

风光储输系统最优容量配比研究

张钟文¹, 曹敦¹, 彭长巍², 钱芳¹

(1. 四川省电力公司检修公司雅安中心, 四川 雅安 625000;

2. 张家界供电局, 湖南 张家界 427000)

摘要: 风能和太阳能均为可再生清洁能源, 由于其不确定性, 接入电网会造成一定的波动, 但风能和太阳能有天然的互补性, 再与蓄电池储能相结合, 可使其功率输出平稳, 减少波动。以弃风损失、弃光损失最小为目标对风力发电、光伏发电和蓄电池储能三方面进行容量最优配置的研究。首先针对风速数据和太阳辐射量数据, 确立了风速模型以及光伏阵列倾斜面上太阳辐射量的计算, 利用风力机功率输出特性和光伏阵列输出特性, 得到风力发电量和光伏发电量与风速和倾斜面上太阳辐射量的关系式, 最终建立一个含不确定参数的优化模型。以某地区的风速数据和太阳辐射量数据为例, 根据优化模型, 在该地区建立风光储输系统并对系统各部分的容量进行最优化配置。

关键词: 风光储输系统; 优化设计; 容量配置; 双参数威布尔分布

Abstract: Wind energy and solar energy are the renewable clean energy. Because of their uncertainty, there will be some fluctuations when accessing into the grid. The wind energy and solar energy have a natural complementarity, and then combined with the battery energy storage, the output of their power can be smooth and the fluctuations can be reduced. The optimal configurations of the wind power generation, photovoltaic power generation and battery energy storage are studied taking the minimum loss of wind power casting and the minimum loss of light casting as the objective. Firstly, aiming at the wind velocity data and solar radiation data, the wind velocity model is established and the solar radiation of the established PV array tilted surface is calculated. Using the power output characteristics of wind turbine and the output characteristics of photovoltaic array, the relationship expressions between wind power generation, photovoltaic power generation, wind velocity and solar radiation on tilted surface are obtained. Finally, the optimization model with uncertain parameters is established. Taking wind velocity data and solar radiation data of a region for example, a hybrid wind/PV/energy storage system is built and the optimal capacity configuration for the various parts of the system is calculated according to the optimization model.

Key words: hybrid wind/PV/energy storage system; optimization design; capacity configuration; two-parameter Weibull distribution

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0037-07

0 引言

风光储输发电系统, 即风力发电、光伏发电和储能输能相结合的系统, 是采用风力发电机和太阳能电池方阵组成的一个发电系统, 它从太阳能、风能发电都需要蓄电池组储能的特点出发, 巧妙地将太阳能发电和风能发电结合在一起, 在很大程度上避免了太阳能、风能最大的问题, 即发电可维持性不高的缺点^[1]。

风光储输系统^[2,3]有以下特点: (1)利用风能、太阳能的互补性, 可以获得比较稳定的输出, 系统有较高的稳定性和可靠性; (2)在保证同样供电的情况下, 可大大减少储能蓄电池的容量; (3)通过合理地设计

与匹配, 可以基本上由风光储输发电系统供电, 很少或基本不用启动备用电源如柴油机发电机组等, 可获得较好的社会效益和经济效益。

风光储输系统容量优化的目标应同时考虑可靠性、经济性及环境效应。经济性即保证最少弃风损失(风能完全跟踪风速)、弃光损失(光能跟踪辐射量), 以最小的成本获得最大的电能输出; 可靠性即功率输出平稳, 风光储联合功率系统输出符合负荷曲线; 环境效应即对环境的污染最小, 由于是可再生能源发电, 相比传统能源发电, 对环境的污染较小。

1 发电模型建立

1.1 风力发电模型

风速模型选用双参数威布尔分布风速模型^[4-6]。

双参数威布尔(Weibull)分布是一种主流的描述风频分布的概率模型,Weibull双参数分布需要从离散数据拟合出理想的能反应真实情况的函数,计算过程中风速间隔按照国际IEA组织推荐的比恩法(method of bins)定为1 m/s。

