

基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究

王健¹, 谢桦¹, 孙健²

(1. 国家能源主动配电网技术研发中心, 北京交通大学, 北京 100044;

2. 国家电网北京电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 主动配电网 (Active Distribution Network) 的产生对于加大可再生能源的消纳能力、提高用电互动化水平、实现配电网的灵活智能管理发挥着重要的作用, 逐渐成为未来智能电网发展的重要方向。其中主动配电网能量管理系统 (DMSs) 作为主动配电网的最高决策中心, 通过对各分布式电源的有效控制和调度, 保障配电网的全局优化运行。为提高主动配电网运行的经济性和可靠性, 通过对主动配电网能量优化调度技术进行分析, 考虑到风力发电和光伏发电的不确定性, 结合随机模拟技术和惩罚函数方法, 基于机会约束规划建立了含有风力发电机、光伏发电单元以及储能装置的主动配电网能量调度随机数学模型。在满足各种约束条件的基础上, 使用改进的粒子群算法求解该模型。并以某地区实际系统为算例, 通过与标准粒子群算法进行比较, 验证所提模型的正确性与有效性。

关键词: 主动配电网; 能量管理系统; 随机模拟技术; 机会约束规划; 改进粒子群算法

Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming

WANG Jian¹, XIE Hua¹, SUN Jian²

(1. New Energy Research Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Active distribution network has gradually become the important direction of the future smart power grid. It plays an important role in increasing capability of renewable energy accommodation, improving the power utilization level and realizing the flexible intelligent distribution network management. The active distribution network energy management system (DMSs), which is the highest decision-making center of active distribution network, uses effective controlling and scheduling of the distributed power to guarantee global optimization operation of distribution network. This paper aims to improve the economy and reliability of the active distribution network. As the wind power and photovoltaic power generation have uncertainty, it uses random simulation technique and the penalty function method, based on the chance-constrained programming to establish a energy scheduling programming mathematical model, which has wind turbines, photovoltaic power generation unit and the active power energy storage device. Considering various constraint conditions, the model uses the improved particle swarm algorithm to solve. In order to verify the correctness and effectiveness of the provided model, an actual system in a certain area is used as an example and the standard particle swarm algorithm is compared.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A306).

Key words: active distribution network; DMSs; random simulation technique; chance-constrained programming; improved particle swarm algorithm

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0045-08

0 引言

分布式发电技术在环境保护, 提高电网供电可靠性和经济效益方面发挥着重要作用, 因此得到各

个国家的广泛关注, 并且取得了快速的发展。然而规模化的可再生能源接入到配电网中, 对传统配电网的运行控制产生了深远的影响^[1]。此时, 配电系统从单向辐射式的网络转变为遍布分布式电源和负载互联的网络, 这种双向供电的多电源配电网在运行和管理过程中暴露出越来越多的问题, 主要表现在设备可利用率不高, 系统自愈恢复能力薄弱, 顾

基金项目: 清华大学电力系统国家重点实验室开放基金资助; 国家电网北京市电力公司科技项目 (5202011304HH); 国家 863 高技术基金项目 (2011AA05A306)

客与电网的自适应交互水平较低，供电可靠性及电能质量的恶化等，因此主动配电网技术应运而生^[2]。主动配电网（ADN）作为一种新兴的电力系统自动化发展方向，是智能配电网技术的高级模式。2008年在 CIGRE 会议上被首次提出，其基本定义是：通过使用灵活的网络拓扑结构来管理潮流，以便对局部的 DER 进行主动控制和主动管理的配电系统^[3]。因而主动配电网的特点主要是能够有效管理配电网中的间歇式新能源、储能装置、柔性负载、无功补偿设备等可控分布式电源的优化运行，为系统提供一定的电力支持，实现配电网的安全、经济、高效运行^[4]。

