

基于随机规划的含风电场的 电力系统节能优化调度策略

龙军, 莫群芳, 曾建

(广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

A Stochastic Programming Based Short-Term Optimization Scheduling Strategy Considering Energy Conservation for Power System Containing Wind Farms

LONG Jun, MO Qunfang, ZENG Jian

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: Optimization scheduling strategy considering energy conservation and environment protection for multi source power system containing wind farms, which possesses important economic benefit and social effect, is a novel complex nonlinear problem. Based on traditional hydro-thermal economic scheduling model and emerging thermal-wind complementary economic scheduling model, a stochastic programming based short-term optimization scheduling model for power system consisting of thermal plants, hydropower stations and wind farms is proposed. In the proposed model, the chance constraints are used to describe objective function and constraints, and scheduling schemes under different confidence levels are given. Meanwhile three objectives, namely minimum water consumption of hydropower stations, minimum coal consumption of thermal power plants and minimum outflow discharge of nitrogen oxides, are taken into account, then by use of ideal point method, the multi objective problem is turned into single objective problem. In allusion to the randomness of both wind speed and wind farm output, the stochastic simulation is combined with sequential quadratic programming to solve the optimal value of objective function. Case simulation results show that the proposed scheduling strategy is effective and feasible.

KEY WORDS: wind farm; generation scheduling considering energy conservation; stochastic programming; chance-constrained programming; stochastic simulation

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767001); 国家 863 高技术基金项目(2007AA04Z197); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094501110002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50767001); The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA04Z197); Project Supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20094501110002).

摘要: 含风电场的多电源电力系统优化调度是一个新的具有重要经济和社会效益的复杂非线性问题。针对传统的水火经济调度模型以及新兴的火风互补经济调度模型, 提出了基于随机规划的水、火、风混合系统短期优化调度模型, 利用机会约束描述目标函数和约束条件, 并给出不同置信水平下的调度方案。同时考虑水电站耗水量最小、火电煤耗量最小以及氮氧化物排放量最小 3 个目标, 采用理想点法将多目标转化为单目标问题。针对风电场风速及出力的随机性, 采用随机模拟技术, 结合序列二次规划法找到目标函数的最优值。实例仿真结果表明了该调度策略的有效性和可行性。

关键词: 风电场; 节能调度; 随机规划; 机会约束规划; 随机模拟

0 引言

节能降耗、清洁能源是当今社会关注的热点。风电无燃料消耗, 是极具开发潜力的可再生清洁能源。随着大规模并网风电的发展, 含风电场的多电源电力系统优化调度问题已成为备受关注的课题。

风力具有很强的随机性和间歇性, 风电并网后应优先安排发电。一些学者针对风速以及风电场出力的随机特性采用了不同的处理方法, 文献[1-2]利用随机模拟技术处理风速的随机性; 文献[3-9]利用时序神经网络法、卡尔曼滤波法等对风速进行预测。传统的优化调度方法对具有随机性的风电不太合适, 一些学者引入随机规划理论来解决含风电场的动态经济调度问题。文献[10]应用随机规划理论建立了考虑机组组合的含风电场电力系统动态经济调度模型, 并综合应用随机模拟、神经网络和遗传算法的混合智能算法求解模型, 但只以常规机组发电成本最小为单目标, 没有考虑污染物的排放。文献[11]应用模糊理论建

立了含风电场的电力系统动态经济调度模糊模型，并采用下降搜索的改进粒子群(modified particle swarm optimization, MPSO)算法求解模型，但未考虑建立多个目标函数。文献[12]建立了水、火、风混合系统的中长期多目标节能发电计划模型，优先安排风、水等清洁能源发电，并利用随机模拟处理风、水的随机性，得到节能减排机制下的月发电计划，但水电未参与出力调整。

含水、火、风等多电源的混合系统是一个复杂的非线性系统。风电并网的随机性和动态特性给电力系统的运行和调度带来了新问题，如何处理这些不确定因素是关键。本文引入随机规划理论描述风电场的不确定性，使含风电场的经济调度更加切实可行。在风电机组和常规火电机组这一互补调度模式下，考虑水电机组也参与调度，以水电耗水量最小、火电煤耗量和污染物排放量最小为目标，建立水、火、风多电源混合系统的多目标节能环保调度模型。以 1 个 2 级梯级水电站、2 个火电机组和 1 个风电场为实例进行仿真，验证上述模型的正确性和可行性。