Weibull分布的概率密度函数为

$$P(v < v_i < v + dv) = P(v > 0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right] dv \quad (1)$$

式中 c 是尺寸参数; k 是形态参数; v 为样本风速。

其累积分布函数为

$$f(v) = P(v < v_i) = P(v \geq 0) \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right]\right\} \quad (2)$$

取风速作为随机变量,求其前6阶矩,用Gram-Charlier级数就可以很好地拟合出其概率密度函数。

如果知道了风速平均值 \bar{v} 与风速方差 σ 则

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} (1 \leq k \leq 10) \quad (3)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

式中 $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$; $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$; $\Gamma(a)$ 为

Gamma函数,其定义式为 $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy$ 。

风能平均功率密度可以用式(5)表示。

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (5)$$

式中 ρ 为空气密度。

如果 $f(v)$ 是威布尔分布参数,则

$$\bar{P}_w = \frac{\rho v^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^3} \quad (6)$$

不同的风力机具有不同的功率输出特性,所以用来描述风机性能模型也不大一样,由于要建立容量配置的最优模型,故功率输出特性要与额定功率有关,采用下述方程来计算风力机的功率输出^[7-9]。

$$P_w(v) = \begin{cases} P_r \frac{v^k - v_c^k}{v_r^k - v_c^k} & (v_c \leq v \leq v_r) \\ P_r & (v_r \leq v \leq v_f) \\ 0 & (v \leq v_c \text{ or } v \geq v_f) \end{cases} \quad (7)$$

式中 P_r 为风力机的额定功率; v_c 为切入风速; v_r 为额定风速; v_f 为切出风速; k 为威布尔形状参数。

通过分析一年中风电场所在地的风速数据,可求得年平均风速和方差,运用公式(1)、(3)、(4)求出年威布尔形状参数 k 、标度参数 c ;通过分析风电场所在地每月风速数据,求得月平均风速和方差,运用公式(1)、(3)、(4)求出月威布尔参数^[8-10]。

风速大于或等于某一特定值的概率,可以用下面的威布尔公式来计算。

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \\ P(v \geq u) = \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

对于大多数风电机而言,切入风速在3.0~4.5 m/s。如果假设其切出风速为无穷大,则通过运用式(8),可以求得当风电机切入风速为3.0 m/s时,全年运行7 869 h,运行概率达89.83%;切入风速为4.5 m/s时,全年运行6 692 h,运行概率达到76.39%。从这么高的运行小时数可以看出,若风电场所在地的风能发电储量丰富,切入风速为3 m/s的风电机几乎可以全年运行。

运用式(8)与风力机功率输出特性,可求得风力机的每月发电量与年发电量。为计算方便,将每月天数按照30 d计算。

1.2 光伏发电模型

要求得太阳辐射量,需要对当地的太阳能辐射资源、地理及气象数据有尽量详尽的了解,从气象站得到的资料一般只有水平面上的太阳总辐射量 H 、水平面散射量 H_d ,通过这两个数据求得太阳在不同倾斜面上辐射量^[11]。

$$HT = (H - H_d) R_b + H_d \frac{1 + \cos\alpha}{2} + H \frac{1 - \cos\alpha}{2} \rho \quad (\text{kWh/m}^2/\text{day}) \quad (9)$$

式中 H 、 H_d 为水平面的总辐射量和散射量; α 为光电板倾角; ρ 为地物表面的反射率,在工程计算中一般取0.2; R_b 为倾斜面与水平面的直射量之比。

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \alpha) \cos\delta \sin w_s + w_s \frac{\pi}{180} \sin(\phi - \alpha) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin w_0 + w_0 \frac{\pi}{180} \sin\phi \sin\delta} \quad (10)$$

式中 ϕ 为当地纬度; w_s 、 w_0 是倾斜面和水平面的日落时角; δ 为太阳赤纬角。

$$\delta = 23.45 \sin|2\pi \times \frac{284 + n}{365}| \quad (11)$$

式中 n 是一年中的第几天。

$$W_0 = ar \cos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (12)$$

$$W_s = \min[W_0, ar \cos(-\tan(\phi - \alpha) \cdot \tan\delta)] \quad (13)$$

光伏发电量为

$$E_s = [P - P(T - 25) \times 0.4\%] \frac{HT}{1} / 1000 \quad (\text{kWh/day})$$