主动配电网的核心价值在于通过源网的协调控制系统，将 DG 作为可控可调机组参与最优潮流的运行调度，实现主动配电网的全局优化能量管理^[5]。因此主动配电网能量管理系统（DMSs）是主动配电网技术的实现形式，是最高层次的决策中心。DMSs 通过状态估计、智能优化算法数据处理以及控制策略输出的方式完成对整个配电网的电压控制、潮流管理、DG 协调运行以及快速网络重构控制，如图 1 所示。其中主动配电网能量管理系统状态估计中信息收集主要包括用户负荷实时数据、网络拓扑结构、DG 的运行工况以及储能装置的电荷状态等全局运行数据信息^[6]。

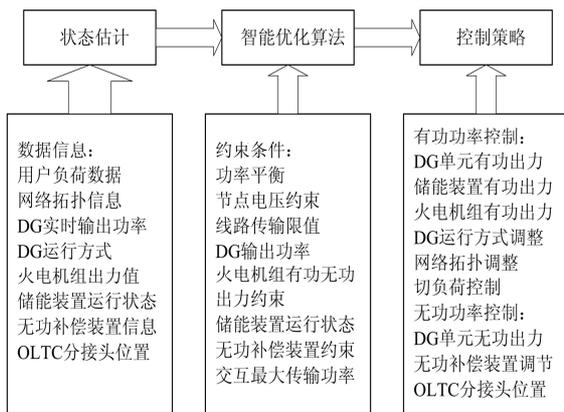


图 1 主动配电网能量管理系统示意图

Fig. 1 Active distribution network energy management system

主动配电网能量调度依托于主动配电网能量管理系统，通过协调各分布式电源、储能设备、可调度发电机，对分布式电源的输出功率、用户需求侧以及分布式发电系统与上级电网间的电能交换进行有效能量调度，保证配电网在满足各种可靠性指标的前提下实现有功潮流最优，促使配电网安全、高效、经济运行。从数学上讲，主动配电网的能量调度是典型的大规模非线性混合整数优化问题，同

时由于间歇式可再生能源输出功率的随机性和间歇性，使得能量调度过程增加了不确定性因素。文献[7]按照确定性的方法调度系统中的可控资源，引入了旋转备用约束条件。这种“旋转备用调整法”优势在于易以实现，但是其结果取决于特设的规则，因此很难保证经济性要求。文献[8]基于方案树的随机规划方法解决能量调度问题，该方法用有限数量的场景构造方案树来模拟无限维的不确定性，并给定各方案相应的概率作为权重，求取各方案综合的最优发电计划。为了进一步提高调度方案的可靠性，文献[9]提出双重随机性考虑：即固定备用大小的传统做法与方案树随机优化方法相结合。然而基于方案树的方法解决能量调度问题计算过程较为复杂，调度方案的可行性和合理性过分依赖于方案树的选择。文献[10]使用模糊决策概念和在模糊环境下的决策优化模型，用模糊的方式处理优化问题中的不确定量，按照距离可行域的远近程度模糊越界结果，然而这种方法受制于具体研究对象，难以保障调度方案的最优。而后基于机会约束规划的随机优化方法被广泛地应用到各种优化问题中，并且在解决实际问题上取得了较好的效果。

本文为了提高主动配电网运行可靠性和经济性，建立了基于机会约束规划的主动配电网能量调度数学模型。该模型一方面充分考虑风力发电以及光伏发电输出功率不确定性给系统带来的影响，将间歇式可再生能源的随机性和预测的规律性相结合，利用区间随机模拟的方法预测其出力；另一方面在目标函数中综合考虑配电网系统运行成本、能量交互成本等经济指标，力求在满足各种系统可靠性约束条件的基础上，实现配电网运行的经济效益最大化。文中采用改进的粒子群算法对分布式电源能量调度问题进行求解，该方法搜索能力强，寻优速度快，具有较好的鲁棒性，并且经过改进后的粒子群算法能够避免求解过程中陷入局部最优，极大地提高了调度方案的可行性。

1 基于随机优化的主动配电网能量调度模型

1.1 机会约束规划

机会约束规划是随机优化的重要分支，是由 Charles 和 Cooper 首先提出来的，用于解决在给定置信度水平下具有不确定性因素的优化问题。如果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，考虑到所做的决策在一定程度上不能满足约束条件的要求，采用允许所做的决策在一定水平下不满足约束条件，但是该决策必须使约束条件成立的概率高于某一置信水平的原则

