

变权重系数和关联规则挖掘方法在风光储运行优化中的应用

吴克河¹, 周欢¹, 黄婷², 刘志豪³, 杨凯³

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 上海市电力公司浦东供电公司, 上海 200122;
3. 国网新源张家口风光储示范电站有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 制定合理的风光储联合发电系统协调运行策略可以提高新能源电力企业的运行经济性。提出一种变权重系数和关联规则挖掘混合算法(Variable Weight Coefficients and Association Rules, VWC-AR), 对风光储联合发电系统协调运行策略进行优化。以历史运行数据为基础, 挖掘全工况下最优机组组合以及单台机组在全工况下的综合性能指标值, 得到工况条件到最优机组组合之间的推理规则集。根据具体的调度需求和工况环境, 利用均衡函数的变权综合模式, 计算潜在目标机组组态模式的变权重系数, 结合既有的综合性能评估方法, 动态切换最优组态模式, 从而建立一套客观、实时、准确的协调运行策略, 优化系统运行成本。通过算例证明, 该算法能够充分利用风光互补特性, 延长蓄电池使用寿命, 提高系统经济效益。
关键词: 风光储; 协调运行; 变权重系数; 关联规则; 推理规则

Application of variable weight coefficients and association rules in wind-solar-battery power plant operation optimization

WU Ke-he¹, ZHOU Huan¹, HUANG Ting², LIU Zhi-hao³, YANG Kai³

(1. School of Control and Computer Science, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Pudong Power Supply Company, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;
3. Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station CO., LTD.,
State Grid Xin Yuan Company, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: Formulating reasonable coordination operation strategy of wind-photovoltaic-battery generation system can improve the operation economy of the new energy electric power enterprises. A hybrid algorithm of variable weight coefficient and associated rules mining is proposed in order to optimize coordination operation strategy of wind-photovoltaic-battery generation system. First, it mines the optimal combination under all conditions as well as comprehensive performance index of a unit based on historical operating data, and forms a set of inference rules between condition and the optimal combination. Second, according to the specific scheduling requirements and working environment, it uses the equilibrium function of variable weight comprehensive mode, and calculates the variable weight coefficient of potential target model. Combining with the fixed performance evaluation method, it selects the optimal configuration mode, builds a set of objective, real-time, accurate coordinate operation strategy, and optimizes the system operation cost. Finally, the simulation proves that the algorithm can make full use of complementary of wind and solar resources, extend the service life of the battery, and improve economic efficiency of system.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014XS39).

Key words: wind-photovoltaic-battery; coordination operation; variable weight coefficient; associated rules; inference rules

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0050-08

0 引言

随着社会发展对能源需求的增加, 以及传统化石能源过度利用带来的如雾霾、酸雨等环境问

题, 新能源的发展越来越受到国家的重视。相比传统化石能源, 可再生能源如风力发电、光伏发电在规模化利用过程中暴露出诸多问题。但随着储能技术的日益成熟, 问题逐步得到改善, 多种可再生能源联合并网发电也得到越来越多的研究和重视。

目前国内外有关多种可再生能源联合发电的研究主要集中在容量优化配置^[1-3]、可靠性评估^[4-6]、

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助项目 (2014XS39)

经济运行调度方面。在经济运行调度方面, 主要是以气象条件和负荷曲线为基础, 利用智能算法优化最优调度模型, 达到缩小系统整体输出峰谷差、延长蓄电池使用寿命、降低运行成本的目的, 如文献[7]将熵与标准差结合描述等效负荷整体波动性大小, 优化运行周期内蓄电池充放电功率, 达到减小峰谷差和系统旋转备用容量的目标; 文献[8]提出基于功率多频率尺度分析的风光水气储联合发电调度策略, 并利用改进粒子群算法优化电站内部综合成本。文献[9]以钠硫电池为储能研究对象, 建立了微网环境下包含光伏发电、风力发电、燃料电池、同步发电单元和钠硫电池储能单元经济运行优化模型, 并对影响系统经济运行的因素进行了讨论。文献[10-11]分别采用遗传算法和粒子群算法等群智能算法计算了水火发电模式和风光储联合发电模式经济调度模型。上述文献的优化调度策略并未考虑机组组态模式之间切换的代价。并且随着机组运行时间延长, 传统的智能优化算法在气象条件、负荷需求多变的情况下很难建立一个精确的数学模型计算出机组最优组态模式, 也达不到动态调整运行策略的目的, 因此使用传统优化模型和算法推导出来的理论目标值在实际运行中很难达到, 算法应用受到很大的局限。