式中 P 为光伏发电额定容量; T 为月平均气温。

1.3 蓄电池模型

风光储输系统一般都建在风能和太阳能都比较丰富的地区,能充分利用风能和太阳能互补发电,但是一年之中还是存在日照少、风力较弱的时候,这个时候需要用蓄电池来供电,采用下述模型来确定蓄电池最低容量^[1]。

蓄电池组最低容量的确定和负载的要求有关,假定某地点的负载功率曲线 f_r 为一直线,即一天中负载为一常量,当选用了某一类型的风机和 PV 组件,确定了数量之后,根据当地的气象数据,得出它们的月发电量曲线分别为 f_1 和 f_2 ,两者相加的和 f_3 就是发电系统月发电量曲线(f_3 与 f_2 重合部分,即当没太阳光 f_1 为 0 的时候),然后与负载功率需求曲线 f_r 对比 f_3 处于 f_r 下端的时间区间段是需要蓄电池组来供电的时间。当 $f_3 < f_r$ 时需要蓄电池组供电,对这些区间部分分别积分,积分绝对值大者为当月蓄电池组最低容量 W_b 。考虑到蓄电池的最大放电深度,实际计算还要除以最大放电深度 DOD ,深循环型蓄电池一般取值为 80%,浅循环型蓄电池一般取值为 50%。假设在一年中共有 n 段区间,那么蓄电池最低容量 W_b 可以表示为

$$W_b = \max[\int (f_r - f_3) dx] / DOD \quad (14)$$

在算例的蓄电池组最低容量确定中,假设某地点的负载功率曲线一定,每月的负载功率设为一确定值,当确定了风力发电、光伏发电容量之后,根据当地的气象数据,分别得到它们的月发电量,两者相

加的和就是发电系统月发电量,然后与负荷月需电量相比较,若月发电量小于负荷月需电量,则该部分电量由蓄电池来提供,得到当月蓄电池最低容量,比较每月蓄电池最低容量,取最大值作为所需的蓄电池容量。

1.4 负荷模型

优化目标要求理想平稳输出,即联合系统的功率输出曲线符合负荷曲线,在研究中,考虑功率输出符合负荷曲线的走向趋势即可,并网后不会引起电网波动。

年负荷曲线一般指年最大负荷曲线,即表示一年内每月最大有功功率负荷变化^[11]。根据年负荷曲线,可得到每个月的最大有功功率负荷,因为该优化问题是按月考虑,简化考虑时,将每个月的负荷都按照该月的最大有功负荷来计算。

对于不同行业,均可从有关手册查到他们的最大负荷利用小时数,故用电量为每月的最大负荷与该月最大负荷利用小时数的乘积。

2 优化模型及优化算法

2.1 优化模型

为确定风力发电、光伏发电和储能 3 个方面的最优配比,建立优化模型,目标是保证最少的弃风损失、弃光损失,最少的弃风损失是指把已有风能全用上,风能完全跟踪风速;功率输出平稳,即风光储输联合系统的输出要符合负荷曲线,最终要求功率输出平稳是因为调风调频比较困难。

在建立优化模型时,将最小弃风损失、弃光损失作为目标函数,功率输出平稳作为约束条件,即负荷曲线留有一定裕度,有一定的上下波动的范围。先暂不考虑蓄电池的容量,风力发电容量、光伏发电容量确定后,再计算蓄电池容量^[12-14]。

系统的总的弃风损失、弃光损失最小。

目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^{12} [W_w(i) + W_s(i) - W_{load}(i)] \quad (15)$$

式中, W_w 为风力发电能量;第 i 个元素代表风力发电机在第 i 个月发电的总能量; W_s 为光伏发电能量,第 i 个元素代表光伏组件在第 i 个月发电的总能量。同理, W_{load} 为负荷用电量,第 i 个元素代表负载在第 i 个月所需要的总能量。每个月均按 30 d 来计