加以解决。系统的极值问题可以归结为以下非线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \min \bar{f}(x) \\ \text{st.} \quad & P_{\Gamma} \{f(x, \xi) \leq \bar{f}(x)\} \geq \beta \\ & P_{\Gamma} \{g_i(x, \xi) \leq 0, i=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x 为一个 n 维决策向量; ξ 为随机向量; $f(x, \xi)$ 为目标函数; $g_i(x, \xi)$ 为随机约束条件; $P_{\Gamma}(\cdot)$ 为时间成立的概率; α 为事先给定的约束条件置信水平; β 为目标函数的置信水平; \bar{f} 为目标函数 $f(x, \xi)$ 在置信水平至少为 β 所取的最小值。

1.2 主动配电网能量调度模型

1.2.1 目标函数

在主动配电网能量调度模型中, 目标函数主要考虑的是整个配电网的经济优化运行。配电网经济运行指电网在供电成本率低或发电能源消耗率及网损率最小的条件下运行。分布式电源接入配电网中, 能够极大地提高系统供电的经济性, 相对于火力发电等传统机组发电, 光伏发电以及风力发电的发电成本比较低廉, 各分布式电源的运行维护成本主要考虑可调度发电机和储能装置的成本。在能量调度过程中, 需尽可能提高可再生能源的利用效率, 优化主网与分布式电源系统之间的能量交互成本同样需要重视。具体目标函数如式 (2)。

$$\min E \left[\sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^{N_1} \omega_1 f(P_i^t) + \omega_2 (C_{PE}(P_{line}^t) + I_{SE}(P_{line}^t)) \right) \right] \quad (2)$$

其中: w_1 、 w_2 为加权系数, 表征各优化目标的权重, 且满足 $w_1 + w_2 = 1$; N_1 为 DG 的数目, 主要包括柴油发电机、光伏电站、风力发电机以及储能装置。目标函数中各分布式电源运行成本 $f(P_i)$ 包括折旧费用和运行维护成本。

折旧费用

$$C_{DEP}(P_i) = \frac{C_{INS} f_{cr}}{P_{cr} \cdot \tau_g} \quad (3)$$

$$f_{cr} = \frac{i(1+i)}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

式中: C_{DEP} 为折旧成本; C_{INS} 为安装成本; f_{cr} 为资本回收系数; P_{cr} 为机组额定发电功率; τ_g 为年可利用小时数; i 为利息率; n 为折旧年限; P_i 为 DG 输出功率; k 为 DG 数目。

运行维护成本

$$OM(P_i) = k_{OM}(P_i) \cdot P_i \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中, K_{OM} 为运行维护系数。

微网系统与主网交互能量成本^[11]:

分布式电源系统从主网系统购电的支出 (元) 为

$$C_{PE}(P_{gridt}) = \begin{cases} 0 & P_{gridt} < 0 \\ C_{pt} P_{gridt} \Delta t & P_{gridt} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: C_{pt} 为分布式电源系统从主网系统购电时的电价; P_{gridt} 为分布式电源系统与主网系统间交互功率 (kW), 购电为正, 售电为负。

分布式电源系统向主网系统售电的收益 (元) 为

$$I_{SE}(P_{gridt}) = \begin{cases} C_{st} P_{gridt} \Delta t & P_{gridt} < 0 \\ 0 & P_{gridt} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, C_{st} 为分布式电源系统向主网系统售电的电价 (元)。

在本文中, 采用罚函数的形式处理目标函数中状态变量的越界情况, 总目标函数表达式如式 (8)。

$$\min E \left[\sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^{N_1} f(P_i^t) + C_{PE}(P_{line}^t) + I_{SE}(P_{line}^t) \right) + \lambda_U \sum U_{node}^c + \lambda_P \sum P_i^c \right]$$

$$U_{node}^c = \begin{cases} \frac{U_{node} - U_{node}^{lim}}{U_{node}^{max} - U_{node}^{min}} & \end{cases} \quad (8)$$

$$P_i^c = \begin{cases} \frac{P_i - P_i^{lim}}{P_i^{max} - P_i^{min}} & \end{cases}$$

