

基于联合概率分布的风光互补发电系统优化配置

齐志远¹, 郭佳伟², 李晓炆³

(1. 内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古呼和浩特抽水蓄能电站, 呼和浩特 010060;

3. 内蒙古气象信息中心, 呼和浩特 010051)

摘 要: 为提高风光互补发电系统效率、降低建设成本和增强供电可靠性, 提出一种系统优化配置的设计方法。综合考虑风力发电和光伏发电出力的相关性、储能蓄电池寿命等因素, 建立以系统发电成本最低为目标和以负载失电率为约束条件的优化函数, 用改进和声搜索算法对目标函数进行优化。整个求解过程通过二次优化完成, 在初次优化结果的基础上, 对得到的风电机组功率根据市场实际情况进行修正, 然后对目标函数重新优化, 最终得到光伏发电和储能装置容量的优化结果。通过实例对提出的优化配置方法进行模拟验证, 结果表明经过优化配置后的风光互补发电系统能够满足负载供电需求并降低建设成本。

关键词: 风力发电; 光伏发电; 互补系统; 优化配置; 联合概率分布; 改进和声搜索; 二次优化

中图分类号: TM715

文献标识码: A

0 引 言

风能和太阳能发电具有互补性, 风光互补发电系统作为可再生能源利用的一种形式, 有着广泛的应用前景。对于常规电网不能到达的偏远地区, 风光互补发电系统是解决电力供应问题的一种手段。由于风光互补发电系统无大电网作为备用容量支持, 不合理的系统配置方案将影响供电可靠性和增加建设及维修成本。

在风光互补发电系统的优化配置中, 风速和光照的概率密度函数影响风力发电和光伏发电的功率预测精度, 目前对风速和光照强度概率分布的描述尚无统一形式。文献[1, 2]用威布尔分布和贝塔分布分别描述风速和光照强度, 文献[3]用伽马分布描述风速, 文献[4, 5]用正态分布描述风速和光照强度。实际上风速和光照概率密度函数不一定精确满足特定的典型分布, 因此基于参数检验法的概率分布模型具有一定局限性。在建立风光互补发电系统优化配置的目标函数时, 文献[6]将风速和光照强度在评估时间段内作为不变量处理, 未考虑风速和光照的相关性。文献[7]将风力发电和光伏发电出力均按服从独立分布处理。文献[8]用频

率统计形式计算局部条件下的风速和光照的联合概率分布。文献[9]寻求单一成本目标下的优化。文献[10]采用最大模糊满意度法将多目标模型转化成单目标进行优化, 但各目标的加权值分配具有较大的主观性。在求解目标优化模型时, 常采用遗传算法、粒子群算法、混沌优化算法、蚁群算法、细菌觅食算法等^[11~15], 但这些算法存在早熟、易陷入局部最优解、收敛速度慢、迭代次数多等问题, 需改进后应用。

为提高风能和太阳能发电利用效率、降低风光互补发电系统建设和维修成本以及增强供电可靠性, 本文分析风力发电和光伏发电之间出力的相关性, 获得表征两者联合出力的互补关系。根据风力发电和光伏发电特性, 建立风光互补发电出力的模型。综合考虑风速和光照波动的影响及储能蓄电池寿命等因素, 建立以系统总成本最低为目标和以负载失电率为约束条件的优化函数。利用改进和声搜索算法进行系统配置目标函数的优化求解。整个求解过程通过二次优化完成, 在初次优化的基础上, 对产生的风电机组功率根据市场实际情况进行修正。然后再对目标函数重新优化, 最后得到满足约束条件的光伏发电和储能装置容

收稿日期: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51167010)

通信作者: 齐志远(1968—), 男, 博士、副教授, 主要从事微电网规划及控制方面的研究。qi_zhiyuan@126.com

量的优化结果。

1 风光发电联合出力分析

1.1 风力发电和光伏发电的相关性

研究变量间相关性方法有 Kendall 秩相关参数法、Person 相关系数法和 Spearman 秩相关系数法。Person 相关系数法用来处理线性相关,对于非线性相关具有一定局限性^[16]。Spearman 秩相关系数法的前提是被研究变量服从正态分布^[17]。Kendall 秩相关参数法对非线性相关问题具有较好的特性^[18],因此,本文采用 Kendall 秩相关参数分析风力发电和光伏发电出力相关性。