1 机会约束规划模型

机会约束规划^[13-16]是随机规划理论的重要分支，由 Charnes 和 Cooper 提出，主要针对的是约束条件中含有随机变量，且必须在观测到随机变量的实现之前做出决策的问题。考虑到所作决策在不利的情况发生时可能不满足约束条件，本文采用一种原则，即允许所作决策在一定程度上不满足约束条件，但该决策应该使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。求解机会约束规划的方法一般有 2 种：一种是转化为其等价的确定性模型；另一种是用随机模拟技术。本文采用第 2 种方法。

机会约束规划的一般模型如下：

$$\begin{cases} \min \bar{f} \\ \text{s.t. } P_r\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ P_r\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha_j \end{cases} \quad (1)$$

式中： \mathbf{x} 是一个 n 维决策向量； $\boldsymbol{\xi}$ 是已知概率密度函数 $\varphi(\boldsymbol{\xi})$ 的随机向量； $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 为目标函数； $g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 为随机约束函数； \bar{f} 是目标函数 $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 在置信水平至少为 β 时所取的最小值； $P_r\{\}$ 表示 $\{\}$ 中事件成立的概率； α_j 和 β 分别为事先给定的约束条件和目标函数的置信水平。

单目标机会约束规划可以推广到多目标机会约束规划，表示形式如下：

$$\begin{cases} \min [\bar{f}_1(\mathbf{x}), \bar{f}_2(\mathbf{x}), \dots, \bar{f}_m(\mathbf{x})] \\ \text{s.t. } P_r\{f_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq \bar{f}_i\} \geq \beta_i, \quad i=1, 2, \dots, m \\ P_r\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0\} \geq \alpha_j, \quad j=1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (2)$$

2 基于节能环保调度的发电模型

2.1 目标函数

按照节能调度的基本原理，应优先安排风等清洁能源上网发电。考虑水电参与调度更能合理利用水资源，节约发电用水量，并切合多电源、大电网发展的要求。因此，调度的依据是有风来时则优先发电，无风时则由水火常规调度，共同承担发电任务。由于风的出力是随机的，引起水火出力也具有随机性，因此目标函数用机会约束表示如下：

为使水电站总耗水量最小，即

$$\begin{cases} \min \bar{f}_1 \\ \text{s.t. } P_r\{f_1 \leq \bar{f}_1\} \geq \beta_1 \\ f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N 3600 Q_m(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $Q_m(t)$ 为水电站 m 在 t 时段内的平均发电流量； t 为调度周期； j 为水电机组编号。

为使火电机组总煤耗量最小，即

$$\begin{cases} \min \bar{f}_2 \\ \text{s.t. } P_r\{f_2 \leq \bar{f}_2\} \geq \beta_2 \\ f_2(P_{Gi}(t)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [a_i P_{Gi}^2(t) + b_i P_{Gi}(t) + c_i] \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_{Gi}(t)$ 为第 i 台火电机组在 t 时段的出力； a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的耗量特性系数； t 为调度周期； i 为火电机组编号。

由于氮氧化物对大气污染较严重，本文考虑 NO_x 排放量最小为目标函数。为使火电机组污染物排放量最小，即

$$\begin{cases} \min \bar{f}_3 \\ \text{s.t. } P_r\{f_3 \leq \bar{f}_3\} \geq \beta_3 \\ f_3(P_{Gi}(t)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [\mu_i P_{Gi}^2(t) + \nu_i P_{Gi}(t) + \omega_i] \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{Gi}(t)$ 为第 i 台火电机组在 t 时段的出力； μ_i 、 ν_i 、 ω_i 为火电机组 i 的排放量特性系数； t 为调度周期； i 为火电机组编号。

本文采用理想点法^[17]解决多目标问题，即使各个目标函数与单目标最优值的欧氏距离最小，表达式为

$$\min f(\mathbf{x}) = \left[\sum_{i=1}^k \lambda_i |f_i(\mathbf{x}) - f_i^0|^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

2.2 约束条件

系统功率平衡约束为

$$\sum_{j=1}^N P_{Hj}(t) + \sum_{i=1}^I P_{Gi}(t) + \sum_{k=1}^M P_{Wk}(t) = P_L(t), \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中: $P_{Hj}(t)$ 、 $P_{Gi}(t)$ 、 $P_{Wk}(t)$ 分别为 t 时段水电机组、火电机组、风机的出力; $P_L(t)$ 为系统总负荷。