其中, λ_U 和 λ_P 分别为节点电压约束和分布式电源有功出力的罚因子。经过分析, 本文取 $\lambda_U=8$ 、 $\lambda_P=4$ 。

$$U_{node}^{lim} = \begin{cases} U_{node}^{max} & U_{node} > U_{node}^{max} \\ U_{node} & U_{node}^{min} \leq U_{node} \leq U_{node}^{max} \\ U_{node}^{min} & U_{node} \leq U_{node}^{min} \end{cases} \quad (9)$$

其中, U_{node}^{lim} 表示主动配电网系统中各节点电压 U_{node} 的上限或下限。

$$P_i^{lim} = \begin{cases} P_i^{max} & P_i > P_i^{max} \\ P_i & P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \\ P_i^{min} & P_i \leq P_i^{min} \end{cases} \quad (10)$$

其中, P_i^{lim} 表示主动配电网系统中分布式电源有功 P_i 的上限或下限。

1.2.2 约束条件

主动配电网能量调度约束条件的选取主要考虑各分布式电源的运行状态限制以及配电网的可靠性要求, 提高供电质量, 促使主动配电网安全、高效、稳定运行。传统配电网中能量调度约束条件中不含

有随机变量,因此等式约束和不等式约束条件都是确定性的。在本文中,考虑到风力发电以及光伏发电输出功率的不确定性,基于机会约束规划方法,利用概率的形式描述约束条件,使得调度方案满足一定的约束条件置信水平,从而更加符合主动配电网的实际运行需求,保证能量调度方案的可行性。具体约束如下:

功率平衡约束

$$P_r \left\{ \sum_{n=1}^{N_1} P_c + P_{wt} + P_{pv} + P_{bat} + P_{inet} = P_{Load} \right\} \geq \beta_1 \quad (11)$$

线路传输约束

$$P_r \left(\left| L_1^t \right| \leq L_{1,max} \right) \geq \beta_2 \quad (12)$$

其中: L_1^t 为 t 时段线路流过的有功功率; $L_{1,max}$ 为线路的最大传输容量。

柴油机发电爬坡约束

柴油发电机在相邻调度时段的有功调整出力值 $P_{c,t}$ 必须在其可调范围内,具体数学表达式为

$$\begin{aligned} -UD_c \leq P_{c,t} - P_{c,t-1} \leq UR_c \\ (c=1, \dots, G; t=1, \dots, T) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, UR_c 、 UD_c 分别表示机组的最大向上爬坡速率和最大向下爬坡速率。

储能单元相关约束^[12]

对于储能单元的约束条件

$$P_{bat}^{\min} \leq P_{bat}^t \leq P_{bat}^{\max} \quad (14)$$

其中, P_{bat}^t 为 t 时刻储能单元的充放电功率。

分布式电源与主网能够允许交互的最大传输功率约束

$$P_r \left(P_{line}^{\min} \leq P_{line}^t \leq P_{line}^{\max} \right) \geq \beta_3 \quad (15)$$

1.2.3 风电与光伏发电单元输出功率的随机模拟技术

主动配电网中风力和光伏发电随着天气条件的变化而变化,其出力是不可控的,需要对这种间歇式可再生能源进行输出功率预测。然而精确的风速以及光照强度很难预测,实际的风力发电机和光伏器件的出力会在预测值的基础上产生波动,对配电网的运行增加不确定性。因此本文在考虑间歇式可再生能源输出功率预测的前提下,利用随机模拟技术处理预测偏差,保证主动配电网运行稳定性^[13]。基于随机模拟技术预测得出风机和光伏电池的输