将 1 a 中的风速和光照数据划分为 52 个星期,并进行平均处理后作为样本数据。虽然每年的气象数据有所变化,但处理后的数据能够尽量消除不同年份数据变化的影响。将风力发电和光伏发电出力率构成随机向量 (P_1, P_2) , 则样本空间为 $\Phi = \{(P_{1,1}, P_{2,1}), (P_{1,2}, P_{2,2}), \dots, (P_{1,52}, P_{2,52})\}$ 。取 $(P_{1,i}, P_{2,i})$ 和 $(P_{1,j}, P_{2,j})$, 当 $i \neq j$ 时,若 $(P_{1,i} - P_{1,j})(P_{2,i} - P_{2,j}) > 0$, 则表明 $(P_{1,i}, P_{2,i})$ 和 $(P_{1,j}, P_{2,j})$ 一致,反之,二者不一致。计算 Kendall 秩相关参数 τ , τ 为从样本中选取的观测值一致性概率与不一致性概率之差:

$$\tau = P\{(P_{1,i} - P_{1,j})(P_{2,i} - P_{2,j}) > 0\} - P\{(P_{1,i} - P_{1,j})(P_{2,i} - P_{2,j}) < 0\} \quad (1)$$

式中, τ 的范围为 $[-1, 1]$; P ——事件发生的概率。

选取风光互补发电系统设计安装地的气象数据作为样本,经计算风力发电和光伏发电变化的一致性概率为 0.242,不一致性概率为 0.758,利用式(1)计算得到的相关系数 $\tau = -0.516$,表明风力发电与光伏发电具有负相关特性。置信度设置为 0.05,查阅 Kendall 秩相关系数显著性检验表,得到相关度临界值为 0.394,因此表明风力发电和光伏发电呈显著的负相关性。

根据 1 a 中每天风速和光照数据,计算得到 1 a 中各个月份平均风速和平均光照强度如图 1 所示。表明夏季光照强度大于冬季,且 6 月份光照强度达到最大值。风速总体趋势表现为夏季较冬季

和春季小。因此风速与光照强度呈现出很好的互补性。

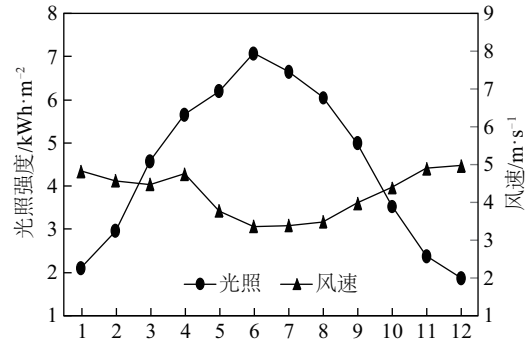


图1 各月光照与风速对比

Fig. 1 Comparison of solar irradiance and wind speed

1.2 风速和光照的边缘概率密度

计算风力发电和光伏发电出力的边缘概率分布,进而得到风光互补发电出力的联合概率分布。由于非参数检验法不依赖于概率分布的具体形式,本文采用非参数估计法计算风速和光照强度的边缘概率密度。设风速和光照为随机变量 p ,将各月平均风速和光照强度数据归一化,以处理后的数据为随机变量 p_j 的样本,风速和光照强度的边缘概率密度由式(2)得到:

$$f(p) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{p - p_j}{h}\right) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(p - p_j)^2}{2h^2}\right]} \quad (2)$$

