

考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法

刘文颖¹, 文晶¹, 谢昶², 王维洲³, 梁琛³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃省 兰州市 730050)

Multi-objective Optimal Method Considering Wind Power Accommodation Based on Source-load Coordination

LIU Wenying¹, WEN Jing¹, XIE Chang², WANG Weizhou³, LIANG Chen³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. State Grid Gansu Provincial Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

ABSTRACT: With rapid development of wind power, the randomness and intermittence characteristics of its output increased the regulation pressure of conventional power continuously, which caused the traditional dispatching operation mode of power system being difficult to satisfy the sending demand of large-scale wind power. This paper used the high energy load as an important means of wind power accommodation, which can participate in optimal scheduling with conventional power together, and proposed a new scheduling mode based on source-load coordinate optimal operation. Taking the effects of source-load coordinate operation on wind power accommodation and operation economic into account, a multi-objective optimal model was established which the objective functions are both the maximum capacity of wind power accommodation and the minimum system operation costs in this paper, and the multi-objective differential evolution optimization algorithm was used to solve this model. The results of actual calculation example indicated the effectiveness of this method, which can reduce system operation costs effectively, and improve wind power utilization.

KEY WORDS: wind power accommodation; high energy load; source-load coordination; multi-objective optimization; differential evolution

摘要: 随着风电的快速发展, 其出力的随机性和间歇性导致常规电源的调节压力不断增大, 传统的调度运行方式已经不能满足大规模风电的送出需求。该文将具有可调节特性的高载能负荷作为消纳风电的重要手段, 与常规电源共同参与

电网的优化调度, 形成源荷协调优化运行的调度模式。在深入研究源荷协调运行特性的基础上, 综合考虑源荷协调对风电消纳和系统运行的影响, 以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标建立源荷协调多目标优化模型, 并采用多目标差分进化法对模型进行求解。以甘肃电网为实例进行仿真说明, 验证了所提方法能够有效降低系统运行成本, 提高风电消纳水平。

关键词: 风电消纳; 高载能负荷; 源荷协调; 多目标优化; 差分进化

0 引言

随着风电的快速发展, 常规电源的调节能力和电网传统的调度运行方式已经不能满足大规模风电的送出需求^[1-2]。大规模风电基地面临电网消纳水平有限、外送通道狭窄、外送能力受阻等一系列技术困境。将具有可调节和可中断特点的高载能负荷参与电网调控, 形成源荷协调优化运行模式, 是解决风电消纳问题的有效途径。

高载能负荷是指能源价值在产值中所占比重较高的用户负荷, 它具有以下调节特性^[3]: 1) 可调节容量大, 适合就地消纳受阻风电, 提高风电利用率; 2) 响应速度快, 能快速跟踪风电出力变化引起的调节需求, 降低对常规电源调节能力的要求; 3) 负荷稳定, 昼夜峰谷差较小, 可以较好应对风电出力的反调峰特性; 4) 自动化水平高, 相比于其他分散负荷更易于管理。因此, 利用高载能负荷弥补常规电源在调节大规模风电波动上的不足, 深入研究源荷协调对风电消纳的积极效用具有重大意义。

国内外就具有可调节特性负荷^[4]参与电网调

基金项目: 国家电网公司重大科技项目(52272214002); 国家自然科学基金面上项目(51377053)。

Supported by State Grid Corporation of China, Major Project on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (52272214002); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377053).

度、辅助风电消纳进行了相关研究。文献[5]将可控负荷作为电网调节和消纳新能源的重要手段,提出源-网-荷互动的概念,并在此基础上给出了智能电网源-网-荷互动运行控制的研究框架。文献[6]提出高载能负荷企业主动参与风电消纳及电网调峰模式和算法,从而有效缓解风电接入电网的调峰压力。文献[7]建立空调、热水器等可控负荷的数学模型,并利用可控负荷对微网中风光电出力波动引起的功率不平衡进行优化。文献[8]以最小误差为目标,采用模型预测方法控制热力学可控负荷为电网提供辅助服务并用于风电消纳。文献[9]建立了包含电动汽车和可再生能源的随机优化模型,实现了“源储荷”不确定性的建模。文献[10]提出采用直接负荷控制、可中断负荷、电动汽车等调度中心直接控制的负荷用于平缓风电波动,减少系统运行负担的方法。文献[11-13]在含风电场的电力系统经济调度模型中考虑价格型需求响应,以提高系统的风电消纳能力。上述研究主要从需求侧响应的角度对分布式、小容量的可控负荷参与风电消纳进行研究,通过电价和激励措施来引导可控负荷的优化调节,但需求侧用户的用电调节行为无法准确预测,难以实现与发电侧资源的协调配合,优化方法中也未将风电消纳情况进行量化分析,不能很好地适应大规模风电集中并网后的消纳问题。