功率如图 2 所示。

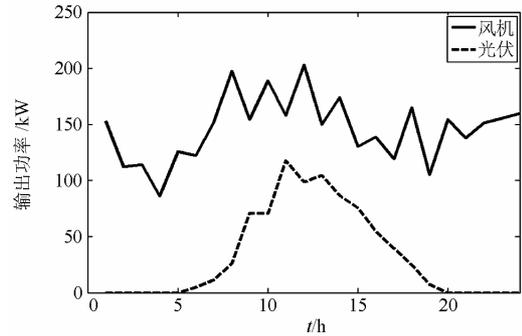


图 2 风机和光伏电站输出功率示意图

Fig. 2 Power of wind turbine and photovoltaic power station

2 主动配电网能量调度模型求解方法

2.1 改进粒子群算法

标准粒子群算法 (PSO) 的基本思想是: 随机初始化一群没有质量和体积的粒子, 将每个粒子看成是待求问题的一个解, 用适应度函数来衡量粒子的优劣, 所有粒子在可行解空间内按一定的速度运动并不断追随当前最优粒子, 经过若干代搜索后得到该问题的最优解^[14]。

上述能量调度模型的求解, 本文主要利用改进的粒子群算法。同时, 针对 PSO 在迭代后期容易陷入局部最优、收敛精度低、易发散等缺点, 本文对标准粒子群算法进行了一些修正和改进。首先利用收缩因子替代传统的惯性权重, 使 PSO 算法速度趋于 0 时, 迫使粒子的速度在一定的约束范围内重新完成搜索, 提高算法跳出局部最优的能力。其次将遗传算法中的选择操作应用到粒子群算法中, 即混合 PSO 算法 (HPSO), 可以提高整体平均适应度值, 有利于算法快速收敛。具体操作如下:

(1) 收缩因子替代惯性权重^[15]

利用收缩因子替代传统的惯性权重, 此时粒子群算法的速度公式为

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} &= \chi \left[v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{id}^t - x_{id}^t) \right] \\ \chi &= \frac{2}{\left| 2 - \varphi + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 \end{aligned} \quad (16)$$

经过测试, 本文中 φ 的取值为 3.6, 此时算得收缩因子的值 $\chi=0.6247$ 。

(2) 粒子群算法与遗传算法的结合

粒子群算法的寻优过程中, 采用混合 PSO 算法 (HPSO), 可以使粒子群能迅速锁定最优解的范围, 提高算法寻找最优解的计算效率。具体改进方法如下: 寻优过程中, 利用适应度函数值比例法对

所有粒子进行选择,即以比例于每个个体适应度函数值的概率来决定后代的遗传概率,保存种群中最好的粒子,将最好的粒子取代最差的粒子,计算每个粒子的选择概率 P_{ci} , 并进行累加,得到 N 个累加概率,通过随机生成选择概率进行选择,得到新种群^[16]。个体的被选中概率计算公式如式 (17)。

$$P_{ci} = 1 - \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

其中: N 为粒子群粒子数目; f_i 为第 i 个粒子的适应度值。

2.2 约束条件验证中的蒙特卡罗模拟技术^[17]

机会约束规划方法中,利用概率的形式描述约束条件,调度方案需要满足一定的约束条件置信水平。蒙特卡罗模拟技术为验证该类型概率形式的约束条件提供了有效的途径,其中,程序具体实现过程如下:

概率形式约束条件如式(18)。

$$P_T \{g_i(x, \xi) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \quad (18)$$

对于任意给定的决策变量 x , 首先设定 $N_1=0$, 然后由概率密度函数生成 N 个随机变量, 如果将生成的随机变量 ζ 和决策变量 x 代入式 (18), 满足不等式 $g(x, \zeta) \leq 0$, 则 N_1 加 1, 当 N 足够大时, 根据大数定理可知, 若式(18)成立, 当且仅当 $N_1/N \geq \alpha$ 成立。如果 $N_1/N \geq \alpha$ 不成立, 则说明通过粒子群算法产生的粒子不符合式(18)水平, 这样的粒子应舍弃, 重新生成新的粒子。

