

主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型

曾 鸣¹, 彭丽霖¹, 王丽华², 李源非², 程 敏³, 孙辰军⁴

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206;
3. 国网安徽省电力公司安庆供电公司, 安徽 安庆 246000; 4. 国网河北省电力公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 主动配电网下分布式能源系统的调度优化是实现经济及安全运行的重要保障,也是提高分布式能源有效利用率的重要途径,构建主动配电网双层能量管理下的双阶段调度优化模型及其求解算法。在负荷预测及间歇式能源出力预测的基础上,构建分布式能源系统的日前和实时两阶段调度优化模型。为求解上述模型,在传统帝国竞争算法(ICA)的基础上引入微分进化因子(DE),建立基于微分进化改进的帝国竞争优化算法(DE-ICA)。将所提模型应用于改造后的 IEEE 33 节点调度优化问题,仿真结果表明,双层双阶段调度优化能够有效地提高分布式能源利用率,降低系统运行费用,且验证了所提算法在求解此类优化问题时的有效性和优越性。

关键词: 分布式能源系统; 主动配电网; 双阶段调度优化; 帝国竞争算法; 差分改进; 分布式发电

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.016

0 引言

有效推进能源革命是面对能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势,保障国家能源安全的重要基础和根本方向。能源互联网作为具有开放、互联、共享、对等特征的新型能源利用体系将颠覆传统能源供需模式,形成能源新常态,对于推动能源革命进程具有重要意义^[1-2]。作为能源互联网的重要能量自治单元之一,分布式能源系统 DES(Distributed Energy System)可利用多种能源,如清洁能源(天然气)、新能源(氢)和可再生能源(风能和太阳能等),并同时为用户提供冷、热、电等多种能源应用方式,因此是解决能源危机、能源安全问题,提高能源利用效率的有效途径。从全世界来看,能源利用率越高、环境保护越好的国家,对于发展分布式能源技术的推广应用就越热衷,支持政策越明确。目前,我国分布式能源系统的发展仍处于起步阶段,在全球能源快速转型和电力体制改革不断推进的背景下,我国有必要加快分布式能源的推广应用,实现能源体系的高效清洁发展。分布式能源的逐渐接入,对传统配电网规划和运行提出了新的挑战和要求。为了适应这种转变,传统的无源配电网必须向具备潮流主动控制能力和

与负荷互动能力的主动配电网 ADN(Active Distribution Network)转变^[3-4]。主动配电网是一种可以优化利用分布式能源资源的技术解决方案^[5-6],能够消除分布式能源对配电网的影响,实现分布式能源的高效率利用。因此研究主动配电网下的分布式能源系统的调度优化成为当前热点问题之一。

目前,国内外学者已从多个角度对该主题进行了相关探讨,并获得一些初步成果。文献[7]针对分布式电源 DG(Distributed Generation)带来的不确定性问题,提出对风电、光伏、热电联产发电机、燃料电池等多种小容量小规模分布式电源的主动管理方法;文献[8]提出一种主动配电网规划-运行联合优化模型,综合分析了线路建设、可调度分布式电源和储能系统 ESS(Energy Storage System)的选址定容规划方案及相应的配合运行策略;文献[9]在评估主动配电网的分布式电源接入方案时,计及分布式电源的发电效益成本以及其对电网运行影响的基础上,考虑了分布式电源的减排指标,构建了主动配电网低碳优化目标函数模型;文献[10]提出了主动配电网的分层能量管理与协调控制体系;文献[11]研究分析了主动配电网的网架规划模型,包括主动配电网对分布式能源的消纳模式、主动配电网潮流流向、主动配电网储能配置及主动配电网经济优化函数;文献[12]围绕分布式电源及微电网在不同渗透率下对输配电网网损影响、正常运行时主动配电网对分布式电源和微电网的日前优化调度方法、配电网故障隔离后利用分布式电源和微电网进行恢复供电的计划孤岛划分调度模型等问题进行了深入研究;文献[13]提出了一种考虑主动配电网特性以及分布式能源特性的优化调度模型;文献[14]以电力

收稿日期:2016-02-28;修回日期:2016-04-23

基金项目:国家软科学研究计划项目(2012GXS4B064);国家自然科学基金资助项目(71271082);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XS37);国家电网公司总部科技项目资助(大气污染防治对京津冀电力供需的影响研究)

Project supported by the National Soft Science Research Plan of China(2012GXS4B064),the National Natural Science Foundation of China(71271082),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015XS37) and the Science and Technology Project of SGCC(Research on the Effects of Air Pollution Prevention and Control on the Power Supply and Demand of Beijing-Tianjin-Hebei Region)

公司效益最大为调度目标,针对主动型配电网调度问题,计及输电和高压配电网网损的影响,提出了一种配电网日前优化调度模型;文献[15]对影响主动配电网日前调度计划的关键因素进行了研究,构建了主动配电网分区管理模型;文献[16]提出了基于情景分析的主动配电网规划方法;文献[17]提出主动配电网优化调度的控制变量不仅包括可控分布式发电单元,例如燃料电池以及柴油发电机等,还包括兼具充放电特性的储能系统。

上述研究成果为后续工作奠定了基础,但目前鲜有文献针对主动配电网分层能量管理下的双阶段优化调度进行有效研究。因此,本文构建主动配电网双层能量管理下的双阶段调度优化模型及其求解算法。首先,本文以负荷预测以及间歇式能源出力预测数据为基础,建立主动配电网下的分布式能源系统日前和实时两阶段调度优化模型;然后,为能够求解所提出的多目标、非线性优化问题,本文通过引入微分进化策略对普通帝国竞争算法 ICA (Imperialist Competitive Algorithm) 进行改进,构建基于微分改进的帝国竞争算法 DE-ICA (Differential Evolution & Imperialist Competitive Algorithm) 优化调度求解模型;最后,本文将所提出的模型及求解算法应用于改造后的 IEEE 33 节点仿真系统,通过仿真结果对所提模型进行有效验证。