本文将高载能负荷作为消纳风电的重要手段,与常规电源共同参与电网优化调度,形成源荷协调运行模式。通过分析源荷协调运行对风电消纳的影响机理,建立了以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标的源荷协调多目标优化模型,并采用多目标差分算法进行求解,算例证明该方法能有效提高风电消纳水平和系统运行经济性,减少弃风。

1 源荷协调运行对风电消纳的影响

1.1 风电出力特性

根据某风电基地的日发电量年度分布数据,随着风电规模的不断增大,风电出力的波动范围也随之增加,甚至会出现从接近零出力到额定出力之间变化的情况^[14],如图1所示,如此大范围的风电波动导致等效负荷(系统负荷减去风电出力)具有较大的日间差异和不确定性。图2为各季节的风电典型日出力曲线,可以看出风电最大出力出现在03:00左右,最小出力在15:00左右,具有明显的反调峰特性。此外,全年测风数据模拟的风电出力概率分布显示风电呈现反调峰特性的概率高达74.7%^[15]。

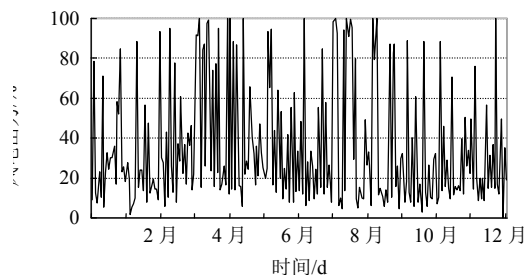


图1 风电日发电量的年度分布

Fig. 1 Annual distribution of wind power

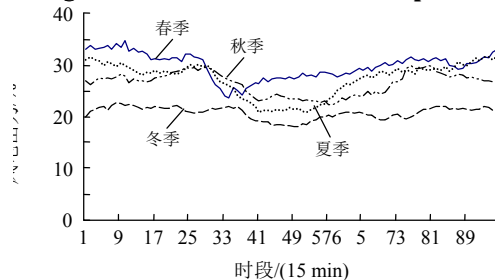


图2 风电典型日出力曲线

Fig. 2 Typical day output curve of wind power

由此可知,大规模风电并网运行增加了对系统调节能力的需求。

1.2 源荷运行特性

本文中的“源荷”指水、火电机组等常规电源和具有可调节特性的大容量高载能负荷。

1) 常规电源运行特性。

水电机组的调节能力强,调节速度快,但受季节因素影响大,在枯水期其调节容量只有装机容量的25%~30%;火电机组的调整容量一般为装机容量的30%~50%,调节范围较小,且调节速度慢,以300 MW机组为例,平均每分钟仅可调节1%左右的额定出力,从60%出力升至满出力需40多分钟,难以适应风电出力波动的调节需要。

2) 高载能负荷运行特性。

高载能负荷的负荷功率大,具有可调节和可中断特性,适合用于消纳风电电量^[16]。采用多条生产线串联的生产方式,以生产线为生产单位,通过投切计划能够实现0%~100%容量范围内的功率调节,且投切动作在指令下达瞬间即可完成,响应速度能达到ms级别。图3为某高载能企业的日负荷运行曲线。

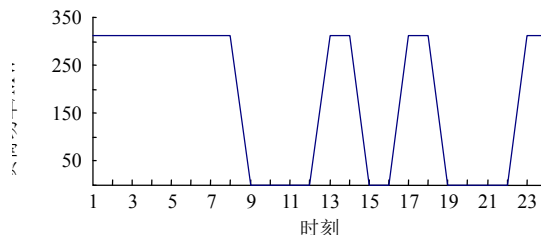


图3 高载能企业日负荷曲线

Fig. 3 Production curve of high energy load

1.3 源荷协调运行对风电消纳的影响

由上述可知, 风电出力的波动性加大了电网的调节负担, 当常规电源调节能力不足, 无法满足风电出力波动和负荷需求时, 可以通过投入或切除高载能负荷来保证电力系统供需平衡, 从而提高风电消纳能力, 减少弃风。本文基于风电出力波动曲线, 分析源荷协调运行模式对风电消纳的影响, 如图4所示。