梯级水电站水量平衡约束为

$$\begin{cases} V_1(t) = V_1(t-1) + [I_1(t) - Q_1(t) - S_1(t)]\Delta t \\ V_m(t) = V_m(t-1) + [I_m(t) + Q_{m-1}(t-\tau) + S_{m-1}(t-\tau) - Q_m(t) - S_m(t)]\Delta t \end{cases} \quad (8)$$

式中: $V_1(t)$ 、 $V_m(t)$ 分别为第 1 级、第 m 级水电站水量平衡约束; $I(t)$ 、 $S(t)$ 分别为 t 时段的自然来水流量和弃水流量; τ 为 m 级水电站的上游水电站泄水到达 m 级水电站的延时时间。

水库库容约束为

$$\underline{V}_m \leq V_m(t) \leq \overline{V}_m, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

水库发电流量约束为

$$\underline{Q}_m \leq Q_m(t) \leq \overline{Q}_m, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

水电站出力约束为

$$\underline{P}_{Hm} \leq P_{Hm}(t) \leq \overline{P}_{Hm}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

式中出力的计算公式为 $P_{Hm}(t) = A_m Q_m(t) H_m(t)$ 。火电机组出力约束为

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}(t) \leq \overline{P}_{Gi}, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

火电机组爬坡速率约束为

$$D_{Gi} \leq P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq U_{Gi} \quad (13)$$

式中 D_{Gi} 和 U_{Gi} 分别为火电机组 i 在 t 时段的有功出力下降速率和上升速率。系统的旋转备用约束为

$$D_{ST} + \underline{P}_{Gi}(t) \leq P_{Gi}(t) \leq \overline{P}_{Gi}(t) - U_{ST} \quad (14)$$

式中 U_{ST} 和 D_{ST} 分别为系统在上、下旋转备用要求, 一般取系统总负荷的 5%。

2.3 风速和输出功率预测

风电场的输出功率随风速变化而变化, 具有很强的随机性。因此, 风电场风速预测的准确程度对电力部门及时调整调度计划具有重要现实意义。本文采用随机模拟技术处理风速, 利用随机发生器产生风速抽样值, 并根据出力与风速的关系式计算风电场输出功率。

对大量实测数据的统计结果表明, 绝大部分地

区风速的随机分布近似服从 Weibull 函数^[18-19], 其概率密度方程为

$$\phi(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (15)$$

式中: k 为形状系数, 取值范围在 1.8~2.3; 参数 c 为所描述地区的年平均风速。

风力机的输出功率与风速关系可用式(16)^[20]表示, 其中 v_r 、 P_{Wr} 分别表示风机的额定风速、额定功率, v_{in} 为切入风速, v_{out} 为切出风速:

$$P_{Wk} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v \geq v_{out} \\ \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} \cdot P_{Wr}, & v_{in} \leq v < v_r \\ P_{Wr}, & v_r \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (16)$$

3 基于随机模拟的序列二次规划法

3.1 随机模拟技术

随机模拟技术可以直接处理复杂的机会约束, 而不用转化为其确定的等价类。考虑机会约束, 则

$$P_r \{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha_j \quad (17)$$

式中: ξ 为随机向量, 已知其概率分布 $\varphi(\xi)$; \mathbf{x} 为决策变量。

检验约束条件的具体实现过程如下:

1) 置 $n=0$;

2) 由概率分布 $\varphi(\xi)$ 生产随机变量 ξ , 若 $g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p$, 则 $n=n+1$;

3) 重复步骤 2) N 次, 其中 N 足够大;

4) 由大数定律知, 机会约束成立的条件是 $n/N \geq \alpha_j$, 若满足 $n/N \geq \alpha_j$, 模拟成功, 否则应舍弃原抽样序列, 重新模拟。

3.2 序列二次规划法

序列二次规划法 (sequential quadratic programming, SQP) 在求解多变量有约束的非线性优化问题时有很好的适用性和收敛性, 其主要思路是形成基于拉格朗日函数二次近似的二次规划子问题, 即

$$L(\mathbf{x}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^l \mu_j g_j(\mathbf{x}) \quad (18)$$

具体的形式可表示为

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(\mathbf{x}^k)^T d \\ \text{s.t. } \nabla h_i(\mathbf{x}^k)^T d + h_i(\mathbf{x}^k) = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \\ \nabla g_j(\mathbf{x}^k)^T d + g_j(\mathbf{x}^k) \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (19)$$