1 分布式能源系统两阶段调度优化模型

主动配电网下分布式能源系统双层双阶段优化调度就是在主动配电网分层能量管理的基础上,通过电网信息交互和有效传递,分别从日前和实时 2 个阶段出发,针对全局调度和局部区域调度进行全面协调控制,进而达到分布式能源高效利用的目的,其

框架如图 1 所示。一方面,在日前调度优化中,主动配电网以负荷预测以及区域传递信息数据为基础,通过全局优化算法求解出全局区域优化调度控制策略,实现对日前全局信息和实时有效信息的汇集、分配与控制;另一方面,在实时调度中,主要针对当前分布式能源机组的运行状态,对全局调度控制和区域调度情况进行相应的调整,使得分布式能源能够被最大化地消纳和利用。

1.1 日前调度优化模型

主动配电网下分布式能源系统调度优化的目的是在确保电网可靠运行和可再生能源最大化利用的前提下,以负荷预测以及间歇式发电出力预测数据为基础,采用最优化算法对主动配电网下的分布式能源(包括分布式电源、储能等)进行统筹协调,确保系统总体运行成本最低,从而实现对分布式能源在周期内的出力情况进行优化调度。在目前电力市场环境条件下,主动配电网下的分布式能源系统日前调度优化的成本主要包括分布式能源发电成本、向主网购电成本、网损成本以及储能成本等。因此,主动配电网下的分布式能源系统的前日调度目标函数可以表示为:

$$\min Z_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^f c_i(t) P_{\text{grid}}^i(t) \Delta t + \sum_{j=1}^n c_j(t) P_{\text{DG}}^j(t) \Delta t \right] + \cdots + \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^m (c_c(t) - c_d(t)) P_{\text{ESS}}^k(t) \Delta t + \sum_{i=1}^f c_i(t) \Delta P_{\text{grid}}^i(t) \right] \quad (1)$$

其中, $c_i(t)$ 为第 i 条线路在 t 时刻的电价; $c_j(t)$ 为第 j 台分布式发电单元在 t 时刻的单位运行成本; $c_c(t)$ 和 $c_d(t)$ 分别为储能设备在 t 时刻的充、放电成本,当设备处于充电状态时, $c_d(t)$ 的值为 0,当设备处于放电状态时, $c_c(t)$ 的值为 0; f 为全部区域内馈线数量; n 为

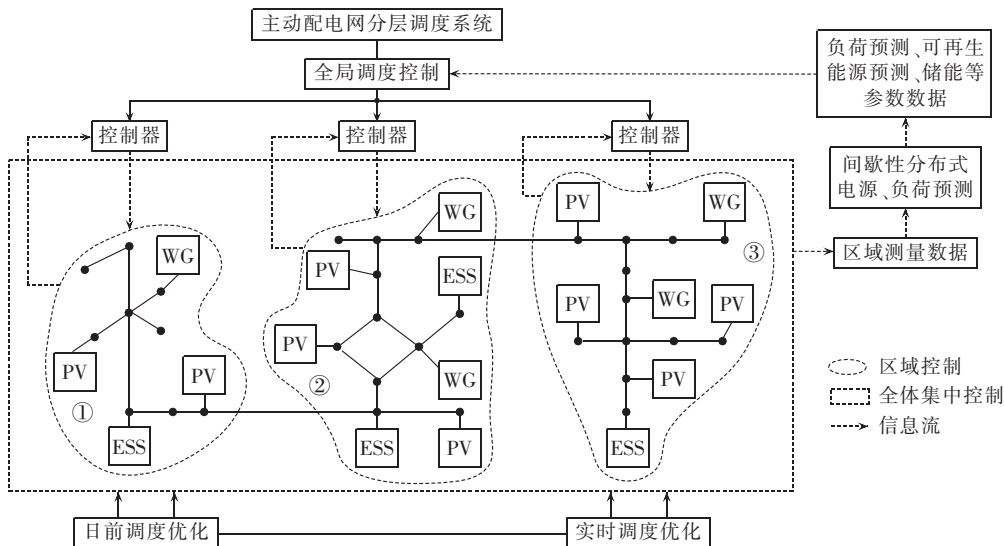


图 1 主动配电网分层调度系统

Fig.1 Hierarchical dispatch system for active distribution network

可控分布式发电单元数量; m 为全部储能设备数量; $P_{\text{grid}}^i(t)$ 为第 i 条线路在 t 时刻的出口功率值; $P_{\text{DG}}^j(t)$ 为第 j 台分布式发电单元在 t 时刻的功率值; $P_{\text{ESS}}^k(t)$ 为第 k 台储能设备在 t 时刻的充电或放电功率值; $\Delta P_{\text{grid}}^i(t)$ 为 t 时刻的网损值, 一般可由式(2)求得。

$$\Delta P_{\text{grid}}^i(t) = \frac{\lambda_z(t)}{\lambda_z(t)-1} P_{\text{grid}}^i(t) \quad (2)$$

其中, $\lambda_z(t)$ 为 t 时刻节点 z 的综合网损值, kW。

如式(1)所示, 该目标函数充分考虑了分布式能源以及储能设备合理调度带来的全部成本最小化。当分布式能源的发电利用率较高时, 电网输送电能较小, 此时说明分布式发电的成本应当小于电网的输电成本; 当分布式能源成本高于电网成本时, 此时可以购买大量的主网电量来满足当前负荷, 另外还可以为储能单元进行充电, 从而降低购电成本。