算。

功率输出符合负荷曲线,留有一定裕度。

约束条件为

$$\begin{cases} P_w > 0 \\ P_s > 0 \\ P_{load} > 0 \\ 0.9P_{load}(i) \leq P_w(i) + P_s(i) \leq 1.1P_{load}(i) \quad i=1, 2, \dots, 12 \end{cases} \quad (16)$$

式中 P_w 为风力发电功率,第 i 个元素代表风力发电机在第 i 个月的发电平均功率; P_s 为光伏发电功率,第 i 个元素代表光伏组件在第 i 个月的发电平均功率。同理 P_{load} 为负荷月功率,第 i 个元素代表负载在第 i 个月的用电平均功率。

2.2 优化算法

在研究中,所采用的优化算法的基本思想为:采用循环求解的方法,根据负荷用电量初步估计风光的最大装机容量,即上限值(该值也可随意假设)取值时要偏大,风力发电量、光伏发电量作为外层循环,约束条件作为内层循环,符合约束条件则求出其风光损失,通过循环找出风光损失最小的最优容量配置。

优化算法流程图如图1所示。

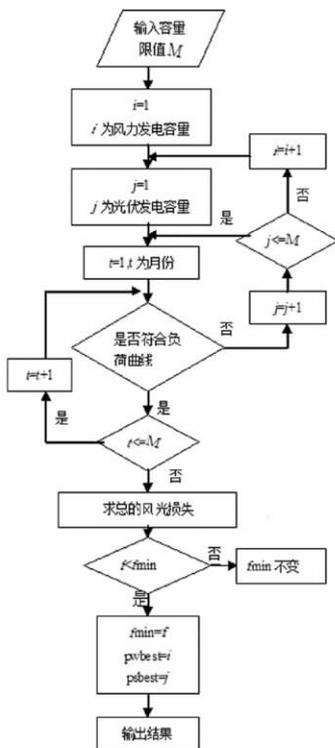


图1 优化算法流程图

3 算例分析

某地地理位置为北纬 $45^{\circ}40'$,东经 $116^{\circ}58'$,该地的气象数据如表1所示。

表1 当地气象数据资料

月份	水平面总辐射平均值 /($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	水平面散射辐射平均值 /($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	月平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	月平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.86	0.74	-22	7.26
2	2.69	1.08	-17	6.41
3	3.97	1.57	-8.6	6.91
4	5.26	2.07	2.24	7.67
5	6.25	2.44	11.5	6.29
6	6.21	2.59	17.9	6.79
7	5.68	2.49	21.1	6.47
8	5.17	2.20	19.4	6.33
9	4.21	1.75	10.4	6.96
10	3.06	1.26	0.93	7.78
11	2.06	0.84	-11	7.36
12	1.63	0.65	-19	8.26

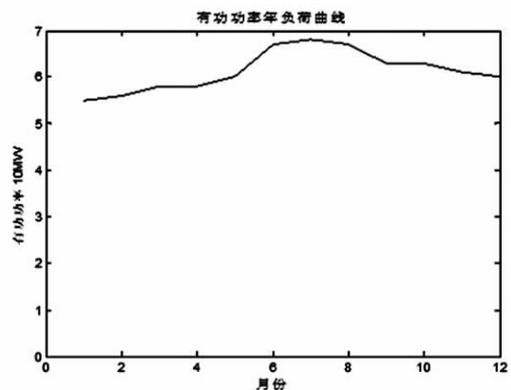


图2 该地区有功年负荷曲线

该地的年负荷曲线如图2所示。

若在该地建立风光储输系统,则确定风力发电、光伏发电和蓄电池的容量。

通过分析该地区的风速数据,求得年平均风速和方差。运用式(1)、(3)、(4),可求出威布尔形状参数 $k=2.27$,标度参数 $c=8.02 \text{ m/s}$ 。