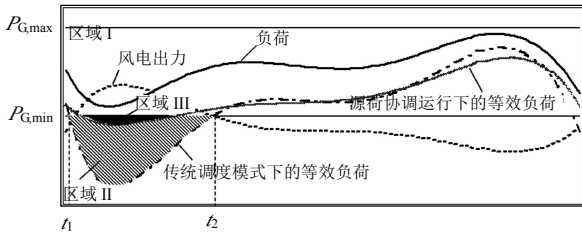


图4 源荷协调运行对风电消纳影响示意图

Fig. 4 Schematics diagram of effect that source-load coordinate operation on wind power accommodation

图4中, $P_{G,max}$ 和 $P_{G,min}$ 为常规电源的最大出力和最小出力, 区域I为常规电源出力可调节范围。在传统调度方式下, 风电接入后系统等效负荷为

$$P_E = P_L - P_W \quad (1)$$

式中: P_L 为系统原有的有功负荷; P_W 为风电出力。

当风电出力超出常规电源调节能力时(如 $t_1 \sim t_2$ 时段), 若电网全额接纳此部分风电, 常规电源将被迫减小出力至非常规出力状态, 甚至出现停机。为了不影响电网运行的安全性和经济性, 电网只能采取弃风措施, 风电消纳受限^[17], 如区域II所示。该方式下受限的风电电量为

$$E_{W,abon} = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_E) \Delta T = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_L + P_W) \Delta T \quad (2)$$

式中 ΔT 为时段 t 的持续时间长度。

采用源荷协调运行后, 在 $t_1 \sim t_2$ 时段投入容量为 P_H 的高载能负荷, 等效负荷和受限的风电电量为:

$$P_E^* = P_L + P_H - P_W \quad (3)$$

$$E_{W,abon}^* = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_E^*) \Delta T = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_L - P_H + P_W) \Delta T \quad (4)$$

由于 $P_H > 0$, 因此, 源荷协调运行下的风电受限电量要小于传统调度方式下的风电受限电量, 即 $E_{W,abon} < E_{W,abon}^*$ 。此时, 电网增加的风电消纳电量为

$$\Delta E_W = E_{W,abon} - E_{W,abon}^* = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_L + P_W) \Delta T - \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{G,min} - P_L - P_H + P_W) \Delta T = \sum_{t=t_1}^{t_2} P_H \Delta T \quad (5)$$

由此可知, 源荷协调运行模式在常规电源调节能力不足时($t_1 \sim t_2$ 时段), 通过高载能负荷来消纳受限风电, 使受限的风电电量由区域II减少至区域III, 有效提高了电网消纳风电的能力。

2 考虑风电消纳的源荷协调多目标优化模型

2.1 优化目标

源荷协调运行模式能够使系统在既有的调节能力内消纳更多的风电, 然而, 采用源荷调节, 会增加常规电源和高载能负荷的运行成本。因此, 如何以最低的成本实现风电消纳的最大化是源荷协调优化运行的关键。本文以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标建立多目标优化模型, 对常规电源的出力情况和高载能负荷的投切情况进行优化。

1) 风电消纳电量最大。

风电消纳电量是指在源荷调节能力下电网调度的风电有功电量^[18]。

$$\max E_W = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,i} \Delta T \quad (6)$$

式中: T 为调度期间的时段数; N_W 为风电场个数; $P_{W,i}$ 为风电场 i 在 t 时段的有功调度出力。

2) 运行成本最小。

运行成本包括常规电源发电成本和高载能负荷的投切成本^[19-20]。

$$\min C_{GH} = C_{gen} + C_{high-load} \quad (7)$$

$$C_{gen} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_G} \{ U_{G,j}^t [\alpha_j + \beta_j P_{G,j}^t + \gamma_j (P_{G,j}^t)^2] + U_{G,j}^t (1 - U_{G,j}^{t-1}) [\eta_{0,j} + \eta_{1,j} (1 - e^{\tau/\tau_j})] \} \quad (8)$$

$$C_{high-load} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_H} \lambda_{Hk} S_{Hk}^t P_{Hk} \Delta T \quad (9)$$