在求解上述目标函数的过程中, 全部变量和状态变量必须满足一定的约束条件, 本文求解模型的约束条件表示如下:

$$P_{\text{grid}}^i(t) + P_{\text{DG}}^j(t) + P_{\text{ESS}}^k(t) + \Delta P_{\text{grid}}^i(t) - \tilde{P}(t) = e_z(t) \sum_{\tau \in N_n} [G_{z\tau} e_{\tau}(t) - B_{z\tau} f_{\tau}(t)] + f_z(t) \sum_{\tau \in N_n} [G_{z\tau} f_{\tau}(t) + B_{z\tau} e_{\tau}(t)] \quad (3)$$

$$Q_{\text{grid}}^i(t) + Q_{\text{DG}}^j(t) + Q_{\text{ESS}}^k(t) + \Delta Q_{\text{grid}}^i(t) - \tilde{Q}(t) = f_i(t) \sum_{\tau \in N_n} [G_{i\tau} e_{\tau}(t) - B_{i\tau} f_{\tau}(t)] - e_i(t) \sum_{\tau \in N_n} [G_{i\tau} f_{\tau}(t) + B_{i\tau} e_{\tau}(t)] \quad (4)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid}, \max}(t) \\ U_z^{\min} \leq U_z \leq U_z^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{\text{DG}}^{\min}(t) \leq P_{\text{DG}}(t) \leq P_{\text{DG}}^{\max}(t) \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{\text{ESS}}^{\min}(t) \leq P_{\text{ESS}}(t) \leq P_{\text{ESS}}^{\max}(t) \\ 0 \leq P_{\text{ESS}}^{\text{C}}(t) \leq P_{\text{ESS}, \max}^{\text{C}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{ESS}}^{\text{D}}(t) \leq P_{\text{ESS}, \max}^{\text{D}}(t) \\ \sum_{k=1}^m (u_k^{\text{C}}(t) - u_k^{\text{C}}(t-1)) \leq \eta_1 \\ \sum_{k=1}^m (u_k^{\text{D}}(t) - u_k^{\text{D}}(t-1)) \leq \eta_2 \\ E_{\text{ESS}}(0) = E_{\text{ESS}}(N_t) \end{cases} \quad (7)$$

其中, N_B 为节点集合; $e_z(t)$ 和 $f_z(t)$ 分别为节点 z 在 t 时刻电压的实部和虚部; $G_{z\tau}$ 和 $B_{z\tau}$ 分别为节点 z 和 τ 之间的互电导和电纳; $\tilde{P}(t)$ 为系统在 t 时刻总输出有功功率; Q 为无功功率; $P_{\text{grid}, \max}(t)$ 为主网在 t 时刻最大输出功率; $U_z^{\min}$ 和 $U_z^{\max}$ 分别为节点 z 最大电压和最小电压; $P_{\text{DG}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\text{DG}}^{\max}(t)$ 分别为分布式电源在 t 时刻最小和最大输出功率; $P_{\text{ESS}, \max}^{\text{C}}(t)$ 、 $P_{\text{ESS}, \max}^{\text{D}}(t)$ 分别为储能设备在 t 时刻最大充电、放电功率; $P_{\text{ESS}}^{\min}(t)$ 、 $P_{\text{ESS}}^{\max}(t)$ 为 t 时刻储能功率的最小值和最大值; $E_{\text{ESS}}(0)$ 为调度初始时刻的电池储能值; N_t 为实时调度时刻; $E_{\text{ESS}}(N_t)$

为调度结束时刻的电池储能值; $u_k^{\text{C}}(t)$ 、 $u_k^{\text{D}}(t)$ 分别为电池 k 在 t 时刻的充电、放电状态; η_1 、 η_2 分别为电池在调度周期内的最大充电、放电次数。

式(3)、式(4)为系统功率平衡约束, 式(5)为主网输出功率约束, 式(6)为分布式电源输出功率约束, 式(7)为储能设备约束条件。

1.2 实时调度优化模型

实时调度就是在日前调度的基础上, 根据当前时段分布式能源机组的运行状态以及储能的充放电情况, 结合超短期负荷预测, 对当前各个分布式能源机组运行状态做出及时调整, 使得整个配电网区域提高分布式能源有效利用率, 降低系统负荷, 减少运行费用, 从而保证系统安全、稳定地运行。实时调度优化目标主要有 2 个方面: 一是根据分布式能源机组运行情况, 对当前机组出力情况进行修正; 二是根据当前储能蓄能状态, 对当前时段内储能的出力情况进行调整。

(1) 分布式能源机组运行修正模型。

以分布式能源运行成本最小为目标, 调整或修正当前阶段已运行的分布式电源的出力(包括可控式和间歇性分布式发电), 其目标函数为:

$$\min Z'_{\text{DG}} = \sum_{i=1}^T \left[\sum_{i=1}^n P'_{\text{DG}, i}(t) c_i(t) + \sum_{j=1}^{\tilde{m}} P'_{\text{S}, j}(t) c_{\text{S}}(t) + \sum_{k=1}^q P'_{\text{W}, k}(t) c_{\text{W}}(t) \right] \quad (8)$$

其中, $P'_{\text{DG}, i}(t)$ 为修正后的可控式分布式能源的出力; $P'_{\text{S}, j}(t)$ 为修正后的光伏发电出力; $P'_{\text{W}, k}(t)$ 为修正后的风机机组出力; n 、 $\tilde{m}$ 、 q 为各机组总个数。