式中: 约束条件中的函数分别是约束函数 $h_i(\mathbf{x})$ 、

$g_j(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^k 点处泰勒展开式中的线性部分；

$d = \mathbf{x} - \mathbf{x}^k$ ； H_k 一般是 $f(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^k 点处的海塞阵，

$H_k = \nabla^2 f(\mathbf{x}^k)$ ，具体的更新公式如下：

$$H^{k+1} = H^k + \frac{q^k (q^k)^T}{(d^k)^T q^k} - \frac{(H^k)^T H^k}{(d^k)^T H^k d^k} \quad (20)$$

式中 $q^k = \nabla_x L(\mathbf{x}^{k+1}, \lambda^{k+1}, \mu^{k+1}) - \nabla_x L(\mathbf{x}^k, \lambda^k, \mu^k)$ 。

3.3 求解过程

根据上述模型，基于随机模拟的序列二次规划法具体流程如下：

1) 输入水电站、火电机组参数及有关的约束条件，如系统功率平衡、水量平衡、耗量系数、出力约束、机组爬坡、旋转备用约束等；输入风机参数，如风机台数、装机容量、额定风速等。

2) 利用 Matlab 中 Wblrnd 随机发生器产生服从 Weibull 函数分布的风速序列 N 个 $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ，并用式(16)计算出对应的出力。

3) 置 $m=0$ ， $n=0$ ，若 M 维风速序列中有 $v_{in} \leq v_i \leq v_{out}$ ，则 $m=m+1$ ，用 $m/M \geq \alpha_j$ 判断该次风速序列是否符合条件，若满足，则 $n=n+1$ 并转步骤 4)；否则输出 0。

4) 模拟 N 次风速序列中，若 $n/N \geq \beta$ ，则开始排序，否则返回步骤 2)；置 $f_i = f(\mathbf{x}, v_i)$ ，其中 $i=1, 2, \dots, N$ ，得到序列 $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ ，置 k 为 $\beta_i N$ 的整数部分，则序列中第 k 个最小元素即为目标函数的最优值。

4 算例结果与分析

以某个地区含风电、火电、水电 3 种电源为例，调度周期为 24h。其中风电机组装机容量为 60MW， $P_{Wr} = 600 \text{ kW}$ ， $v_r = 14 \text{ m/s}$ ， $v_{in} = 3 \text{ m/s}$ ， $v_{out} = 25 \text{ m/s}$ 。根据风速分布特性，取 $k=2.17$ 、 $c=7.99$ ，利用 Matlab 中 Wblrnd 随机发生器产生风速序列，并依式(16)计算风电场输出功率。本文考虑 2 级梯级水电站、2 台火电机组以及大型风电场参与调度，以水电站发电流量、火电机组出力为决策变量，利用 Matlab 编程求解模型。

梯级水电站参数见表 1。表中： T_1 和 T_2 的水库调节特性分别为多年调节和日调节。2 台火电机组参数见表 2。各时段系统负荷见表 3。为了简化计算，在处理水电站变量时，本文的仿真过程中取额定水头为净水头，同一时段内空间来水量为定值，即调度周期内入库流量是确定的。

$\beta_{1,2,3} = 0.85$ 时不同方案的优化结果比较见表 4。

表 1 梯级水电站参数

参数	水电站 T_1	水电站 T_2
正常蓄水位/m	780	645
死水水位/m	731	637
死水库容/亿 m^3	30	20
最大发电流量/ (m^3/s)	1 000	800
电站额定水头/m	110	75
装机容量/MW	1 200	1 000
保证出力/MW	350	200
综合出力系数	8.3	8.0

表 2 火电机组基本参数

机组编号	火电机组 H_1	火电机组 H_2
装机容量/MW	500	530
最小出力/MW	220	240
$A/(\text{t}/\text{MW}\cdot\text{h}^2)$	0.000 176	0.000 235
$b/(\text{t}/\text{MW}\cdot\text{h})$	0.050	0.120
C/t	4.000	5.000
$\mu/(10^{-7}\text{t}/\text{MW}\cdot\text{h}^2)$	4.692	5.472
$\nu/(10^{-7}\text{t}/\text{MW}\cdot\text{h})$	-6.374	-6.812
$\omega/(10^{-7}\text{t})$	5.065	5.732