式中, n ——样本容量; h ——平滑系数; $K(\cdot)$ ——核函数,这里选取服从标准正态分布的核函数。

利用样本数据计算得到的光照强度概率密度和风速概率密度分别如图 2、图 3 所示。

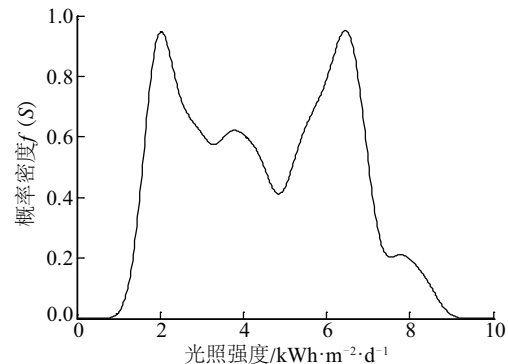


图2 光照强度概率密度

Fig. 2 Probability density of solar irradiance

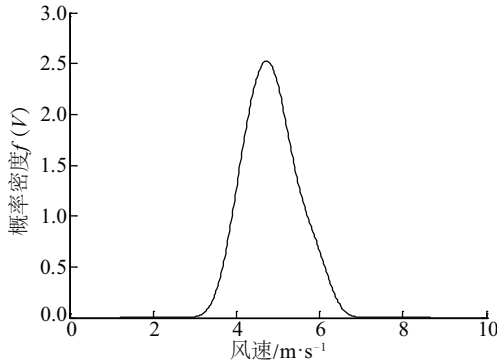


图3 风速概率密度

Fig. 3 Probability density of wind speed

1.3 风力发电与光伏发电出力的联合概率分布

由于 Copula 函数放宽了正态性假设,且可通过不同的相关性结构将不同的边缘分布结合成多维联合分布,Copula 函数族中的 Frank Copula 函数能够描述非线性变量间的负相关特性。本文运用 Copula 函数求解风力发电和光伏发电出力的联合概率分布。具体表达式为:

$$f(P_1, P_2) = -\frac{1}{\theta} \ln \left\{ 1 + \frac{[e^{-\theta f(P_1)} - 1] \cdot [e^{-\theta f(P_2)} - 1]}{e^{-\theta} - 1} \right\} \quad (3)$$

其中,参数 θ 与 Kendall 秩相关参数关系如下:

$$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left(\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1 \right) \quad (4)$$

在已知相关系数 τ 后,根据式(4)计算 Copula 函数中的参数 $\theta = -6.04$,然后由式(3)计算得到的风力发电和光伏发电出力联合概率分布如图4所示。

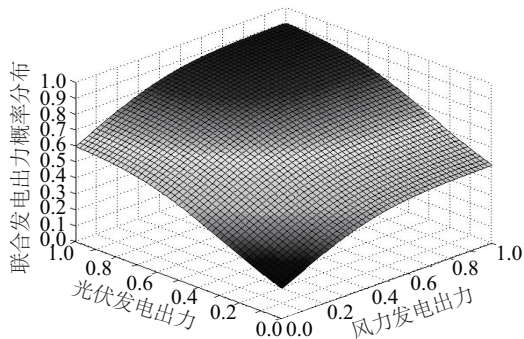


图4 风力发电和光伏发电出力联合概率分布

Fig. 4 Joint probability distribution of wind power and solar power

2 风光互补发电出力模型

2.1 风力发电出力模型

风力发电量受风电机组输出特性影响,风电机组的输出功率 P_{WG} 随风速 V 变化关系为:

$$P_{WG} = \begin{cases} P_{\text{额定}} \times (V - V_{\text{切入}}) / (V_{\text{额定}} - V_{\text{切入}}), & V_{\text{切入}} \leq V \leq V_{\text{额定}} \\ P_{\text{额定}}, & V_{\text{额定}} < V \leq V_{\text{切出}} \\ 0, & V < V_{\text{切入}}, V > V_{\text{切出}} \end{cases} \quad (5)$$

风力发电量为:

$$\begin{cases} E_1 = \sum [P_{WG} \cdot h_v (V/V_{\text{额定}})] & V_{\text{切入}} \leq V \leq V_{\text{额定}} \\ E_2 = \sum h_v \cdot P_{WG} & V_{\text{额定}} < V \leq V_{\text{切出}} \\ E_{\text{总}} = E_1 + E_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, h_v —— 风速 V 所对应的时间。

2.2 光伏发电出力模型

太阳能电池板的输出功率取决于光照强度、电池板的面积以及转换效率,输出功率可表示为:

$$P_{PV} = G \cdot A \cdot \eta \quad (7)$$

式中, P_{PV} —— 太阳电池的实际输出功率; G —— 光照强度; A —— 太阳电池板面积; η —— 太阳电池效率。

太阳电池每天发电量 E_{PV} 为:

$$E_{PV} = P_{PV} \cdot h_s \quad (8)$$

式中, h_s —— 光照 S 平均每天对应的时间。

2.3 储能蓄电池模型

在风光互补发电系统中,蓄电池处于充电和放电两种状态,蓄电池的存储电量为:

$$C_{bm}(1 - DOD) \leq C_b \leq C_{bm} \quad (9)$$

式中, C_{bm} —— 蓄电池最大容量; DOD —— 放电深度; C_b —— 蓄电池电量。

当风光发电量大于负载用电量时,蓄电池处于充电状态,其能量关系式为:

$$C_b(t) = C_b(t-1) + \int_{t-1}^t \left[\frac{P_{PV}(t) + P_{WG}(t) - P_{\text{LOAD}}}{U_b} \right] \cdot \eta_{ch} dt \leq C_{bm} \quad (10)$$