(2) 储能系统出力修正。

根据当前阶段储能设备的运行状态来决定储能出力情况, 从而对其进行修正; 以储能出力波动成本最小为目标函数:

$$\min Z'_{\text{ESS}} = \left| \sum_{k=1}^m (c_c(t) - c_d(t)) P_k(t) \Delta T - \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{k=1}^m (c'_c(t) - c'_d(t)) P'_k(t) \Delta t \right| \quad (9)$$

其中, $\sum_{k=1}^m (c_c(t) - c_d(t)) P_k(t) \Delta T$ 为 T 时刻日前调度储能运行总成本; $\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{k=1}^m (c'_c(t) - c'_d(t)) P'_k(t) \Delta t$ 为修正后实时调度储能调度运行总成本; $P_k(t)$ 和 $P'_k(t)$ 分别为修正前和修正后储能出力; $c_c(t)$ 和 $c'_c(t)$ 分别为日前阶段和实时阶段充电成本; $c_d(t)$ 和 $c'_d(t)$ 分别为日前阶段和实时阶段放电成本; N_t 为实时调度时刻。

经过修正后的分布式能源(间歇和可控)和储能需满足下列约束条件。

a. 修正后储能设备约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{k, \text{discharge}}(t) \leq P_{\text{discharge}, \text{max}} \\ 0 \leq P'_{k, \text{charge}}(t) \leq P_{\text{charge}, \text{max}} \\ P_{k, \text{min}}(t) \leq P'_k(t) \leq P_{k, \text{max}}(t) \end{cases} \quad (10)$$

b. 修正后分布式电源约束条件:

$$P_{\text{DG}, \text{min}} \leq P'_{\text{DG}, i}(t) \leq P_{\text{DG}, \text{max}} \quad (11)$$

$$P_{\text{S}, \text{min}} \leq P'_{\text{S}, i}(t) \leq P_{\text{S}, \text{max}} \quad (12)$$

$$P_{\text{W}, \text{min}} \leq P'_{\text{W}, i}(t) \leq P_{\text{W}, \text{max}} \quad (13)$$

c. 系统总负荷平衡约束:

$$P_{\text{grid}}^i(t) + P'_{\text{DG}}(t) + P'_{\text{S}}(t) + P'_{\text{W}}(t) + P'_{\text{ESS}} - \tilde{P}(t) = 0 \quad (14)$$

实时阶段的其他约束条件仍需要满足日前阶段的相关约束条件。

2 差分改进帝国竞争算法

2.1 DE-ICA

ICA 是 Atashpaz-Gargari 和 Lucas 于 2007 年提出的一种基于帝国主义殖民竞争机制的进化算法,属于社会启发的随机优化搜索方法。ICA 具有良好的全局收敛性能,能同时得到多个全局最优解^[18]。在传统的 ICA 中,帝国竞争操作体现了帝国之间的信息交互,然而,帝国竞争在每一次迭代中只是将最弱的殖民地归于最强的帝国,该过程对每个帝国的势力大小影响很小,需要多次迭代才能体现出来,帝国之间缺乏更有效的信息交互,可能导致早熟^[19]。因此,本文借鉴了微分进化思想^[20-21],引入了一种微分进化算子,对 ICA 进行微分改进,构建 DE-ICA 模型。

在同化操作和竞争操作之间,添加以下操作。

a. 每一个殖民地以 M_R 的概率根据式(15)进行微分变异:

$$C = C_{\text{olr}_3} + F(C_{\text{olr}_1} - C_{\text{olr}_2}) \quad (15)$$

其中, $C_{\text{olr}_1}, C_{\text{olr}_2}, C_{\text{olr}_3}$ 为随机选择的 3 个殖民地; $F \in [0, 2]$ 为变异因子。

b. 对每一维度根据式(16)进行微分交叉:

$$D_i = \begin{cases} C_i & \text{rand} < C_R \\ C_{\text{oli}} & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $C_R \in [0, 1]$ 为交叉因子; rand 为 $[0, 1]$ 间随机数。

c. 选择采用贪婪策略,当新产生的殖民地 D 的势力大于原来殖民地的势力时,即 $f(D) < f(C_{\text{ol}})$,则更新殖民地的位置。

2.2 DE-ICA 模型在双阶段调度中的应用

将 DE-ICA 优化模型应用于分布式能源系统双阶段优化调度问题中,其求解的一般过程如下。

a. 初始化 DE-ICA 的参数。初始化国家数量 N_{pop} 、帝国数量 N_{imp} 、同化系数 β 、偏移方向 γ 和殖民影响系数 ξ 。

b. 控制变量编码。假设主动配电网中,分布式电源的数量为 n ,则分布式电源出力编码可以表示为:

$$P_{\text{DG}} = \begin{bmatrix} P_{1,1}^{\text{DG}} & P_{1,2}^{\text{DG}} & \cdots & P_{1,M}^{\text{DG}} \\ P_{2,1}^{\text{DG}} & P_{2,2}^{\text{DG}} & \cdots & P_{2,M}^{\text{DG}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n,1}^{\text{DG}} & P_{n,2}^{\text{DG}} & \cdots & P_{n,M}^{\text{DG}} \end{bmatrix} = [P_{n,M}^{\text{DG}}]_t \quad (17)$$