本文提出变权重系数和关联规则挖掘混合算法优化风光储联合发电系统的协调运行策略。通过挖掘机组运行历史数据, 得到工况条件与最优机组组合之间的推理规则集; 考虑负荷变化等因素, 利用均衡函数的变权综合模式, 计算潜在目标机组组态模式的变权重系数, 结合既有的综合性能评估方法, 选择最优组态模式, 从而建立一套客观、实时、准确的协调运行策略, 达到优化发电成本、提高经济效益的目标。实现基于数据驱动的电站信息深层次加工与集成^[12]。

1 优化模型

1.1 优化目标

风光储联合发电系统运行优化的目标是在满足系统性能指标的前提下, 在所研究的周期内, 合理安排系统发电装置的投入和切出, 使系统周期内单位发电成本 F 最低^[8]。建立目标函数如式 (1)。

$$\min F = \min \left[\frac{C_{\text{op}}(P)}{\int_t P dt} + C_{\text{pun}}(P) \right] \quad (1)$$

式中: P 为风光储总体出力; C_{pun} 为其总出力波动惩罚费用; C_{op} 为机组总体运行费用, 主要由机组启停成本、发电成本、运行维护成本和停机维护成本组成。

$$C_{\text{op}}(P) = [C_s(P) + C_o(P) + C_{\text{om}}(P) + C_m(P)]f_r \quad (2)$$

式中: C_s 、 C_o 、 C_{om} 、 C_m 分别为机组总体启停成本、发电成本、运行维护成本和停机维护成本; f_r 为机组折旧系数 $\frac{r(1+r)^{r_0}}{(1+r)^{r_0} - 1}$, r_0 是折旧年限, r 为折旧率。

C_{pun} 计算公式为

$$C_{\text{pun}}(P) = \omega \int_t |P - P_{\text{load}}| dt \quad (3)$$

式中: P_{load} 为负荷需求; ω 为惩罚系数。

1.2 约束条件

1) 供电可靠性约束

系统应确保在研究周期内任一时刻满足负荷需求。

$$\begin{cases} P_{\text{wd}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{bat}}(t) = P_{\text{load}}(t) \\ \forall t, t \in (0, N) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{wd}}(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{bat}}(t)$ 分别为 t 时刻风电机组、光伏阵列、蓄电池装置出力大小; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻负荷需求; N 为研究周期长度。

2) 风光互补约束

风光联合出力相对负荷的波动率 D_{wp} 来表征风光互补特性, 即

$$D_{\text{wp}} = \frac{1}{P_{\text{load}}} \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{wd_pv}}(t) - P_{\text{load}})^2} < \lambda \quad (5)$$

式中: $P_{\text{wd_pv}}$ 为 t 时刻风光联合出力; λ 为风光互补的参考最大波动率。

3) 蓄电池容量约束

蓄电池的荷电状态需控制在最大放电深度状态和满电量状态之间, 如式 (6)。

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \quad (6)$$

式中: $SOC(t)$ 为 t 时刻蓄电池容量; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别表示蓄电池满荷电容量和最大放电深度容量。

4) 蓄电池失效周期约束

计算蓄电池寿命周期对于算法的精确性有着重要的意义, 本文采用文献[13]的“rainflow”蓄电池预期寿命计算方法, 通过统计蓄电池在不同放电深度区间的充放电次数, 得到蓄电池失效周期为

$$Life_{\text{bat}} = \frac{n_r \Delta t}{8760 \times \sum_{t=1}^{n_r} \sum_{m=1}^M (N_m(t) / CF_m)} \quad (7)$$

式中: $Life_{\text{bat}}$ 为蓄电池年失效周期(year); Δt 为统计时段长度 (h); n_r 为仿真总时段数; M 为放电深度区间间隔数; $N_m(t)$ 为蓄电池在第 t 个统计周期时第 m 个深度区间充放电次数; CF_m 为在第 m 个深度区间充放电的失效循环次数。