式中, $C_b(t)$ —— t 时刻蓄电池的电量; η_{ch} —— 充电效率; U_b —— 蓄电池组输出电压。

当风光发电量小于负载用电量时,蓄电池处于放电状态,其能量关系式为:

$$C_b(t) \cdot \eta_{dis} = C_b(t-1) + \int_{t-1}^t \left[\frac{P_{LOAD}(t) - P_{PV}(t) - P_{WG}(t)}{U_b} \right] dt \geq C_{bm}(1-DOD) \quad (11)$$

式中, η_{dis} ——放电效率。

3 系统配置目标优化

3.1 目标函数

风光互补发电系统优化配置的目标是在保证负载供电可靠性和系统使用寿命的前提下,使初期建设成本和后期维护成本构成的综合成本最小。其成本目标函数如式(12):

$$\begin{aligned} \min\{J(x)\} &= \min\{J(P_{PV}, P_{WG}, P_{BAT})\} \\ &= \min\{P_{PV}C_{PV} + P_{WG}C_{WG} + P_{BAT}C_{BAT} + \\ &\quad n(P_{PV}C_{PVM} + P_{WG}C_{WGM} + P_{BAT}C_{BATM} + \\ &\quad C_{IVM} + C_{CLM}) + C_{IV} + C_{CL}\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $J(x)$ ——综合成本,为系统初期建设成本与维修成本之和; X ——系统各部分的容量, $X = \{P_{PV}, P_{WG}, P_{BAT}\}$; P_{PV} ——满足负载需求的太阳能电池发电总功率; P_{WG} ——满足负载需求的风电机组发电总功率; P_{BAT} ——蓄电池总容量; C_{WG} 、 C_{PV} 、 C_{BAT} ——风电机组、太阳能电池、蓄电池单位购置成本; C_{WGM} 、 C_{PVM} 、 C_{BATM} ——风电机组、太阳能电池、蓄电池单位维修费用; n ——使用年限; C_{IV} 、 C_{CL} ——逆变器和控制器成本; C_{IVM} 、 C_{CLM} ——逆变器和控制器的年维修成本。上述目标函数不仅包含了系统初期费用而且加入了使用年限内的维修费用,更贴近于实际。

3.2 约束条件

1) 负载失电率约束

负载失电率($LOLP$)为系统所产生的电量不能满足负载需求条件下,所缺少的电量与负荷总需求量的比。本文在考虑风力发电和光伏发电最小出力概率的前提下,得到风力发电和光伏发电的最少出力总和。通过将蓄电池出力的概率最小值转化为风力发电和光伏发电联合出力的概率最大值,得到蓄电池最少出力总和,从而得到整个系统的功率输出。负载需求功率与发电出力之差为负载所缺少的最大功率。因此, $LOLP$ 的表达式为:

$$\frac{P_{LOAD} - [(P_{PV} + P_{WG})p_1 + (C_{BAT}U/T)p_2]}{P_{LOAD}} \leq LOLP_{set} \quad (13)$$

式中, P_{LOAD} ——负载总功率; p_1 ——风力发电与光伏发电联合出力的最小概率; p_2 ——蓄电池出力的最小概率; $LOLP_{set}$ ——负载失电率设定值; U ——蓄电池组母线电压; T ——无光和弱风下对应的时间。

2) 太阳电池功率约束

$$0 \leq P_{PV} \leq P_{PVmax} \quad (14)$$

式中, P_{PV} ——太阳电池的功率; P_{PVmax} ——无风条件下,太阳电池独立供电时提供的最大功率。

3) 风电机组功率约束

$$0 \leq P_{WG} \leq P_{WGmax} \quad (15)$$

式中, P_{WG} ——风电机组的功率; P_{WGmax} ——无光条件下,风电机组独立供电时的最大功率。

4) 蓄电池最大容量约束

$$C_{bm}(1-DOD)U_b \leq P_{BAT} \leq P_{BATmax} \quad (16)$$

式中, P_{BAT} ——蓄电池的供电功率; P_{BATmax} ——无风无光条件下,蓄电池独立供电时提供的最大功率。

3.3 改进和声搜索算法的求解

和声搜索算法^[19]模拟了音乐演奏中乐师之间相互磨合直到整个演奏效果达到最美和声的过程。该算法通用性好、原理简单、与其他算法结合性强。但标准和声搜索算法固定变量扰动基准和扰动带宽这2个参数,影响收敛速度及易陷入局部最优解。本文通过随着迭代次数动态调整变量扰动基准和扰动带宽,从而提高解的遍历性,进行全局寻优。算法求解步骤如下:

1) 初始化和声库

随机产生一系列初始解并构成和声库。为保证产生的解在定义域中均匀分布并具有一定代表性,初始解 X_{ij} 通过式(17)产生:

$$X_{ij} = LB_{ij} + Rnd1 \times (UB_{ij} - LB_{ij}) \quad (17)$$

式中, $X_i \in [LB_i, UB_i]$; LB_i 、 UB_i ——区间最大值及最小值; $j \in (1, 2, \dots, HMS)$, 其中 HMS 为库容量; $Rnd1$ ——(0,1)之间均匀分布产生的随机数。

2) 产生新解

设定产生解的挑选率为 $HMCR$, 并产生随机数 $Rnd2$, 当 $Rnd2$ 小于 $HMCR$ 时, 从和声库中随机选取一个解, 否则由式(17)产生新解, 记为 Ω 。然后采用式(18)产生原始解:

$$x_i = \begin{cases} x_i \in (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,HMS}) & Rnd2 < HMCR \\ x_i \in \Omega & Rnd2 \geq 1 - HMCR \end{cases} \quad (18)$$

对原始解进行微量扰动,采用式(19)产生新解:

$$x_i = \begin{cases} x_i + Rnd3 \times bw & Rnd3 < PAR \\ x_i & Rnd3 \geq 1 - PAR \end{cases} \quad (19)$$

式中, $Rnd3$ —— 随机数; bw —— 扰动带宽; $Rnd3 \times bw$ —— 随机产生的微调量; PAR —— 变量扰动基准。

由于标准和声搜索算法初始化时固定 PAR 和 bw ,使得 $Rnd3$ 总是与同一个 PAR 比较,这将多次产生相同的微调量,使产生解不具有全局性。本文将 PAR 和 bw 随着迭代次数动态调整, PAR 按式(20)调整, bw 按式(21)调整:

$$PAR = (PAR_{\max} - PAR_{\min}) / MI_{tr} \times CI_{tr} + PAR_{\min} \quad (20)$$

式中, PAR_{\max} 、 PAR_{\min} —— PAR 的取值范围; MI_{tr} —— 最大迭代次数; CI_{tr} —— 当前迭代次数。

$$bw = bw_{\max} \times \exp(\ln(bw_{\min}/bw_{\max}) / MI_{tr} \times CI_{tr}) \quad (21)$$

式中, bw_{\max} 、 bw_{\min} —— 带宽最大值和最小值。

3)更新记忆库

将新解代入目标函数中,如果新解下得到的目标函数值优于和声库中最差解的目标值,则用新解替换最差解,否则不替换。

4)算法停止

当得到最优解或达到最大迭代次数时停止运算。

4 实例分析

选择位于北纬 $43^{\circ}5'$,东经 $115^{\circ}7'$ 的内蒙古锡林浩特市作为风光互补发电系统的安装地。根据当地风速和光照等气象数据计算风电机组、太阳能电池板的实际功率,并以额定功率为基准进行归一化。通过调查住户的家用电器种类,统计出日用电量及各月用电量。根据得到的用户负荷曲线,选取最大负荷功率为 5 kW 。根据气象资料中 1 a 连续阴雨天数和风速数据,得出连续弱风和无光照条件下的时间。设定负载失电率为 1% ,计算极端条件下需要的蓄电池容量。考虑到蓄电池的安全使用条件,设定蓄电池最大放电深度为 80% ,则蓄电池需提供的最大电量为 10 kWh 。设风光互补发电系统采用直流母线电压 24 V 供电方式,采用 12 V 蓄电池通过串并联形式扩充容量。根据市场调查,风力发电和光伏发电的单位购置成本与维修成本如表1所示。

表1 风力发电和光伏发电单位成本

Table 1 Unit costs of wind power and PV power			
成本	风电机组	太阳电池	蓄电池
购置成本	0.45 万¥/kW	1 万¥/kW	10¥/Ah
年维修成本	0.04 万¥/kW	0.05 万¥/kW	0.25¥/Ah