式中: C_{gen} 为常规机组的发电成本, 由常规机组的运行成本和启停成本组成; $C_{high-load}$ 为高载能负荷的投切成本; N_G 为常规发电机组台数; $U_{G,j}^t$ 为常规机组 j 在 t 时段的启停状态变量, $U_{G,j}^t = 0$ 表示常规机组处于停机状态, $U_{G,j}^t = 1$ 表示常规机组处于开机状态; $P_{G,j}^t$ 为常规机组 j 在 t 时段的有功出力; α_j 、 β_j 、 γ_j 为常规机组 j 的运行成本参数; $\eta_{0,j}$ 、 $\eta_{1,j}$ 、 τ_j 为常规机组 j 的启停成本参数; τ 为常规机组的停机时间; N_H 为高载能负荷组数; λ_{Hk} 为高载能负荷 k 的单位调节成本; S_{Hk}^t 为高载能负荷 k 在时段 t 的投切

状态, $S_{Hk}^t = 0$ 表示高载能负荷 k 在时段 t 中断运行, $S_{Hk}^t = 1$ 表示高载能负荷 k 在时段 t 投入运行; P_{Hk} 为高载能负荷 k 的单位投切容量。

2.2 约束条件

约束条件包括系统功率平衡约束、常规电源运行约束和高载能负荷投切约束等^[21]。

1) 系统约束条件。

①功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_W} P_{Wi}^t + \sum_{j=1}^{N_G} U_{Gj}^t P_{Gj}^t = P_L^t + \sum_{k=1}^{N_H} S_{Hk}^t P_{Hk}^t \quad (10)$$

式中 P_L^t 为 t 时段系统原有的有功负荷。

②旋转备用约束。

风电的随机性导致风电预测存在一定的误差, 为了避免风电出力预测误差对系统的优化运行造成不利影响, 本文通过增加正、负备用容量来应对大规模风电出力的波动。

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gj}^t (P_{Gj,up}^t - P_{Gj}^t) \geq R_{L,up}^t + R_{W,up}^t \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gj}^t (P_{Gj}^t - P_{Gj,down}^t) \geq R_{L,down}^t + R_{W,down}^t \quad (12)$$

式中: $P_{Gj,up}^t$ 和 $P_{Gj,down}^t$ 分别为常规机组 j 在 t 时段的最大可用出力和最小可用出力; $R_{L,up}^t$ 和 $R_{L,down}^t$ 分别为 t 时段应对负荷预测误差所需的正负旋转备用; $R_{W,up}^t$ 和 $R_{W,down}^t$ 分别为 t 时段应对风电功率波动所需的正负旋转备用。

2) 风电出力约束条件。

$$0 \leq P_{Wi}^t \leq P_{Wi,forecast}^t \quad (13)$$

式中 $P_{Wi,forecast}^t$ 为风电场 i 在 t 时段的有功预测出力。

3) 常规电源运行约束条件。

①输出功率上下限约束:

$$U_{Gj}^t P_{Gj,min} \leq P_{Gj}^t \leq U_{Gj}^t P_{Gj,max} \quad (14)$$

式中 $P_{Gj,max}$ 和 $P_{Gj,min}$ 分别为常规机组 j 的输出功率上下限。

②最小启停时间约束:

$$\begin{cases} (U_{Gj}^{t-1} - U_{Gj}^t)(T_{Gj,on}^t - T_{Gj,on}^{min}) \geq 0 \\ (U_{Gj}^t - U_{Gj}^{t-1})(T_{Gj,off}^t - T_{Gj,off}^{min}) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $T_{Gj,on}^t$ 和 $T_{Gj,off}^t$ 分别为常规机组 j 在时段 t 的开机持续时间和停机持续时间; $T_{Gj,on}^{min}$ 和 $T_{Gj,off}^{min}$ 分别为常规机组 j 的最小运行时间和最小停机时间。