由于蓄电池组在工作过程中需要与电源线路并联接到负载电路, 电源线路端电压需要稍高于蓄电池组端电压, 并提供少量电流来补偿蓄电池组局部作用的损耗。蓄电池组在此情况下使用寿命(浮充寿命 $Life_{float}$)与电源线路端电压(浮充电压)、材质等因素有关, 具体规格参数可由厂家提供。因此蓄电池使用寿命 CF_{bat} 必须小于其失效周期 CTF_{bat} :

$$CF_{bat} \leq CTF_{bat} = \min\{Life_{bat}, Life_{float}\} \quad (8)$$

其他约束如机组爬坡约束、出力上下限约束等同其他参考文献, 在此不再赘述。

2 变权重系数和关联规则挖掘混合算法

2.1 关联规则提取方法

关联规则挖掘算法是从大量历史数据中寻找频繁项或属性之间关联性的过程, 通过对风光储联合发电系统历史运行数据进行分析, 可以得到特定工况下气象数据与机组性能之间的关联关系, 从而对特定工况下机组性能进行客观、正确的评估, 具体步骤如下。

step1: 对发电单元的运行工况进行划分。本文主要考虑影响风光储联合发电系统的气象因素如风速、光照强度、温度等因素。

step2: 定义机组性能评估指标。包括经济性指标、可靠性指标和综合性能评估指标等。

step3: 扫描历史数据库, 采用挖掘算法挖掘全工况下最优机组组合和单台机组全工况下综合性能指标值, 得到如下规则:

if 工况= $cond_1$ then 机组组合= $comb_1$

(性能指标值= $perfv_1$, 支持度= $supp_1$, 置信度= $conf_1$)

if 工况= $cond'$ and 机组编号= i

then 机组 i 综合性能指标= $perfv_i$

(支持度= $supp_i$, 置信度= $conf_i$)

step4: 给定数据抽取周期, 采用增量挖掘策略更新规则库, 使规则不断完善。

2.2 工况的划分

在对工况进行划分之前, 本文先对工况条件如风速、光照强度、温度等数据采用极值标准化法按式(9)标准化到[0, 1]区间。

$$X_i = X'_i - X_{\min} / X_{\max} - X_{\min} \quad (9)$$

式中: X'_i 为目标数据库中的原始数据; X_i 为标准化之后的数据; X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示原始数据的上下阈值。上下阈值可以根据历史数据集自动计算或者领域专家直接指定。依据工况条件与设备出力特性之间的关联关系建立隶属函数^[14]如图 1, 模糊子集语言变量

为“VS”、“S”、“NM”、“M”、“PM”、“B”、“PB”, 分别表示“极低”、“低”、“较低”、“一般”、“较高”、“高”、“极高”。

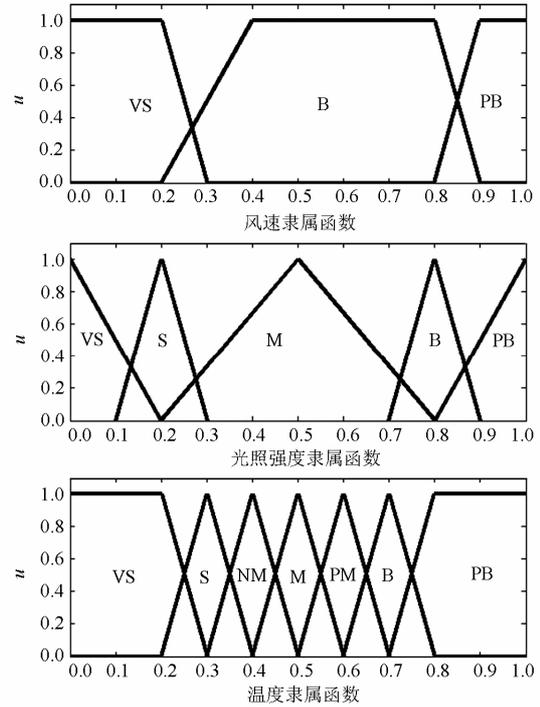


图 1 隶属函数图

Fig. 1 Membership function chart

2.3 常权重系数确定方法

组态模式评估指标的建立有利于客观评价机组组态模式并网发电的经济性和可靠性, 对最终决策结果有着十分重要的意义。考虑各类设备在组态发电模式中扮演的不同角色, 为简化计算, 设计机组性能评估指标(如表 1)。目前学术界关于权重设置主要有灰色关联度法、关联规则权重法、模糊层次分析法。本文基于模糊层次分析法^[15]确定机组性能指标权重。指标常权重系数如表 1。组态模式综合性指标值定义为并网运行设备各类指标的加权和, 如式(10)。

$$I_k = \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (10)$$

式中: I_k 为并网运行机组 k 的综合性能指标值; w_i 、 v_i 分别为各项指标的权重和分值。

2.4 变权重系数的计算方法

常权重系数的确定往往过度依赖领域专家的主观意见和经验。随着发电机组的长时间运行, 机组的某些性能可能出现偏差; 同时, 负荷需求和气象条件的变化, 使得机组组态模式也需要做出动态调