利用改进和声搜索算法对风光互补系统配置目标函数进行优化计算,优化过程中各参数分别为 $HMS=5$ 、 $HMCR=0.9999$ 、 $PAR_{\min}=0.4$ 、 $PAR_{\max}=0.9$ 。目标函数的优化过程如图5所示。

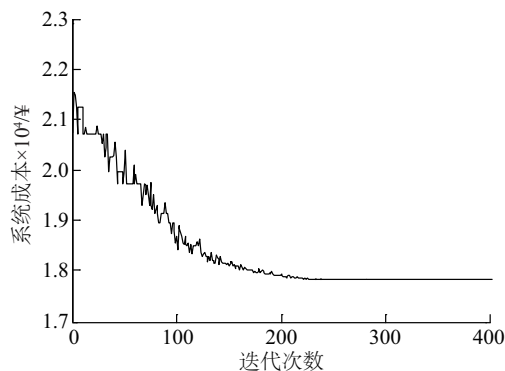


图5 改进的和声搜索算法优化过程

Fig. 5 Optimization process of improved harmonic search

经过第1次优化后,风电机组总功率为 3.397 kW 。但市场上缺少这种额定功率的风电机组,因此将风电机组功率调整为市场上常见的 3 kW 。重新进行优化,得到太阳电池功率与蓄电池容量。第2次优化后太阳电池功率为 2.411 kW ,可近似为 2.4 kW 。蓄电池容量为 600 Ah 。经过2次优化的结果对比如表2所示。

表2 二次优化结果对比

Table 2 Contrast of two times optimization results			
优化次数	风电机组功率/kW	太阳电池功率/kW	蓄电池容量/Ah
第1次	3.397	2.033	400
第2次	3.000	2.411	600

利用风光互补发电出力最差的月份进行优化结果的校验。图6为计算的系统供电曲线和负荷曲线。从全年发电曲线看出,夏季光伏发电量多,6~9月份风力发电量较少。以用电量最大、同时风速和光照都不充足的月份进行发电量计算,得出负载失电率 $LOLP$ 为 0.67% ,小于设计指标 1% ,因此,系统能够满足供电可靠性要求。

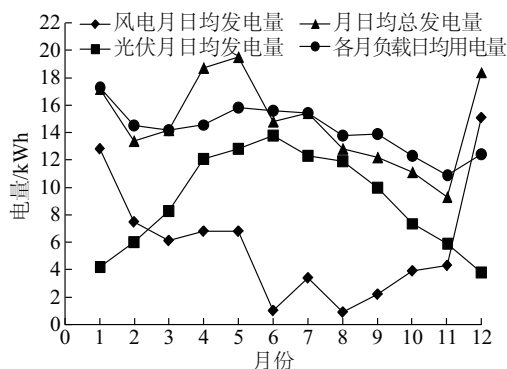


图6 系统发电量与负载用电量关系

Fig. 6 The load demand and power supplement

5 结 论

风光互补发电系统的合理配置可满足负载供电需求,同时降低建设成本及维修成本。本文首先对风力发电和光伏发电的相关性进行分析,得到风力发电和光伏发电出力的联合概率分布;其次,建立以系统总成本最低为目标和以负载失电率等为约束条件的系统配置优化函数;再次,采用改进的和声搜索算法对目标函数优化,通过2次优化过程得到最终目标值,在第1次优化得到的风电机组功率、光伏发电功率及储能蓄电池容量值基础上,将风电机组功率调整为市场存在的额定功率,再对目标函数重新优化;最后,得到满足约束条件的优化结果。本文提出的风光互补发电系统优化配置方法可为风光互补发电系统的优化配置设计提供理论指导。

[参考文献]

[1] Khatod D K, Pant V, Sharma J. Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 683—695.

[2] Zou K, Agalgaonkar A P, Muttaqi K M. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (1): 112—123.

[3] Tsekouras G, Koutsoyiannis D. Stochastic analysis and simulation of hydrometeorological processes associated with wind and solar energy [J]. Renewable Energy, 2014, 63: 624—633.

[4] 冉晓洪, 苗世洪, 刘阳升. 考虑风光荷联合作用下的电力系统经济调度建模[J]. 中国电机工程学报,

2014, 34(16): 2552—2560.