其中, $[P_{i,j}^{\text{DG}}]_t$ 表示在 t 时刻区域 j 内的分布式电源 i 的控制功率($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, M$)。同理,储能设备出力编码可以表示为 $P_{\text{ESS}} = [P_{k,M}^{\text{ESS}}]_t$ (k 为储能设备数量),主网出力编码可以表示为 $P_{\text{grid}} = [P_{N_1,M}^{\text{grid}}]_t$ (N_1 为馈线数量)。因此,全部控制变量可以形成的 N 个国家个体为 $Y = [P_{\text{DG}}, P_{\text{ESS}}, P_{\text{grid}}]_{N \times O}$ 。

c. 采用 DE-ICA 模型进行目标函数求解,并得出最终优化结果。优化过程如图 2 所示。

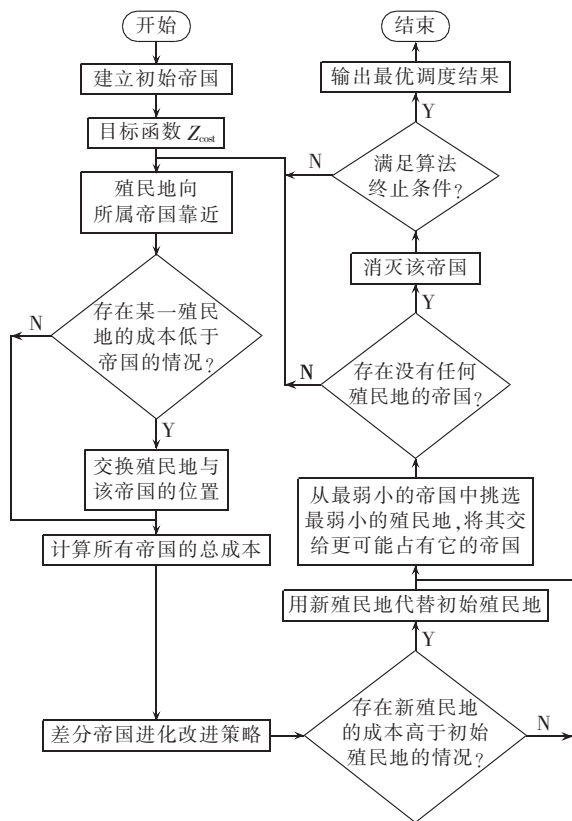


图 2 DE-ICA 模型流程图

Fig.2 Flowchart of DE-ICA model

3 算例仿真

3.1 算例描述

为验证上述主动配电网下分布式能源系统调度模型在优化电网运行和调度中的有效性,本文对标准 IEEE 33 节点系统进行了相应的调整和改造,调整后的算例系统如图 3 所示。本文在改造的 IEEE 33 节点系统中,对负荷较大的节点添加了分布式电源和储能。从图中可以看出,系统中包含的分布式发电单元和储能单元总个数为 19 个,各发电单元类型及配置参数如表 1 所示。

假设该算例中,全天调度期内的电力公司售电

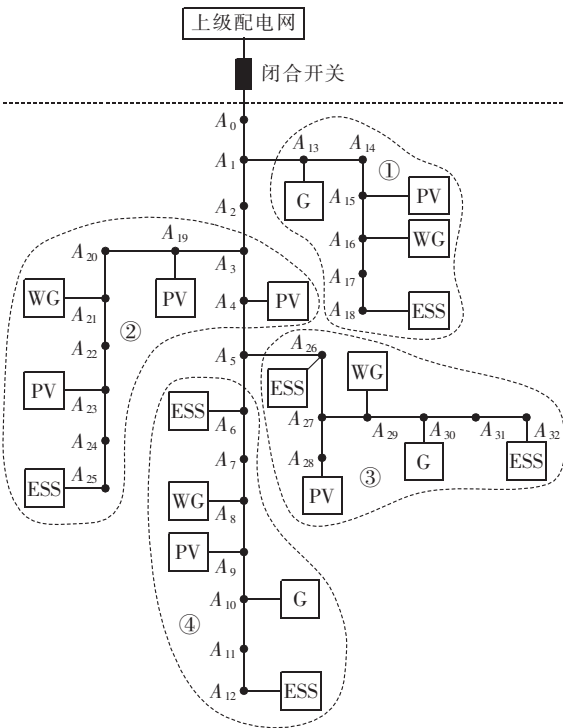


图 3 IEEE 33 节点系统及分布式能源单元结构图

Fig.3 Structure of IEEE 33-bus system with distributed energy units

表 1 分布式能源单元配置参数

Table 1 Configuration parameters of distributed energy units

序号	连接节点	类型	额定容量
1	A ₄	光伏	300 kW
2	A ₆	储能	250 kW·h
3	A ₈	风力	500 kW
4	A ₉	光伏	300 kW
5	A ₁₀	燃气	500 kW
6	A ₁₂	储能	250 kW·h
7	A ₁₃	燃气	500 kW
8	A ₁₅	光伏	250 kW
9	A ₁₆	风力	300 kW
10	A ₁₈	储能	250 kW·h
11	A ₁₉	光伏	250 kW
12	A ₂₁	风力	300 kW
13	A ₂₃	光伏	300 kW
14	A ₂₅	储能	500 kW·h
15	A ₂₆	储能	500 kW·h
16	A ₂₈	光伏	250 kW
17	A ₂₉	风力	300 kW
18	A ₃₀	燃气	500 kW
19	A ₃₂	储能	500 kW·h

价格分别为：峰时电价为 0.55 元/(kW·h)，平时电价为 0.488 元/(kW·h)，谷时电价为 0.33 元/(kW·h)，全天 24 h 电价曲线见图 4，可以看出，在电价峰时段，通过高电价的设定可以尽可能多地利用分布式电源的出力来减少对主网出力的依赖；在谷时段，可以利用主网出力对储能容量进行补偿。假设燃气轮机发电成本为 0.5 元/(kW·h)。该系统全天负荷值