2.3 主动配电网能量调度模型求解流程

采用基于随机模拟的改进粒子群算法求解调度模型步骤如图 3 所示。

3 算例结果与分析

以某地区包含有风电、光伏电站、储能装置和柴油发电机的主动配电网系统为例^[18], 如图 4 所示。其中两台柴油发电机额定容量分别为 50 kW 和 100 kW, 50 kW 柴油机的爬坡速率为 20 kW/h, 100 kW 柴油机的爬坡速率为 30 kW/h。风力发电机的额定输出功率为 300 kW, 光伏电站输出额定功率为 200 kW, 两个储能装置的容量均为 50 kW。设调度周期为 24 h, 并将每个小时划分为一个时段, 共 24 个调度时段, 该地区的典型日负荷曲线如图 5 所示。该日最高负荷为 475 kW, 最低负荷为 324 kW。上级电网交互购/售电电价数据如表 1 中所列^[13]。

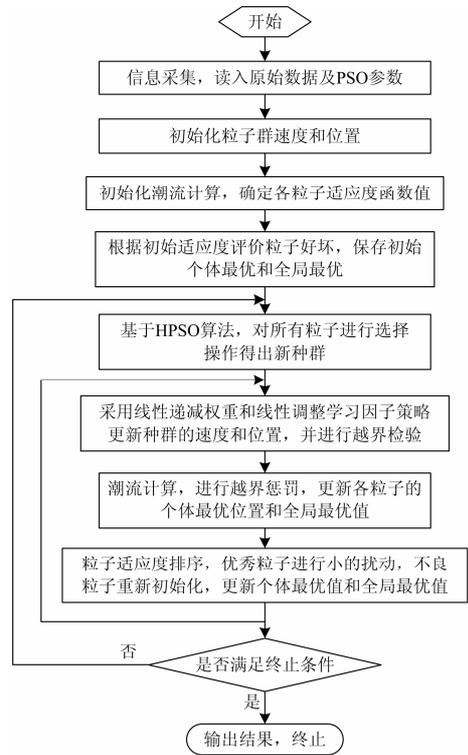


图 3 基于随机模拟的粒子群算法模型求解流程

Fig. 3 Flow chart of the PSO algorithm based random simulation technique

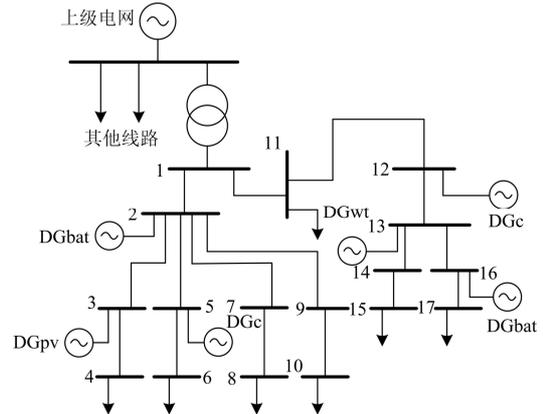


表 1 实时购/售电电价表

Table 1 Real time purchasing / electricity price

时段/ h	实时购电价/ (元/kWh)	实时售电价/ (元/kWh)	时段/ h	实时购电价/ (元/kWh)	实时售电价/ (元/kWh)
1	0.24	0.13	13	0.99	0.49
2	0.18	0.11	14	1.49	0.74
3	0.13	0.06	15	0.99	0.51
4	0.10	0.06	16	0.79	0.49
5	0.03	0.02	17	0.40	0.28
6	0.17	0.20	18	0.36	0.24
7	0.27	0.17	19	0.36	0.13
8	0.39	0.11	20	0.41	0.10
9	0.52	0.22	21	0.44	0.15
10	0.53	0.30	22	0.35	0.15
11	0.81	0.44	23	0.30	0.17
12	1.00	0.58	24	0.23	0.13

本文用 Matlab 编程求解上述主动配电网能量调度模型,改进的粒子群算法参数设置为:种群规模为 200,最大迭代次数为 100,收缩因子按上文中式(16)设定,蒙特卡罗模拟的次数取 $N=1000$ 。具体求解结果如图 6、图 7 所示。