通过分析每月风速数据,求得月平均风速和方差。运用式(1)、(3)、(4)可求出月威布尔参数,其结果如表2所示。

从表2中的数据可以看出,每月的威布尔参数

各不相同,表明一年中每个月的月平均风速分布函数各不相同。图3列出了两个典型的月平均风速分布函数曲线的比较。

对于大多数风电机而言,切入风速在3.0~4.5 m/s。如果假设其切出风速为无穷大,则运用式(9),可以求得风电机风速为3.0 m/s时,全年运行7869 h,运行概率达到89.83%;切入风速为4.5 m/s时,全年运行6692 h,运行概率达76.39%。从这么高的运行小时数可以看出,该地区的风能发电储量十分丰富,切入风速为3 m/s的风电机几乎可以全年运行。

通过式(6)求出该地区年风能平均功率密度为377.4 W/m,全年风能发电储量为3306 kWh/m²。同样运用式(5)可以求得月风能平均功率密度,结果如表3所示。

表2 当地月威布尔参数

月份	平均风速/ (m·s ⁻¹)	形状参数 <i>k</i>	标度参数 <i>c</i> /(m·s ⁻¹)
1	7.26	2.48	8.19
2	6.41	2.24	7.23
3	6.91	2.38	7.80
4	7.67	2.57	8.64
5	6.29	2.21	7.11
6	6.79	1.99	7.66
7	6.47	1.88	7.29
8	6.33	2.09	7.15
9	6.96	2.23	7.86
10	7.78	2.48	8.77
11	7.36	2.95	8.24
12	8.26	2.54	9.30

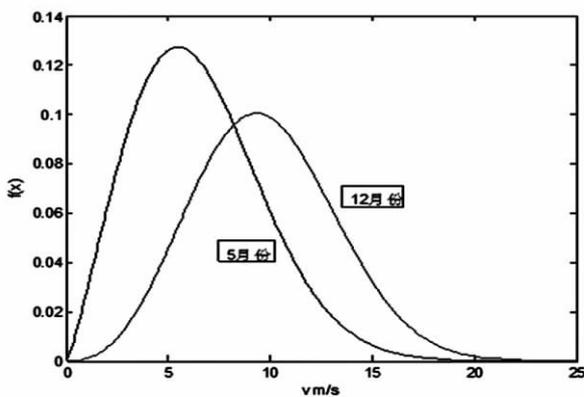


图3 5月和12月风速分布函数曲线图

图4给出了月平均风速和月风能平均功率密度的变化曲线。从图4中可以看出,两条曲线有类似

的变化趋势,但不尽相同,原因在于月平均功率密度不仅由平均风速决定,而且还由威布尔形状参数*k*所决定。

表3 该地区月风能平均功率密度

月份	平均功率密度/(W·m ⁻²)
1	375.3
2	281.0
3	334.3
4	431.1
5	268.7
6	374.5
7	344.9
8	288.7
9	361.1
10	462.0
11	348.1
12	543.0

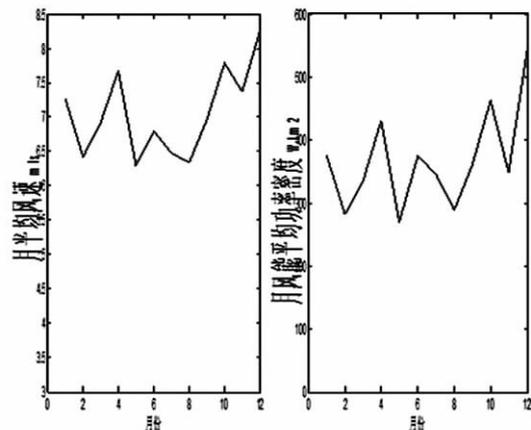


图4 月平均风速和月风能平均功率曲线图

所选用风机的额定风速为10.5 m/s,切入风速为4 m/s,切出风速为18 m/s。表4为所选定的风电机在各个月份不同的运行概率。

从表4中可以看出,每个月风电机的运行概率都不一样,11月份的运行概率最低,为71.94%。若按照每月30 d计算,11月份和7月份的运行时间相差121.5 h。月运行概率的变化趋势与月风能平均功率密度的变化趋势不一致,其原因在于运行概率不仅由风速分布决定而且还决定于风电机的性能。

