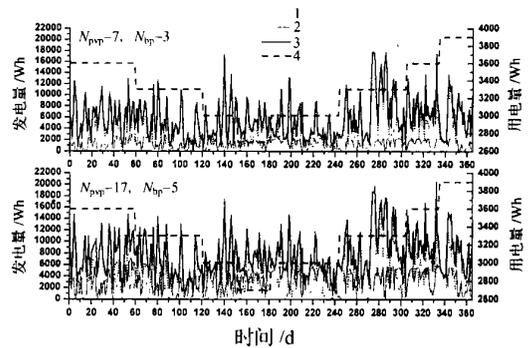


图 4 两种优化的系统配置的蓄电池组全年每小时荷电状态 SOC 的变化

Fig 4 Hourly variation of the SOC of battery bank for the two kinds of optimum configurations



1—发电机的输出; 2—PV 方阵的输出; 3—系统输出的总的可用电量; 4—负载用电量

图 5 两种优化的系统配置全年每日的能量供求状况

Fig 5 Daily energy production and consumption situations for the two kinds of optimum configurations

表 3 给出了这两种系统配置每月的性能表现, 它包括系统发出的多余电量  $E_{surp}$ , 亏欠负载的电量 LPS, 停电时间  $T_t$ , 缺电率 LLP 和功率供给亏欠率 LPSP 等。结果与图 1, 图 4 和图 5 揭示的结果符合得很好。由于在 4 月份风能和太阳能资源都

比较匮乏(如图 1 所示), 两种配置的系统供电的最大亏欠量均发生在该月。对于配置 2, 由于选取的 PV 方阵的容量有限, 风力发电机的输出基本决定了互补发电系统的总输出(如图 5 所示)。系统供电不足的情况几乎每月都会发生。除了 4 月份之外, 供电亏欠比较严重的月份还有 8 月份和 12 月份, 它们分别由 8 月份最差的风力条件和 12 月份最大的负载用电量造成。由于 6 月份负载的用电量最小, 10 月份的风力条件最好, 在这两个月系统供电不足的几率最小。对于配置 1, 由于选取的 PV

方阵的容量足够大以弥补单一风力发电供电的不足, 除了 4 月份之外, 系统供电不足的情况很少发生。该配置体现了风光互补发电系统应该具有的优点, 即利用风光资源在时间分布上所呈现出的一定的互补性来减少系统处于亏电期的时间。值得注意的是, 这两种系统配置每月都会产生不能被负载利用的多余电量, 这是由两种自然资源分布与负载用电分布的不匹配造成。总之, 系统的工作情况是各种因素诸如负载用电量、自然资源分布和选定组件的容量等综合作用的结果。

表 3 两种配置每月发出的多余电量  $E_{\text{surp}}$ , 亏欠负载的电量 LPS, 停电时间  $T_f$ , 缺电率 LLP 和功率供给亏欠率 LPSP

Table 3 Monthly energy profit and loss, power failure time ( $T_f$ ), LLP and LPSP of two configurations

月份	配置 1					配置 2				
	$E_{\text{surp}}/\text{kWh}$	LPS/kWh	$T_f/\text{h}$	LLP	LPSP	$E_{\text{surp}}/\text{kWh}$	LPS/kWh	$T_f/\text{h}$	LLP	LPSP
1	102.33	-	-	-	-	68.00	5.20	30	0.0403	0.0465
2	109.74	0.52	2	0.0030	0.0052	54.35	8.80	43	0.0640	0.0873
3	127.22	-	-	-	-	67.06	4.01	21	0.0282	0.0392
4	34.21	9.75	40	0.0556	0.0985	21.72	27.01	106	0.1472	0.2728
5	99.67	0.26	4	0.0054	0.0028	67.45	13.61	59	0.0793	0.1463
6	114.41	-	-	-	-	56.38	0.31	2	0.0028	0.0038
7	117.22	-	-	-	-	53.10	6.04	26	0.0350	0.0649
8	48.68	0.44	2	0.0027	0.0047	12.92	24.35	103	0.1384	0.2618
9	94.07	-	-	-	-	46.20	15.26	63	0.0875	0.1541
10	251.74	-	-	-	-	185.24	2.26	11	0.0148	0.0221
11	171.61	-	-	-	-	103.80	1.37	6	0.0083	0.0127
12	100.74	1.42	5	0.0067	0.0117	66.82	18.06	71	0.0954	0.1493