以及间歇性能源全天的功率预测值见图 5。

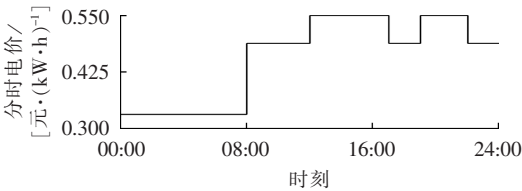


图 4 全天 24 h 电价曲线

Fig.4 Daily electricity price curve (24 h)

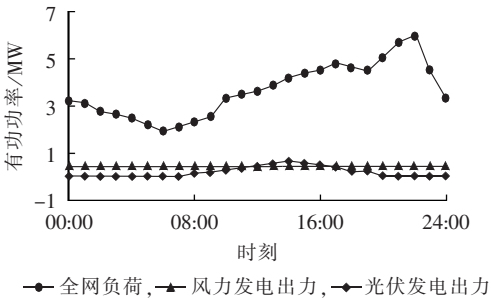


图 5 负荷预测值

Fig.5 Load forecasts

算法参数设定如下：最大迭代次数 $N_{\max \text{gen}}=200$ ，国家数量 $N_{\text{pop}}=100$ ，帝国数量 $N_{\text{imp}}=5$ ，同化系数 $\beta=2$ ，偏移方向 $\gamma=\pi/4$ ，殖民影响系数 $\xi=0.1$ ，变异因子 $F=0.6$ ，交叉因子 $C_R=0.9$ 。

采用 MATLAB_r2014a 进行编程计算，测试平台环境为 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU, 3 GB RAM 和 Windows 7 专业版系统；运行自编程序，分别求解日前调度目标函数和实时调度目标函数，对所得结果进行讨论和分析。

3.2 日前调度结果

图 6 为系统全局日前调度结果。从图中可以看出，系统各时刻负荷的加总值为 91.23 MW，间歇性分布式能源出力为 14.95 MW，燃气轮机总出力为 21.34 MW，主网总出力为 54.8 MW，储能总出力为 2.2 MW。系统优化调度后的运行费用为 47 083.64 元，较之未采用优化调度时的运行费用 48 243.21 元，经济效益直接提升了 2.4%；通过优化调度，分布式能源利用率提高了 1.53%。从图中可以看出，储能电池的主要出力时间发生在 00:00—08:00，储能设备处于充电阶段，此时电网负荷处于低谷阶段，可以充分利用主网电力为储能设备提供功率支持，从而降低了充电成本。燃气轮机出力从 06:00 开始至 23:00 结束，全阶段出力基本平稳，说明在峰时段能较好地起到削峰的作用，降低峰时阶段的购电成本，而在谷时段基本处于停机状态。13:00 时，系统中分布式能源出力达到最大值 2.490 4 MW，此时正好为峰时段，各发电单元的调度出力情况最大化地帮助了分布式能源的消纳，有效地降低了系统运行成本。

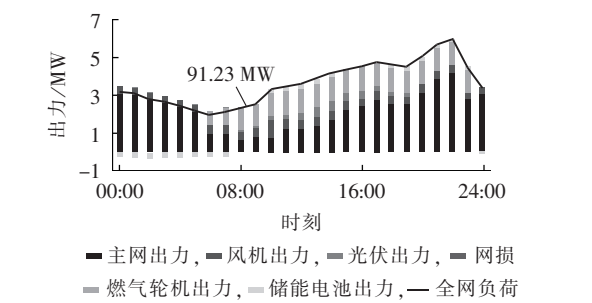


图 6 系统全局日前调度结果

Fig.6 Results of system-wide day-ahead dispatch

3.3 实时调度结果

图 7 为 DE-ICA 计算得出的系统实时调度结果。根据当前机组运行情况,结合实时调度目标函数,通过预测得出当前系统各时刻负荷的加总值为 90.646 MW,与日前调度结果 91.23 MW 相比,系统负荷降低了 0.584 MW,并且从整体来看,实时调度结果明显降低了全天调度的峰谷差,系统负荷曲线更加平滑。另外,间歇性分布式能源出力为 15.55 MW,与日前调度结果的 14.95 MW 相比,间歇式分布式能源利用率提高了 3.98%;燃气轮机出力 21.51 MW,与日前调度结果的 21.34 MW 相比,燃气轮机出力提高了 0.8%;储能电池出力 2.491 MW,与日前调度结果的 2.205 MW 相比,储能电池出力上升 12.97%;主网全天出力 53.50 MW,与日前调度结果的 54.85 MW 相比,主网出力降低了 2.46%。从图中可看出,在电价峰时段,分布式能源的利用率得到了很大提升,其中储能设备的有效利用率提升最大,并能保证在谷时段进行有效充电,峰时段参与系统削峰作用;在谷时段,风电、光伏出力的增加很大程度上降低了主网出力,从而减少了电网购电成本。系统实时调度成本为 45876.25 元,与日前调度运行成本 47083.64 元相比,直接经济效益提高了 2.56%。从上述结果可得出,系统日前优化调度能得到次日系统运行策略,实时优化调度能根据当前机组运行情况进一步合理安排分布式能源出力,能有效提高分布式能源利用率,降低系统运行成本,提高经济效益。

为能够充分分析实时优化调度结果,本文分别选取区域 1 在谷时段、平时段和峰时段的 03:00、09:00 和 21:00 时刻的实时调度结果进行分析讨论,如表 2