根据提到的风力机功率输出特性式(7),假设装机容量为*P*,在不同的风速时风电机所发出的功率可用风电机输出特性来求解。

表4 该地区风电机月运行概率

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
运行概率	0.843 5	0.766 3	0.814 8	0.869 5	0.754 9	0.755 8	0.719 4	0.742 0	0.799 4	0.864 4	0.888 1	0.884 6

月风力机发电量则根据月平均发电功率、月运行概率来求解,每月按照30 d来计算。

光伏发电量的计算相比较为简单,根据该地区的气象资料中的每月平均水平面总辐射量和水平面散射辐射,利用公式(9)~(12)求出倾斜面上辐射量,倾斜角度在文中的求解中设为40°。根据所求出的每月平均辐射量,利用公式(13),得到光伏发电量与辐射量的关系式,即当光伏发电系统的容量确定以后,光伏系统发电量与光辐射量有一定的对应关系。

根据年有功功率负荷曲线,根据有功功率年负荷曲线的定义,可知其表示一年内每月最大有功功率负荷变化,故由该曲线可得到每个月的最大功率,并将其作为每月负荷有功功率来考虑,每天负荷最大利用小时数为15 h,每月负荷有功功率如表5所示。

表5 该地区月负荷有功功率

月份	有功功率 10 MW
1	5.5
2	5.6
3	5.8
4	5.8
5	6.0
6	6.7
7	6.8
8	6.7
9	6.3
10	6.3
11	6.1
12	6.0

算例计算结果如下。

风力发电量、光伏发电量容量分配结果为风力发电容量为60 MW,光伏发电容量为110 MW,初步计算每个月的蓄电池充放电量如表6所示。

表6 初步计算蓄电池充放电量(-代表放电) 单位: MWh

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
充放电量	1.71	-90.33	43.48	240.9	-4.66	-50.35	-158.92	-179.81	-40.62	64.84	-105.16	123.68

由表6可以看出,蓄电池4月份放电量最大,蓄电池的容量为240 MWh,在研究中由于未考虑蓄电池的放电深度,故取最大的蓄电池充放电量作为蓄电池的容量。

最后可得该实例的最优化配置结果即风力容量为60 MW,光伏容量为110 MW,蓄电池容量为240 MWh。

将风光联合系统的功率输出曲线与有功功率负荷曲线相比较,如图5所示。

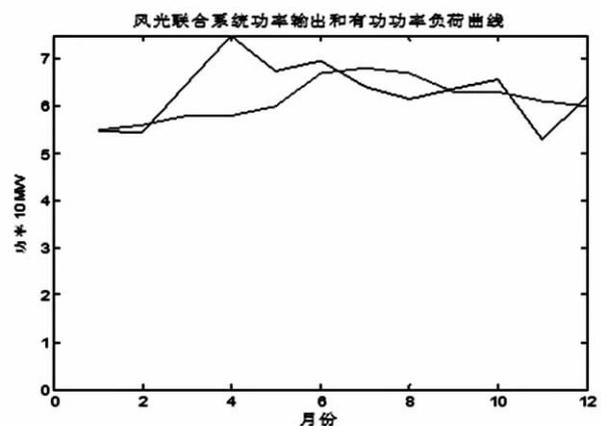


图5 风光联合系统功率输出曲线和有功功率负荷曲线

从图5可以看出,风光联合系统的功率输出曲线较接近有功功率负荷曲线。在风、光联合系统中加入蓄电池可进一步改善系统的输出特性,使系统输出稳定,更符合有功功率负荷曲线。

4 结 语

随着传统能源的供应不足以及传统能源对环境的污染加重,可再生能源的发展越来越引起人们的关注。风能和太阳能这两种能源取之不尽用之不竭,并且具有天然的互补性,建立风光互补系统将会是今后大力发展的方向。

根据发电模型,进行风、光储输系统优化,优化目标有两个:系统弃风弃光损失最小;系统输出平稳,

功率输出曲线基本符合负荷曲线。在研究中,将目标2作为约束条件,并考虑一定的裕度,将目标1作为优化目标,进而建立了优化模型。但未考虑蓄电池容量与其成本的关系,在下一步的研究中,会对其进行进一步的改进。

参考文献

[1] 聂继华,杨益民.风/光互补发电系统的优化设计[J].节能,2008(10):50-53.