表 1 指标权重
Table 1 Weights of indexes

风电机组指标			光伏组件指标			储能装置指标		
一级指标	二级指标	权重	一级指标	二级指标	权重	一级指标	二级指标	权重
经济性	启停成本	0.121	经济性	启停成本	0.089	经济性	运维成本	0.184
	运维成本	0.309		运维成本	0.383		充放电成本	0.093
	折旧成本	0.187		折旧成本	0.146		可靠性	电池运行可靠度
可靠性	非计划停运发生率	0.175	可靠性	无功电流支撑	0.172	最大放电深度		0.259
	有功功率变化率	0.097		无功电压调节	0.112	平滑输出	0.085	
	动态无功调节能力	0.111		非计划停运发生率	0.098	协调调度	削峰填谷	0.167

整。为使机组组态模式性能评估中各要素状态更均衡, 本文将文献[16]的均衡函数引入形成变权重综合模式, 如式 (11)。

$$w'_i = \frac{w_i x_i^{\alpha-1}}{\sum_{j=1}^n w_j x_j^{\alpha-1}} \quad (11)$$

式中: w_j 为原机组组合模式各台机组指标常权重; x_i 为各指标权重的评分值。指标评分值采用归一化欧式距离^[17]法进行计算, 如式 (12)。

$$x_i = \frac{y_{opt} - y'}{y_{opt} - y_{wor}} \times 100 \quad (12)$$

式中: y' 为当前设备运行的实际测量值; y_{opt} 、 y_{wor} 分别为设备运行的理论最优值和最劣值。

α 为均衡函数。取值范围是 $0 \leq \alpha \leq 1$, α 的取值遵循两个原则。分别是“约束优先原则”(简称“约束”原则)和“最优经济组合原则”(简称“经济”原则)。首先, 在“约束”原则下, 若目标机组组态模式不满足式 (4) ~ 式 (7), 则说明目标机组组态模式不能应对当前负荷需求。令机组可靠性指标 $\alpha = 1$, 其他指标 $\alpha < 1/2$, 通过式 (11) 进行归一化处理之后, 可靠性指标比重增加, 得到“约束”原则下的组态模式性能评估值。

其次, 在“经济”原则下。令经济性指标 $\alpha = 1$, 其他指标 $\alpha > 1/2$, 通过式 (11) 进行归一化处理之后, 经济性指标比重增加, 得到“经济”原则下的组态模式性能评估值。

采用线性加权法和法确定综合性能指标值, 文献[18]的二元对比定权法可以作为“约束”原则和“经济”原则综合性能指标的权重系数确定方法。需要说明的是, α 的取值取决于该指标相对重要程度。根据以上两个原则, 使用变权重系数动态调整经济性指标和可靠性指标权重。其优点在于, 系统能够依据负荷的实时需求, 以及采集到机组运行参数计算得到的评分值, 选择可靠性评估和经济性评估综合最优的目标机组组态模式, 避免协调运行策略长年运行后适应度和准确度下降的问题。

3 算法求解步骤

变权重系数和关联规则挖掘混合算法优化运行策略的流程图如图 2, 包括以下步骤。

step1: 数据输入。输入算法计算所需的设备实时运行数据、经济参数、负荷需求数据、气象监测数据、均衡函数 α 等。

step2: 目标组态模式评估。依据气象监测数据判断当前所处工况; 根据设备实时运行数据计算指标评分值 x_i ; 再按照“约束”原则和“经济”原则分别确定相应原则下组态模式评估值, 并得到潜在的目标机组组态模式综合性能指标值。