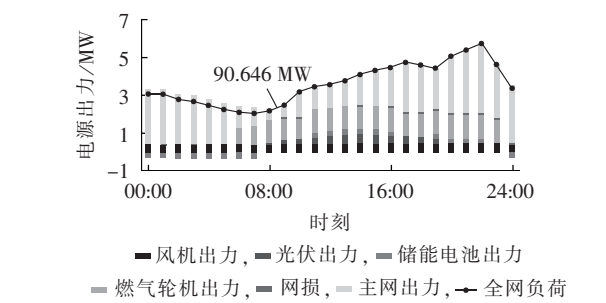


图 7 系统实时优化调度结果

Fig.7 Results of system-wide real-time dispatch

所示。可以看出,3 个时刻主网出力在实时调度中均有所下降,分布式能源的出力明显增加。其中,03:00 两阶段调度结果中的光伏出力和燃气轮机出力均为 0,主网出力明显降低,风电出力有所增加。09:00 的实时调度光伏出力为 0.036 MW,而日前调度结果中光伏出力为 0,说明通过实时调度优化,使得光伏出力得到充分的利用;另外,09:00 实时调度储能出力为 0,说明储能设备仅用于峰时段可有效地降低运行成本。21:00 实时调度的储能设备出力明显高于日前调度,说明实时调度能够根据日前调度结果,结合当前储能设备运行状态,对当前时段储能设备出力进行修正,从而提高了储能设备的有效利用率。

3.4 算法有效性验证

为验证 DE-ICA 在分布式能源系统调度优化问题中的效率性,本文选用普通 ICA、遗传算法(GA)以及粒子群优化(PSO)算法作为对比算法。算法迭代图和计算结果分别如表 3 和图 8、图 9 所示。

如图 8 所示,在日前调度优化计算中,DE-ICA 在迭代次数为 32 时计算得到系统最优值为 47083.64 元,与普通 ICA 相比,通过引入 DE,DE-ICA 的迭代次数小于 GA 和 PSO 算法,且算法的最优值均小于 GA 和 PSO 算法得到的最优值,说明 DE-ICA 在分布式能源调度的应用中,其求解能力和算法适应性能更优,能够在较短的时间内快速收敛,通过改进寻优方式,提高了 ICA 的寻优能力和算法收敛能力。另外,与常见的 GA 和 PSO 算法相比,DE-ICA 能在较短时间内快速收敛,从而能求得算法最优值。在实时调度优化计算中,算法的优化性能和效率性能与日前相似,充分体现了 DE-ICA 在主动配电网下分布式能

表 2 区域 1 三时段实时优化调度结果						
Table 2 Results of optimal real-time dispatch for three periods of Area 1						
参数	03:00		09:00		21:00	
	日前调度	实时调度	日前调度	实时调度	日前调度	实时调度
主网出力	0.598	0.531 6	0.252	0.139	0.796	0.710
风机出力	0.108	0.165 0	0.125	0.169	0.122	0.175
光伏出力	0	0	0	0.036	0	0
燃气轮机出力	0	0	0.420	0.450	0.426	0.437
储能电池出力	-0.036	-0.042 6	0.033	0	0	0.037

表 3 计算结果
Table 3 Calculative results

算法	迭代次数 (日前)	日前调度全局 最优值/元	日前调度平均 最优值/元	迭代次数 (实时)	实时调度全局 最优值/元	实时调度平均 最优值/元
DE-ICA	32	47083.64	47345.68	35	45876.25	46237.14
ICA	61	48977.46	49385.73	59	47866.63	48161.10
GA	45	48585.20	48873.14	47	46444.96	47000.46
PSO	58	48465.51	48781.26	54	46454.28	46995.09

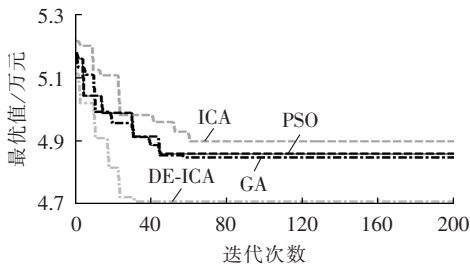


图 8 算法日前调度优化计算迭代图

Fig.8 Iteration diagram of day-ahead dispatch optimization algorithm

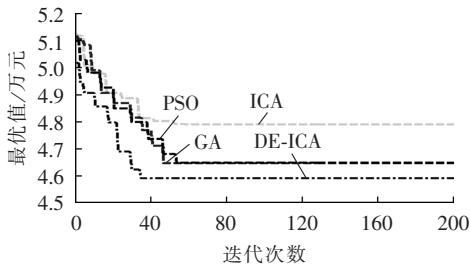


图 9 算法实时调度优化计算迭代图

Fig.9 Iteration diagram of real-time dispatch optimization algorithm

源系统调度优化问题的有效性和优越性。

4 结论

主动配电网下分布式能源系统的调度优化是实现分布式能源有效消纳和高效利用的有效途径。本文在主动配电网双层能量管理的基础上,构建了分布式能源系统日前和实时两阶段调度优化模型,并提出了基于 DE-ICA 的优化模型,通过算例得到如下结论。

(1)在日前调度中,通过调度优化,最大化地帮助了分布式能源的消纳,降低了系统运行成本,与未调度优化结果相比,上层全局和下层区域日前调度优化使得经济效益分别提升了 2.4% 和 8.69%。

(2)实时调度是对日前调度的有效修正,通过对分布式能源机组运行状态的再安排,进一步提升了分布式能源的有效利用率。与日前调度优化结果相比,上层全局和下层区域实时调度优化分别使得经济效益提升了 2.56% 和 3.4%。

(3)本文所提出的 DE-ICA 优化算法,通过引入 DE 改进方式,有效地提高了 ICA 的寻优能力和收敛能力。与常见 GA 和 PSO 算法相比,DE-ICA 主动配

电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化的应用中,其求解能力和算法使用性能更优,充分体现了 DE-ICA 在解决优化问题时的有效性和优越性。

参考文献:

[1] 曾鸣. 能源革命与能源互联网[N]. 中国能源报,2015-06-15(4).