[4] Ran Xiaohong, Miao Shihong, Liu Yangsheng. Modeling of economic dispatch of power system considering joint effect of wind power, solar energy and load [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2014, 34(16): 2552—2560.

[5] 叶承晋, 黄民翔, 王 焱. 基于离散概率模型的风光互补供电系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 48—54.

[5] Ye Chengjin, Huang Minxiang, Wang Yan. A hybrid wind/photovoltaic power supply system based on discrete probabilistic methodology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 48—54.

[6] Ross M, Hidalgo R, Abbey C. Energy storage system scheduling for an isolated micro-grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 117—123.

[7] 吴 雄, 王秀丽. 新能源组合出力的置信区间估计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 7—12.

[7] Wu Xiong, Wang Xiuli. Estimation on confidence intervals of combined output of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 7—12.

[8] 茆美琴, 周松林, 苏建徽. 基于风光联合概率分布的微电网概率潮流预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (2): 56—63.

[8] Mao Meiqin, Zhou Songlin, Su Jianhui. Probabilistic power flow forecasting of microgrid based on joint probability distribution about wind and irradiance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 56—63.

[9] Chaouachi A, Kamel R M, Andoulsi R. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1688—1699.

[10] 陈 洁, 杨 秀, 朱 兰. 微网多目标经济调度优化 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57—66.

[10] Chen Jie, Yang Xiu, Zhu Lan. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2013, 33(19): 57—66.

[11] Merei G, Berger C, Sauer D U. Optimization of an off-grid hybrid PV-wind-diesel system with different battery technologies using genetic algorithm [J]. Solar Energy, 2013, 97: 460—473.

[12] Wang Jidong, Yang Fan. Optimal capacity allocation of standalone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimisation algorithm [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(5): 443—448.

- [13] Tan Zhongfu, Ju Liwei, Li Huanhuan, et al. A two-stage scheduling optimization model and solution algorithm for wind power and energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63: 1057—1069.
- [14] 段建民, 王志新, 王承民. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11—15.
- [14] Duan Jianmin, Wang Zhixin, Wang Chengmin. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11—15.
- [15] Motevasel M, Seifi A. Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 83: 58—72.
- [16] 耿耀君, 张军英, 袁细国. 一种基于稀疏表示系数的特征相关性测度[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(1): 106—112.
- [16] Geng Yaojun, Zhang Junying, Yuan Xiguo. A feature relevance measure based on sparse representation coefficient[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 106—112.
- [17] 徐潇源, 严正, 冯冬涵. 基于输入变量秩相关系数的概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 54—61.
- [17] Xu Xiaoyuan, Yan Zheng, Feng Donghan. Probabilistic load flow calculation based on rank correlation coefficient of input random variables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 54—61.
- [18] 张龙, 黄家栋, 王莉莉. 风速相关性对电力系统暂态稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 77—83.
- [18] Zhang Long, Huang Jiadong, Wang Lili. Impact of wind speed correlation on transient stability of power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 77—83.
- [19] Geem Z, Sim K. Parameter-setting-free harmony search algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 217: 3881—3889.

OPTIMAL CONFIGURATION FOR WIND POWER AND SOLAR POWER HYBRID SYSTEMS BASED ON JOINT PROBABILITY DISTRIBUTION OF WIND SPEED WITH SOLAR IRRADIANCE

Qi Zhiyuan¹, Guo Jiawei², Li Xiaoyang³

(1. College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;

2. Inner Mongolia Hohhot Pumped-Storage Power Station, Hohhot 010060, China;

3. Inner Mongolia Meteorological Information Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to improve the utilization efficiency and reduce construction costs as well as enhance power supply reliability for wind power and solar power hybrid systems, an optimal configuration method is proposed in this paper. The correlation between wind power and solar power as well as the life of energy storage battery are comprehensively considered, so an optimization function that contain optimization object with the lowest cost of power generation and constrained condition with the loss of load probability is established. An improved harmony search algorithm is used to optimize objective function. The process of to obtain solution is completed for two times optimization. After initial optimization results are obtained, the capacity of wind power is revised according actual rated power in the market. Then the objective function is optimized again. Finally, the capacity of solar power and energy storage device is obtained. An example is done to prove the correctness of the proposed method of optimal configuration. The results showed that the proposed method makes the designed wind power and solar power hybrid systems to meet the load demand for power supply and reduce construction costs.

Keywords: wind power; solar power; hybrid systems; optimal configuration; joint probability distribution; improved harmony search method; two times optimization