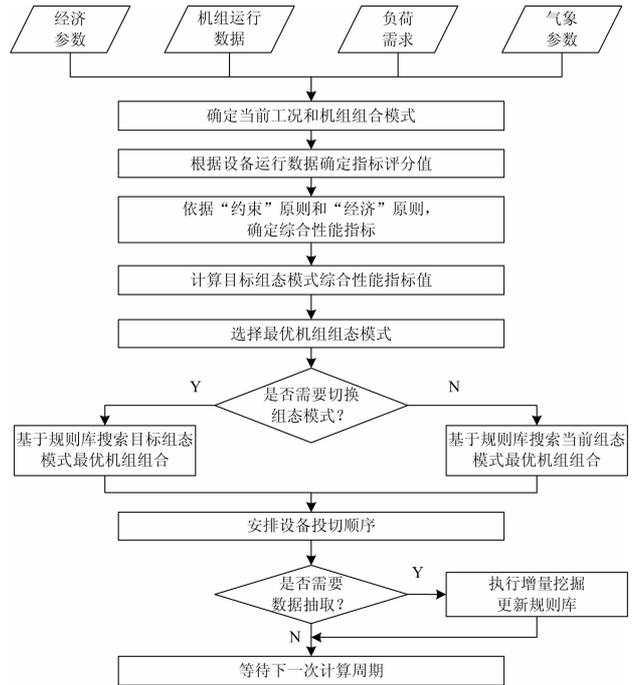


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

step3: 判断当前机组组态模式是否需要切换, 若需要切换则根据规则库匹配当前工况目标机组组态模式最优机组组合, 若不需要切换则直接根据规则库搜索当前工况当前组态模式最优机组组合。

step4: 根据原机组组合方式和目标机组组合方

式，制定合理的设备投切顺序并执行。

step5: 判断是否达到数据抽取周期，若达到则执行增量挖掘程序，完成规则库的更新，若没有达到则等待下一次计算周期。

4 算例分析及结果说明

本文以张北地区某风光储联合发电系统为例进行仿真。设备规格参数如表 2 所示。为方便控制，相同类型的光伏面板通过馈线连接至独立的逆变器

小室，形成光伏单元；储能装置是若干电池柜串联成一个组串再与其他组串并联形成储能单元接入直流母线。由表 2 可知，系统总共包含风电机组 6 台，装机容量为 11 MW；光伏单元 9 个，装机容量为 3.18 MW；储能单元 3 个，装机容量 2.9 MW，储存电量为 4.35 MWh。本文以月为研究周期，计算步长为 5 min，设蓄电池最大放电深度为 75%，充放电次数统计分为 8 个间隔，分别为 0~10%，10%~20%，…，70%~75%。典型月气象数据和负荷需求曲线如图 3~图 6。

表 2 设备具体参数

Table 2 Specification parameters of equipment

风电机组			光伏单元			储能单元		
设备类型	额定功率/ MW	数量/个	设备类型	额定功率/ MW	数量/个	设备类型	额定功率/ MW	数量/个
WT20F	2.0	2	PV280G	0.54	3	JG9B	0.9	1
WT25F	2.5	2	PV230G	0.42	3	LSTL10B	1	1
WT10F	1.0	2	PV55G	0.1	3	NL11B	1	1