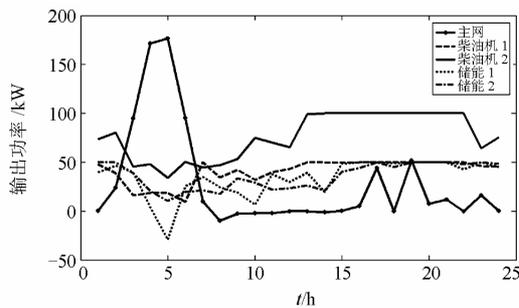


图 6 各可调单元的实时出力曲线
Fig. 6 Real-time output curve of DGs

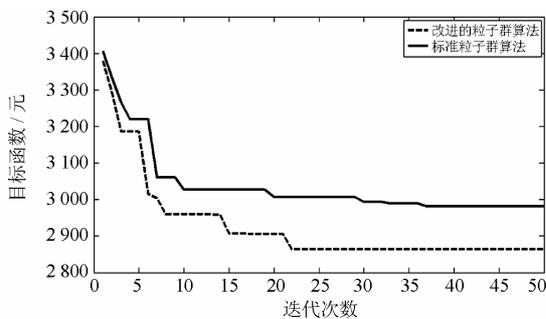


图 7 本文算法与标准粒子群算法迭代次数比较
Fig. 7 Evolutionary generation comparison of two methods

分析图 6 中各调度单元输出功率值曲线可以看出,主动配电网整个调度时段中,22-12 时段风力发电机和光伏电站的输出功率无法满足实时电网负荷需求,需要增加柴油发电机出力 and 上级电网输送功率来弥补功率差额,保证配电网功率供需平衡。此时上级电网的输送电量与柴油发电机之间形成一种博弈关系,主要考虑在满足各种配电网约束条件的前提下实时售/购电价格与柴油发电机发电成本之间的价格比较,确定优先调度权。在 13-21 时段负荷需求急剧增加,此时柴油发电机以最大功率输出,上级电网输送电量与实时负荷曲线呈正比例关系。同时通过储能装置电荷状态可以看出,在主动配电网运行中储能装置发挥着削峰填谷和功率跟踪的作用,保证了配电网的安全可靠运行。从图 7 可知,标准的粒子群算法计算主动配电网的运行总成本为 2 981 元,算法迭代次数为 37 次,而使用本文所提出的改进粒子群算法求得运行总成本为 2 763 元,迭代次数为 22 次,因此该算法极大地提高了最优调度方案的搜索能力,实现了配电网的经济效益最大化。

本文中将功率平衡约束条件置信水平 β_1 、线路传输约束条件置信水平 β_2 、主网允许交互的最大传输功率约束条件置信水平 β_3 均设定为 0.95。然而上述基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度模型约束条件置信水平的选取会对调度决策方案产生影响。较小的置信水平能够提高主动配电网运行稳定性,但是会降低配电网的经济性,而较大的置信水平能够尽可能地减少主动配电网运行成本,但是伴随着电网的高风险运行。表 2 中列出了不同置信水平下主动配电网能量优化调度数学模型目标函数的变化值。在不同运行要求下可以参照表 2 中计算结果设定模型置信水平,寻求主动配电网最佳优化调度决策方案。

4 结论

本文将随机规划理论应用到主动配电网能量调度系统中,解决了由于间歇式可再生能源接入配电网中所带来的不确定性影响。利用随机模拟技术预测风电与光伏发电单元输出功率,建立了基于机会约束规划的能量调度模型,采用改进的粒子群算法进行求解。以某地区实际系统为例,验证了该模型和求解方法能够有效地实现对主动配电网的能量优化调度,并分析讨论了不同约束条件置信水平对调度方案产生的影响,为各种运行标准下调度模型的确定提供参照。