[2] 李爽.风/光互补混合发电系统优化设计[D].北京:中国科学院,2001.

[3] 朱芳,王培红.风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化[J].上海电力,2009(1):23-26.

[4] 刘晓光.风力发电系统风力机输出特性的模拟与控制[D].青岛:青岛大学,2009.

[5] 祝贺,徐建源.风电场GM-WEIBULL风速分布组合模型出力预测[J].华东电力,2008,36(11):144-146.

[6] HJ Green, J Manwell. A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems[A]. Proceedings of Wind Power'95[C]. Washington DC, 1995.

[7] 徐宝清,田德,韩巧丽,等.风力发电机组输出功率特性的数值模拟[J].农业工程技术:新能源产业,2008(1):30-33.

[8] 陈博.风光复合发电的初探[J].上海电力,2008(2):139-141.

[9] 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.

[10] 陈俊.光伏系统发电量计算的分析[J].农村牧区机械化,2006(2):27-28.

[11] 陈珩.电力系统稳态分析(第三版)[M].北京:中国电力出版社,2007.

[12] 陈赞,严正.可再生能源并网发电的可靠性分析和节能分析[J].水电能源科学,2009,27(1):215-218.

[13] 李丹,彭军,余岳峰.离网型风光互补发电系统匹配方法优化研究[J].华东电力,2008,36(3):86-90.

[14] 包能胜,刘军峰,倪维斗.风电与燃气轮机互补发电容量配比的仿真研究(广东省自然科学基金项目)[R].

(收稿日期:2012-09-25)

(上接第28页)

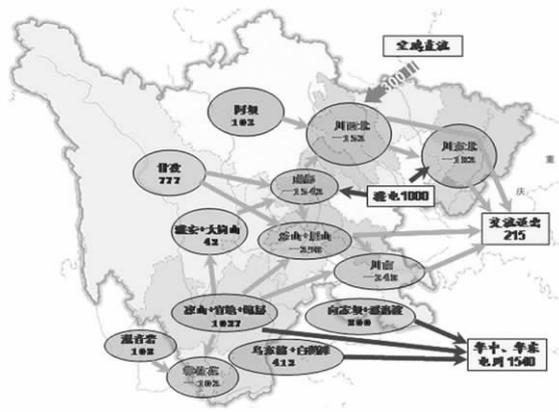


图6 2020年枯大方式四川电网电力流向示意图

5 结语

(1) 四川水电所占比重大,丰枯期出力差异明显,“丰盈枯缺”矛盾十分突出。引入新疆火电是解决枯期电力缺额的最佳途径,通过水火互济运行,“疆电入川”与“川电外送”通道协调运行,四川能源综合利用及特高压交直流电网的整体经济效益明显提高。

(2) 根据四川省内电力流向分析,确定“疆电入川”受端换流站宜落点在成都东部(金堂)、德阳南部(中江)、遂宁西部(大英)、资阳北部(简阳、乐至)结合部。

参考文献

[1] 刘振亚.特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年)[M].北京:中国电力出版社,2006.

[2] 刘振亚.特高压交流输电技术研究成果专辑(2005年)[M].北京:中国电力出版社,2006.

[3] 张云洲.我国跨区域电力资源配置前景分析特高压[J].中国电力,2004,37(9):5-7.

[4] 孙昕,刘泽洪,印永华,等.中国特高压同步电网的构建以及经济性和安全性分析[J].电力建设,2007,28(10):7-11.

[5] 孙正运,裴哲义,夏清,等.减少水电弃水调峰损失的措施分析[J].水利发电学报,2003,83(4):1-7.

[6] 魏杰.关于当前西藏电力供需形势的分析[J].水力发电,2005,31(7):14-16.

(收稿日期:2012-10-24)