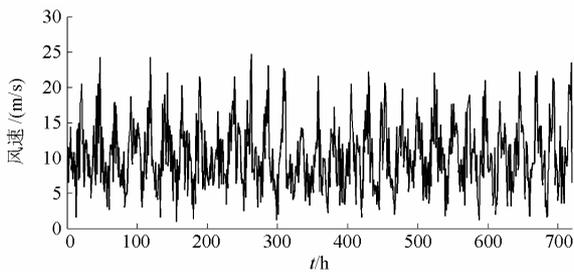


图 3 某月风速变化曲线
Fig. 3 Wind speed curve in a month

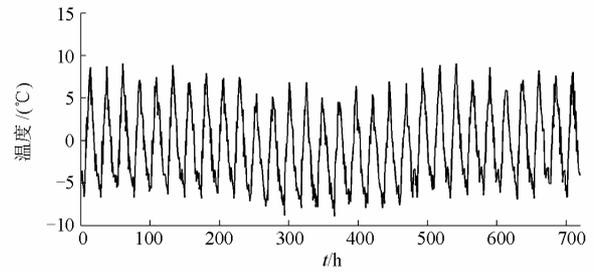


图 5 某月温度变化曲线
Fig. 5 Temperature curve in a month

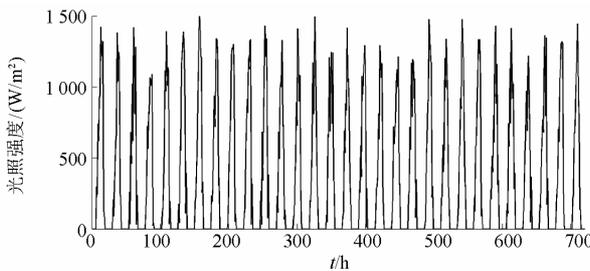


图 4 某月光照强度变化曲线
Fig. 4 Illumination intensity curve in a month

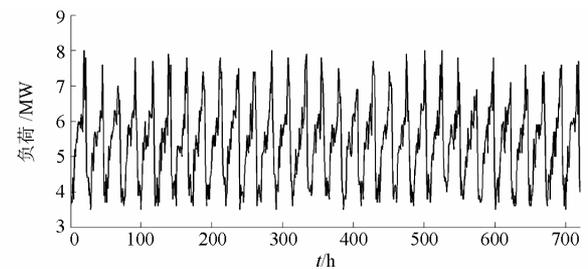


图 6 某月负荷变化曲线
Fig. 6 Load curve in a month

取 2012 年全年历史运行数据为初始挖掘对象，其中储能装置全年工作在跟踪计划出力模式，储能系统实时补偿风光联合发电实际功率和负荷之间的差值。设最小支持度 $S_{min}=0.5$ ，最小置信度 $C_{min}=0.6$ 。通过 2.1 节规则提取方法得到 2 075 条关联规则。如：

$$T_c \in [18.8, 19.4] \wedge V_t \in [6.25, 8.25] \wedge L_w \in [82, 102.5] \wedge \dots$$

$$\Rightarrow F\#001 \in [T] \wedge F\#002 \in [Q] \wedge \dots \wedge G\#001 \in [F]$$

($p = 23.3, s = 0.61, c = 0.78$)

式中： T_c 为温度； V_t 为风速； L_w 为光照强度； $F\#001$ 、 $G\#001$ 分别表示编号为 $F\#001$ 的风电机组和编号为 $G\#001$ 的储能单元；当前机组组态模式综合性能指标值为 $p = 23.3$ ，满足最小支持度和最小

置信度的条件 ($s \geq S_{\min}$ 且 $c \geq C_{\min}$), 关联规则表示的含义为当温度在 $18.8^{\circ}\text{C} \sim 19.4^{\circ}\text{C}$ 之间, 风速 ($6.25 \sim 8.25 \text{ m/s}$), 光照强度 ($82 \sim 102.5 \text{ W/m}^2$) 等条件时, 风光储发电单元最优机组组合是 1 号风机投入 (T)、2 号风机切出 (Q)、1 号蓄电池放电 (F)。

当系统判定当前组态模式切换条件时, 如研究周期第 10 时 25 分, 负荷需求为 3.82 MW, 当前组态模式为风电单独并网发电, 按照“约束”原则和式 (11) 得到当前时刻目标组态模式变权重系数 (如表 3)、可靠性评估值 (如表 4); 同理按照“经济”原则得到目标组态模式评估值和综合评估值 (如表 4), 判定最优目标组态模式为“风光联合”模式。

表 3 变权重系数

Table 3 Variable weight coefficients

组态模式	评分值 x_i	均衡函数 α	变权重系数 w_i'
风电经济性	92.07	0.21	0.047
风电可靠性	79.92	0.901	0.953
光伏经济性	68.95	0.35	0.105
光伏可靠性	82.86	0.827	0.895
储能经济性	5.95	0.304	0.058
储能可靠性	86.25	0.607	0.666
储能协调调度	97.85	0.426	0.276

表 4 目标机组组态模式评估值

Table 4 Target evaluation value of unit combination

组态模式	约束原则评估	经济原则评估	综合评估值
风电单独	26.79	24.45	25.39
光伏单独	26.82	22.64	24.31
风光联合	26.81	25.22	25.86
风储联合	27.82	20.66	23.52
光储联合	27.84	19.65	22.93
风光储联合	28.49	21.79	24.47