表 3 24 h 系统负荷

时刻/h	负荷/MW	时刻/h	负荷/MW	时刻/h	负荷/MW
$t=1$	1 820	$t=9$	2 130	$t=17$	2 070
$t=2$	1 800	$t=10$	2 120	$t=18$	2 100
$t=3$	1 770	$t=11$	2 080	$t=19$	2 140
$t=4$	1 730	$t=12$	2 150	$t=20$	2 110
$t=5$	1 750	$t=13$	2 100	$t=21$	2 070
$t=6$	1 880	$t=14$	2 040	$t=22$	1 930
$t=7$	2 040	$t=15$	2 085	$t=23$	1 900
$t=8$	2 150	$t=16$	2 040	$t=24$	1 850

表 4 不同方案的优化结果比较

Tab. 4 The comparison of optimal results by different scheduling schemes

项目	优化结果			
	f_1	f_2	f_3	f
总耗水量/亿 m^3	1.107 6	1.262 4	1.233 2	1.262 6
总耗煤量/t	3 599.6	2 662.9	2 671.5	2 661.2
总排放量/t	4.133 3	2.658 3	2.657 5	2.657 2

由表 4 可看出，若按单目标优化，单以耗水量为目标函数时，水电站尽可能少发，这会导致耗煤量和污染物排放量很大，不能达到节能减排的目的。经多目标优化后，由表 4 的多目标优化值(f 对应列)可看出，各个目标之间做了一定妥协，使整体达优化。与耗水量最小模型(f_1)比，多目标优化时耗水量增加了 0.155 亿 m^3 ，但耗煤量减少 938.4 t，污染物排放量减少 1.476 1 t；与煤耗量最小模型(f_2)相比，耗水量增加了 0.000 2 亿 m^3 ，但耗煤量减少 1.7 t，污染物排放量亦有所减少，符合节能环保的要求。

表 5 是 $\beta_{1,2,3} = 0.85$ 时经多目标优化后各电源的

表5 含风电场的多目标优化出力分配结果

Tab. 5 Active power of generator based on multi-objective optimization containing wind farm

机组	机组出力/MW											
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
T ₁	809.33	760.46	768.91	738.87	744.13	839.81	931.51	1005.3	997.39	986.92	938.68	1013.4
T ₂	368.67	346.42	350.27	336.59	338.99	382.54	424.29	475.84	454.28	449.52	427.56	461.60
H ₁	311.00	310.00	308.50	306.66	307.50	314.00	322.00	327.50	326.50	326.00	324.00	327.50
H ₂	331.00	330.00	328.50	326.50	327.50	334.00	342.00	347.50	346.50	346.00	344.00	347.50
风机	0	53.12	13.82	21.38	31.88	9.65	20.20	11.86	5.33	11.56	45.76	0

机组	机组出力/MW											
	t=13	t=14	t=15	t=16	t=17	t=18	t=19	t=20	t=21	t=22	t=23	t=24
T ₁	962.56	924.76	964.77	916.19	941.64	973.75	994.60	966.53	963.85	865.79	852.38	827.49
T ₂	438.42	421.22	439.42	417.33	428.89	443.51	453.01	440.28	439.05	394.37	388.26	376.84
H ₁	325.00	322.00	324.25	322.00	323.50	325.00	327.00	325.50	323.50	316.50	315.00	312.50
H ₂	345.00	342.00	344.25	342.00	343.50	345.00	347.00	345.50	343.50	336.50	335.00	332.50
风机	29.02	30.02	12.31	42.48	32.47	12.74	18.39	32.09	0	16.74	9.36	0.57

出力分配结果。由表5可以看出：各时刻均满足系统功率平衡约束；某一时段的风机出力可能为零，具有很强的随机性，而火电机组的出力相对平缓，负荷变化主要由水电调节，符合清洁能源首先发电的要求。这一仿真结果验证了该算法的可行性与合理性，且满足节能环保调度原则，即充分利用风、水等清洁能源，尽可能地减少化石类资源消耗和污染物排放。由上述分析可知，本文提出的多目标优化调度模型能较好地兼顾多种电源同时参与调度的需求，符合大区域联网的实际运行情况。

置信水平 β 表示满足约束条件的概率，则 $1-\beta$ 表示违反约束条件的概率，即风险的大小程度， β 越高，违反约束的概率越小，风险越小，反之，风险越大。由表6可知，随着 β 的减小，风险增大，但目标函数均变小，即耗水量、耗煤量、污染物排放量都越来越小，这表明风险越大，所带来的经济和环保效益越大。