[2] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):102-111.

ZENG Ming,YANG Yongqi,XIANG Hongwei,et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):102-111.

[3] FAN M,SU A,ZHANG Z,et al. A planning approach for active distribution networks[C]//21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt,Germany:[s.n.],2011:1-4.

[4] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.

LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.

[5] 范明天,张祖平. 主动配电网规划相关问题的探讨[J]. 供用电,2014(1):22-27.

FAN Mingtian,ZHANG Zuping. Discussion on the related issues of active distribution network planning[J]. Distribution & Utilization,2014(1):22-27.

[6] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):45-51.

ZHANG Shenxi,LI Ke,CHENG Haozhong,et al. Optimal active power dispatch based on slack tie-line power for bi-level power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):45-51.

[7] PEIKHERFEH M,SEIFI H,SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Active management of distribution networks in presence of distributed generations[C]//3rd 2011 International Conference on Clean Electrical Power:Renewable Energy Resources Impact. Ischia, Italy:ICCEP,2011:725-729.

[8] 沈欣炜,朱守真,郑宏亮,等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术,2015,39(7):1913-1920.

SHEN Xinwei,ZHU Shouzheng,ZHENG Jinghong,et al. Active distribution network planning-operation co-optimization[J]. Power System Technology,2015,39(7):1913-1920.

[9] 张跃,杨汾艳,曾杰,等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(15):67-72.

ZHANG Yue,YANG Fenyang,ZENG Jie,et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control,2015,43(15):67-72.

- [10] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5500-5506.
- [11] 钟清,余南华,孙闻,等. 主动配电网分布式电源规划及经济性分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(11):82-86.
ZHONG Qing, YU Nanhua, SUN Wen, et al. Distribution generation programming and economical analysis of active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(11):82-86.
- [12] 高燕. 主动配电网计划孤岛与日前调度方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
GAO Yan. Research on intentional islanding and day ahead schedule optimal dispatch of active distribution network[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.
- [13] 尤毅,刘东,钟清,等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Study on day-ahead dispatch strategy of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):177-183.
- [14] 窦震海,牛焕娜,高燕,等. 主动型配电网日前调度策略研究[J]. 农业工程学报,2014,30(11):126-133.
DOU Zhenhai, NIU Huanna, GAO Yan, et al. Study on day-ahead dispatch strategy of active distribution network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11):126-133.
- [15] 王健. 主动配电网日前计划调度方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
WANG Jian. Research on intentional islanding and day ahead schedule optimal dispatch of active distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [16] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4):2164-2172.
- [17] CELLI G, MOCCI S, PILO F, et al. Optimal integration of energy storage in distribution networks[C]//Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference. Bucharest, Romania: [s.n.], 2009:1-7.
- [18] 郝岩. 基于帝国竞争算法的非概率可靠性分析及优化[D]. 吉林:吉林大学,2014.
HAO Yan. Non-probabilistic reliability analysis and optimization based on the imperialist competitive algorithm[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- [19] GHARAVI H, ARDEHALI M M, GHANBARI-TICHI S. Imperial competitive algorithm optimization of fuzzy multi-objective design of a hybrid green power system with considerations for economics, reliability, and environmental emissions[J]. Renewable Energy, 2015, 78(6):427-437.
- [20] 董明刚. 基于差分进化的优化算法及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
DONG Minggang. Research on differential evolution-based optimization algorithms and applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [21] ROQUE C M C, MARTINS P A L S. Differential evolution for optimization of functionally graded beams[J]. Composite Structures, 2015, 133(6):1191-1197.

作者简介:



曾 鸣

曾 鸣(1957—),男,山西太原人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统规划、需求侧管理、电力市场与技术经济研究、能源互联网运营机制及规划等(E-mail: zengmingbj@vip.sina.com);

彭丽霖(1991—),女,四川达州人,博士研究生,研究方向为电力系统规划、技术经济及评价等(E-mail: penglilinbj@126.com)。

Two-stage dual-level dispatch optimization model of distributed energy system in active distribution network

ZENG Ming¹, PENG Lilin¹, WANG Lihua², LI Yuanfei², CHENG Min³, SUN Chenjun⁴

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Anqing Electric Power Supply Company, Anqing 246001, China; 4. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Since the dispatch optimization of distributed energy system in active power network is an important way to realize the economic & safe operation and to improve the effective utilization of distributed energy, a two-stage dispatch optimization model in the dual-level energy management of active distribution network is constructed with its solving algorithm. A dispatch optimization model including day-ahead stage and real-time stage is built based on the load forecasts and intermittent energy output forecasts for the distributed energy system. A DE (Differential Evolution factor) is introduced to the ICA (Imperialist Competitive Algorithm) and the improved algorithm (DE-ICA) is adopted to solve the model. The proposed model is applied to the dispatch optimization of transformed IEEE 33-bus system and the simulative results show that, the two-stage dual-level dispatch optimization can effectively improve the utilization rate of distributed energy and reduce the system operating costs; the proposed solving algorithm is effective and superior.

Key words: distributed energy system; active distribution network; two-stage dispatch optimization; imperial competition algorithm; differential improvement; distributed power generation