基于上述基础数据, 分别采用本文提出的 VWC-AR 算法和文献[10]中的改进粒子群算法 PSO 进行仿真计算, 得到结果如图 7~图 9。

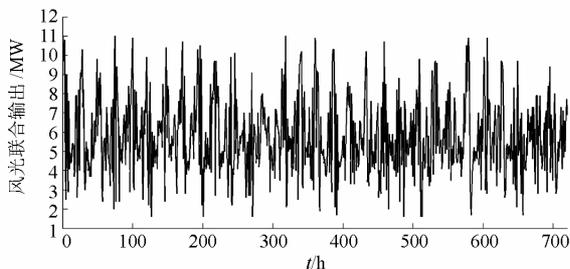


图 7 PSO 算法风光联合出力
Fig. 7 Wind and PV combined output of PSO

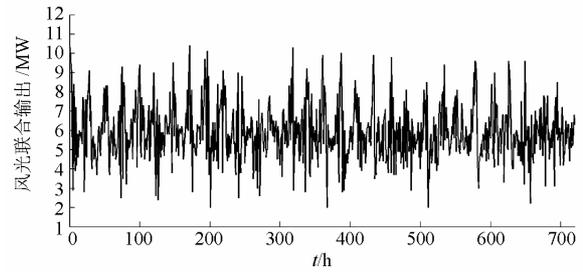


图 8 VWC-AR 风光联合出力
Fig. 8 Wind and PV combined output of VWC-AR

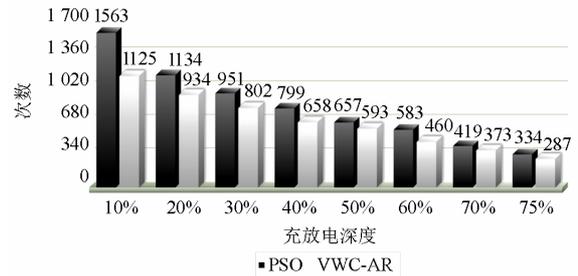


图 9 蓄电池充放电次数对比
Fig. 9 Comparative of battery charge and discharge frequency

由图 7、图 8 风光联合出力对比分析可以看出, 本文提出的 VWC-AR 算法减小了风光联合输出的波动率, 这是因为首先优化算法中增加了风光互补约束条件, 使算法在判定过程中充分利用风光互补特性; 其次, 算法是在保证供电可靠性的基础上, 考虑整体运行经济性, 合理地放弃部分不稳定的风能和太阳能的利用, 减少频繁的、短暂的蓄电池充放电, 这种方法相比一味追求新能源最大化利用或者人为逻辑判断放弃新能源利用的方式, 平均成本要低; 同时, 依据负荷需求动态调整机组组态模式, 能使算法长时间保持较高的准确性和适应性。从图 9 蓄电池充放电次数统计可以看出, VWC-AR 算法对蓄电池在较小放电深度区间 (小于 30%) 的放电次数, 减少了 21.6%, 在较大放电深度区间 (大于 30%) 充放电次数减少了 15.1%, 说明算法能够有效地减少蓄电池充放电次数和放电深度, 尤其是短暂的充放电, 延长了蓄电池使用寿命。

从表 5 机组投切次数统计可以发现, 本文 VWC-AR 算法并没有明显地增加风电机组和光伏单元的投切次数, 这是因为首先算法在目标组态模式选择的时候考虑了机组的启停成本, 因此需要大量切换发电设备的组态模式不会成为最优选择; 其次, 机组是否切换和挖掘的关联规则有关, 性能指标较高的规则会充分利用风光资源, 尽可能地安排所有风光设备投入, 因而不会出现需要设备频繁投切的

规则；最后由于蓄电池不出力将工作在浮充模式，因此蓄电池组不会动态切除，只在例行停机维护时进行切除检查。

表 6 给出了系统性能指标对比分析结果，采用本文的 VWC-AR 算法优化风光储联合发电协调运行策略，蓄电池装置使用寿命能够达到 5.1 年，相比 PSO 优化算法，使用年限延长了 1.2 年；单位发电成本为 0.707 元/kWh，相比 PSO 优化算法提高了 0.075 元/kWh。按照图 2 所示算法流程，分别计算每个周期从 SCADA 系统中采集机组实时运行状态、气象条件等数据，以及工况确认、目标组态模式选择、规则匹配到制定设备投切动作序列全过程时间，经过统计全月 8 640 组数据，得到 VWC-AR 算法响应速度在 4~12 s 之间，可应用于在线调度。

表 5 机组投切次数比较

Table 5 Comparison of unit switch number

算法	风电机组/次	光伏机组/次	储能装置/次
PSO	543	3 092	90
VWC-AR	546	3 071	90

表 6 系统性能指标比较

Table 6 Comparison of the system performance indices

算法	风光相对 负荷波动率	蓄电池使用 周期/年	单位发电成本/ (元/kWh)
PSO	1.33	3.9	0.782
VWC-AR	1.20	5.1	0.707