表6 置信水平对优化结果的影响

Tab. 6 Effect of prescribed probability level on the optimal results

置信水平	耗水量/亿 m ³	耗煤量/t	污染物排放量/t
$\beta_{1,2,3} = 0.9$	1.263 3	2 662.8	2.659 4
$\beta_{1,2,3} = 0.85$	1.262 6	2 661.2	2.657 2
$\beta_{1,2,3} = 0.8$	1.260 2	2 660.1	2.653 5

5 结论

针对风电场的随机特性，本文引入随机规划理论，采用基于随机模拟的序列二次规划法求解含风、水、火多种电源的混合电力系统优化调度模型，并通过仿真得到优化结果：

1) 对含风电场的节能环保调度模型进行仿真，结果满足节能发电调度原则，即风、水等清洁能源

优先发电，再依次调度化石类(煤电)发电资源，最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放，实现资源优化配置。

2) 随机规划中置信水平 β 的高低反映了调度方案的风险程度。 β 越小，违反约束的概率越大，风险越大，调度结果越优，经济和环保效益就越理想；反之， β 越大，违反约束的概率越小，风险越小，调度结果越保守，经济和环保效益稍差。

3) 用随机模拟技术处理风速及其出力的随机性是切实可行的办法，结合序列二次规划法求解模型。仿真验证了该算法的正确性和可行性，但在求解多目标优化过程中，还需追求更好的收敛效果。今后可以进一步寻找更适合的优化算法，尝试结合遗传算法、粒子群算法等智能算法，以得到更优的结果。

参考文献

- [1] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 129-137.
Jiang Yuewen, Chen Chong, Wen Buying. Particle swarm research of stochastic simulation for unit commitment in wind farms integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 129-137(in Chinese).
- [2] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39.
Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Hu Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 34-39(in Chinese).
- [3] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [4] 蔡凯, 谭伦农, 李春林, 等. 时间序列与神经网络法相结合的短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 82-85.
Cai Kai, Tan Lunnong, Li Chunlin, et al. Short-term wind speed

- forecasting combining time series and neural network method[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 82-85(in Chinese).
- [5] Kamal L, Jafri Y Z. Time series models to simulate and forecast hourly averaged wind speed in Wuet Pakistan[J]. Solar Energy, 1997, 61(1): 23-32.
- [6] Kariniotakis G, Stavrakakis G, Nogaret E. Wind power forecasting using advanced neural network models[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(4): 762-767.
- [7] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82-86.
Pan Difu, Liu Hui, Li Yanfei. A wind speed forecasting optimization model for wind farms based on time series analysis and Kalman filter algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 82-86(in Chinese).
- [8] 马静波, 杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 75-79.
Ma Jingbo, Yang Honggeng. Application of adaptive Kalman filter in power system short-time load forecasting[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 75-79(in Chinese).
- [9] Al-Hamadi H M, Soliman S A. Short-term electric load forecasting based on Kalman filtering algorithm with moving windows weather and load model[J]. Electric Power Systems Research, 2004(68): 47-59.
- [10] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 42-47.
Sun Yuanzhang, Wu Jun, Li Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 42-47(in Chinese).
- [11] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
Chen Hanyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26(in Chinese).
- [12] 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中—长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 24-29.
Wen Lili, Liu Junyong. Monte-carlo simulation of medium and long-term generation plan in hybrid power system based on environmental economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 24-29(in Chinese).
- [13] 朱健全, 吴杰康. 水火电力系统短期优化调度的不确定性模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 51-54.
Zhu Jianquan, Wu Jiekang. An uncertainty model for short-term optimization scheduling of hydrothermal power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 51-54(in Chinese).
- [14] 胡泽春, 王锡凡. 考虑负荷概率分布的随机最优潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 14-18.
Hu Zechun, Wang Xifan. Stochastic optimal power flow approach considering load probabilistic distributions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 14-18(in Chinese).
- [15] Charnes A, Cooper W W. Chance-constrained programming[J]. Management Science, 1959, 6(1): 73-79.
- [16] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 74-94.
- [17] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 130-156.
- [18] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
Ding Ming, Wu Yichun, Zhang Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110(in Chinese).
- [19] Bowden G J, Barker P R, Shestopal V O, et al. The Weibull distribution function and wind power statistics[J]. Wind Engineering, 1983(7): 85-98.
- [20] 吴义纯, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 70-72.
Wu Yichun, Ding Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-72(in Chinese).



龙军

收稿日期: 2011-05-06.

作者简介:

龙军(1956), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向是电力系统分析与计算、电力系统检测与控制、电力市场, E-mail: lj161@gxu.edu.cn;

莫群芳(1986), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与计算。

(责任编辑 杜宁)