表 4 给出了这两种系统配置全年的性能表现。尽管从系统全年能量供需平衡的角度来看, 负载的用电要求可以被单个风力发电机满足, 但是由于风能分布和负载用电分布的不匹配, 有时系统供电不足, 有时系统发电量过剩。通过选择合理的风力发电机和 PV 方阵容量组合, 比如配置 1, 风能和太阳能资源在时间分布上所呈现出的一定的互补性可以被充分利用, 因此系统供电不足的时间可以被大幅度减小。对于配置 1, PV 方阵、风力发电机和蓄电池组的总成本是 47600.0+12000.0+34800.0=94400.0 元, 全年停电时间是 53.0h, 亏欠负载电量 12.39kWh, 它对应于 41.3h 的累计停电时间; 对于配置 2, PV 方阵、风力发电机和蓄电池组的总成本是 19600.0+12000.0+20880.0=

52480.0 元, 全年停电时间是 541.0h, 亏欠负载电量 126.26kWh, 它对应于 420.8h 的累计停电时间。

表 4 两种配置全年的性能表现

Table 4 The whole year's performances of the two configurations

	配置 1	配置 2
负载用电量/kWh	1187.408	1187.408
风力发电机发电量/kWh	1593.503	1593.503
PV 方阵发电量/kWh	1247.750	513.779
系统发出的总的可用电量/kWh	2800.488	2081.124
系统发出的多余电量/kWh	1371.641	803.032
亏欠负载的电量/kWh	12.39147	126.258
LLP	0.00605023	0.06175799
LPSP	0.01029277	0.1048742

### 3 结 论

本文根据风光互补发电系统优化设计的 CAD 方法编制了相应的匹配设计程序。并把该程序应用于一假定安装在香港横澜岛上的风光互补发电系统。根据横澜岛的地理位置、每小时实测的气象数据、用户选定的组件的特性和价格、用户对互补发电装置的要求以及负载全年用电分布等数据, 由程序给出了以最小投资成本满足两种供电可靠性要求即全年功率供给亏欠率 LPSP 分别等于 0.1 和 0.01 的优化的系统配置。文中还比较并讨论了这两种优化的系统配置每小时、每日、每月和全年的详细的

性能表现。

#### [参考文献]

- [1] 艾 彬. 小型户用风光互补发电系统匹配的计算机辅助设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学理工学院硕士学位论文, 2000.
- [2] Borowy B S, Salameh Z M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(2): 367—375.
- [3] Lu Lin, Yang Hongxing. Wind data analysis and a case study of wind power generation in Hong Kong[J]. Wind Engineering, 2001, 25(2): 115—123.

## OPTIMALLY DESIGN OF PV/WIND HYBRID SYSTEM II. A CASE STUDY

Ai Bin<sup>1,3</sup>, Yang Hongxing<sup>2</sup>, Shen Hui<sup>1</sup>, Liao Xianbo<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070 China;

2. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong;

3. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the CAD method for optimum sizing of PV/wind hybrid system a set of match calculation programs has been developed. Applying these match calculation programs to an assumed PV/wind hybrid system to be installed at Waglan island of Hong Kong, two optimum configurations which correspond to LPSP values equal to 0.1 and 0.01 respectively were given based on load demand and hourly solar radiation, wind speed and temperature data measured by Hong Kong Observatory in 1989. Hourly, daily, monthly and yearly performances of the two optimum configurations are also compared in this paper.

**Keywords:** PV/wind hybrid system; Optimum sizing; CAD method

联系人 E-mail: aibin@ms.giec.ac.cn 或 aixiaobin@hotmail.com