5 结论

本文提出利用变权重系数和关联规则挖掘混合算法优化风光储联合发电系统协调运行策略。采用关联规则挖掘算法得到了客观的机组综合性能评价价值，形成工况条件到最优机组组合的推理规则集；利用变权重系数解决了负荷需求多变条件下最优组态模式选择问题，确保系统高效经济运行。通过算例证明该方法在可靠运行的同时，能够充分利用风光互补特性，延长蓄电池使用寿命，优化整体运行费用。对未来新能源电力企业协调运行策略有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 杨珺, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
 YANG Jun, ZHANG Jian-cheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013,

41(4): 38-44.
 [2] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
 DENG Wei, LI Xin-ran, LI Pei-qiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
 [3] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.
 SHI Lin, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.
 [4] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
 HU Guo-wei, BIE Chao-hong, WANG Xi-fan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
 [5] 郭创新, 张理, 张金江, 等. 风光互补综合发电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 102-108.
 GUO Chuang-xin, ZHANG Li, ZHANG Jin-jiang, et al. Reliability analysis of wind and photovoltaic integrated generating system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 102-108.
 [6] 汪海瑛, 白晓民, 许婧. 考虑风光储协调运行的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 13-20.
 WANG Hai-ying, BAI Xiao-min, XU Jing. Reliability assessment considering the coordination of wind power, solar energy and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 13-20.
 [7] 陈中, 胡吕龙, 丁楠. 基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 86-91.
 CHEN Zhong, HU Lü-long, DING Nan. Optimized operation of wind-solar-battery hybrid power system based on improved entropy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 86-91.
 [8] 马静, 石建磊, 李文泉, 等. 基于功率多频率尺度分析的风光水气储联合系统日前调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1-9.
 MA Jing, SHI Jian-lei, LI Wen-quan, et al. A day-ahead dispatching strategy for power pool composed of wind farms, photovoltaic generations, pumped-storage power

- stations, gas turbine power plants and energy storage systems based on multi frequency scale analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(6):1-9.
- [9] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Ying-yuan, MAO Mei-qin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [10] 吴杰康, 唐利涛, 黄奂, 等. 基于遗传算法和数据包络分析法的水火电力系统发电多目标经济调度[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 76-81.
WU Jie-kang, KANG Li-tao, HUANG Huan, et al. Multi-objective economic scheduling for hydrothermal power systems based on genetic algorithm and data envelopment analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 76-81.
- [11] MOHAMMADI M, HOSSEINIAN S H, GHAREHPETIAN G B. Optimization of hybrid solar energy sources/wind turbine systems integrated to utility grids as microgrid (MG) under pool/bilateral/hybrid electricity market using PSO[J]. Solar Energy, 2012, 86: 112-125.
- [12] 李建强, 刘吉臻, 张栾英, 等. 基于数据挖掘的电站运行优化应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 118-123.
LI Jian-qiang, LIU Ji-zhen, ZHANG Luan-ying, et al. The research and application of fuzzy association rule mining in power plant operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 118-123.
- [13] DUFO-LO PEZ R, BERNAL-AGUSTIN J L. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems[J]. Renewable Energy, 2008: 2559-2572.
- [14] LI X, LI Y, HAN X, et al. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/PV hybrid power system output with battery energy storage system[J]. Energy Procedia, 2011, 12: 994-1001.
- [15] 李龙. 基于模糊层次分析法的风电市场竞争力研究[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(6): 50-54.
LI Long. Research on Chinese wind power market competitiveness based on fuzzy AHP[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(6): 50-54.
- [16] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.
LIU Wen-qi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 1997, 17(4): 58-64.
- [17] 李珊, 白晓清, 郑斌. 电力市场下考虑煤质影响的火电机组多目标优化调度[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 85-89.
LI Shan, BAI Xiao-qing, ZHENG Bin. The multi-objective optimized scheduling of thermal power plant by consideration of coal quality under the electricity market[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 85-89.
- [18] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
LIU Meng-xuan, WANG Cheng-shan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.

收稿日期: 2013-12-10

作者简介:

吴克河(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力智能软件技术、电力信息安全方面的研究;

周欢(1988-), 男, 博士生, 主要从事电力信息技术, 新能源技术方面的研究。E-mail: shenarder@163.com