表 2 该系统不同置信水平下运行成本

Table 2 Operating cost in different confidence levels

β_1	β_2	β_3	成本/元	β_1	β_2	β_3	成本/元	β_1	β_2	β_3	成本/元
90%	90%	90%	2 658	95%	90%	90%	2 675	100%	90%	90%	2 713
90%	90%	95%	2 687	95%	90%	95%	2 708	100%	90%	95%	2 758
90%	90%	100%	2 740	95%	90%	100%	2 747	100%	90%	100%	2 796
90%	95%	90%	2 678	95%	95%	90%	2 732	100%	95%	90%	2 783
90%	95%	95%	2 697	95%	95%	95%	2 763	100%	95%	95%	2 826
90%	95%	100%	2 735	95%	95%	100%	2 789	100%	95%	100%	2 849
90%	100%	90%	2 696	95%	100%	90%	2 773	100%	100%	90%	2 854
90%	100%	95%	2 745	95%	100%	95%	2 806	100%	100%	95%	2 872
90%	100%	100%	2 786	95%	100%	100%	2 834	100%	100%	100%	2 885

参考文献

- [1] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [2] PILO F, PISANO G, SOMA G. Advanced DMS to manage active distribution networks[C] // 2009 IEEE Bucharest Power Tech, Bucharest, Romania, June 28-July 2, 2009.
- [3] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Ming-tian, ZHANG Zu-ping, SU Ao-xue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 23(22): 12-18.
- [4] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 197-201.
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 197-201.
- [5] 牛焕娜, 杨明皓, 井天军, 等. 农村主动型配电网优化调度线性模型与算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 190-197.
NIU Huan-na, YANG Ming-hao, JING Tian-jun, et al. Linear optimal operation model and algorithm for active distribution network in rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 190-197.
- [6] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wen-peng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [7] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M. A reliability framework for generating unit commitment[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 56(1): 81-88.
- [8] 雷宇, 杨明, 韩学山, 等. 基于场景分析的含风电系统机组组合的两阶段随机优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 59-67.
LEI Yu, YANG Ming, HAN Xue-shan, et al. A two-stage stochastic optimization of unit commitment considering wind power based on scenario analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 59-67.
- [9] RUIZ PABLO A, PHILBRICK C, ZAK EUGENE, et al. Uncertainty management in the unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 642-651.
- [10] 周念成, 邓浩, 王强钢, 等. 光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 74-84.
ZHOU Nian-cheng, DENG Hao, WANG Qiang-gang, et al. Energy management strategy of PV and micro-turbine hybrid micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 74-84.
- [11] 孔立志, 唐西胜, 齐智平, 等. 光柴储微网系统的储能动态能量调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制,

- 2012, 40(20): 6-12.
KONG Ling-zhi, TANG Xi-sheng, QI Zhi-ping, et al. Study on dynamic energy dispatch strategy of energy storage in PV-diesel-energy storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 6-12.
- [12] LIU Xiao-ping, DING Ming-han, JIANG Hong, et al. Dynamic economic dispatch for micro grids including battery energy storage[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, IEEE PES, 2010: 914-917.
- [13] 刘小平, 丁明, 张颖缘. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-83.
LIU Xiao-ping, DING Ming, ZHANG Ying-yuan. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-83.
- [14] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 26-30.
LU Jin-ling, MIAO Yu-yang, ZHANG Cheng-xiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 26-30.
- [15] CLERC M. The swarm and the queen towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C] // Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, 1999: 1951-1957.
- [16] 张炯, 刘天琪, 苏鹏, 等. 基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 25-29.
ZHANG Jiong, LIU Tian-qi, SU Peng, et al. Unit commitment optimization based on genetic algorithm and particle swarm optimization hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 25-29.
- [17] 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 Yue-wen, CHEN Chong, WEN Bu-ying. 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.
- [18] 苏辛一, 何光宇, 张雪敏, 等. 配电网无功优化逐层筛选寻优算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 40-44.
SU Xin-yi, HE Guang-yu, ZHANG Xue-min, et al. A hierarchical screening algorithm for reactive power optimization in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 40-44.

收稿日期: 2013-09-14; 修回日期: 2013-12-11

作者简介:

王健(1989-), 男, 硕士研究生, 从事主动配电网能量调度方向的研究; E-mail: rencaiwj@gmail.com

谢桦(1970-), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统与新能源方向的研究;

孙健(1981-), 男, 博士, 工程师, 从事电力系统控制与仿真方向的研究。