③爬坡速度约束:

$$\begin{cases} U_{Gj}^t P_{Gj}^t - U_{Gj}^{t-1} P_{Gj}^{t-1} \leq P_{Gj,up} \\ U_{Gj}^{t-1} P_{Gj}^{t-1} - U_{Gj}^t P_{Gj}^t \leq P_{Gj,down} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{Gj}^{t-1} 为常规机组 j 在时段 $t-1$ 的出力; $P_{Gj,up}$ 和 $P_{Gj,down}$ 分别为常规机组 j 的上升出力限制和下降出力限制。

4) 高载能负荷投切约束条件^[22]。

①投入容量约束:

$$P_{H,min} \leq \sum_{k=1}^{N_H} S_{Hk}^t P_{Hk} \leq P_{H,max} \quad (17)$$

式中 $P_{H,max}$ 和 $P_{H,min}$ 分别为 t 时段高载能负荷的投入容量上下限。

②投切次数约束:

$$0 \leq \sum_{t=1}^T |S_{Hk}^t - S_{Hk}^{t-1}| \leq M_{Hk} \quad (18)$$

式中 M_{Hk} 为高载能负荷 k 的最大允许投切次数。

③投切时间约束:

$$\begin{cases} (S_{Hk}^{t-1} - S_{Hk}^t)(T_{Hk,on}^t - T_{Hk,on}^{min}) \geq 0 \\ (S_{Hk}^t - S_{Hk}^{t-1})(T_{Hk,off}^t - T_{Hk,off}^{min}) \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $T_{Hk,on}^t$ 和 $T_{Hk,off}^t$ 分别为高载能负荷 k 在时段 t 的投入持续时间和中断持续时间; $T_{Hk,on}^{min}$ 和 $T_{Hk,off}^{min}$ 分别为高载能负荷 k 的最小连续投入时间和最小连续中断时间。

2.3 源荷协调多目标优化模型

综上, 源荷协调多目标优化模型可描述为

$$\begin{cases} \min f_i(\mathbf{x}), & i=1,2,\dots,m \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_j(\mathbf{x})=0, & j=1,2,\dots,p \\ g_k(\mathbf{x}) \leq 0, & k=1,2,\dots,q \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $f_i(-E_W, C_{GH})$ 为目标函数; \mathbf{x} 为由优化变量组成的决策向量; $h_j(\mathbf{x})$ 为等式约束函数; $g_k(\mathbf{x})$ 为不等式约束函数。

在多目标优化问题中, 各目标函数是相互冲突的, 同时使多个目标均达到最优是不可能的。因此, 多目标优化问题的最优解是任何一个目标函数的值在不使其他目标函数劣化的条件下已不可能进一步优化的一组解, 即 Pareto 最优解集。以下为多目标优化中常用的几个基本定义^[23]。

定义 1(Pareto 支配) 如果决策向量 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 是多目标优化问题的 2 个可行解, 则称 \mathbf{x}_1 支配 \mathbf{x}_2 (记作 $\mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2$) 当且仅当

$$f_i(\mathbf{x}_1) \leq f_i(\mathbf{x}_2), \forall i \in \{1,2,\dots,m\} \quad (21)$$

$$f_i(\mathbf{x}_1) < f_i(\mathbf{x}_2), \exists i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (22)$$

定义 2(Pareto 约束支配) 对决策空间中的任意 2 个决策向量 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 , 称 \mathbf{x}_1 约束支配 \mathbf{x}_2 (记作 $\mathbf{x}_1 \succ_c \mathbf{x}_2$) 当且仅当下列任意一种情况成立:

1) \mathbf{x}_1 是可行解, 且 \mathbf{x}_2 不是可行解。

2) \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 都不是可行解, 且 \mathbf{x}_1 的总体约束违反程度较小。其中, \mathbf{x} 的约束违反度函数由下式得到:

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^q \max(0, g_k(\mathbf{x}))^\sigma, \sigma = 2 \quad (23)$$

3) \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 都是可行解, 且 $\mathbf{x}_1 \succ \mathbf{x}_2$ 。

定义 3(Pareto 最优解) 一个决策向量 \mathbf{x}_1 被称为 Pareto 最优解, 当且仅当

$$\neg \exists \mathbf{x}: \mathbf{x} \succ \mathbf{x}_1 \quad (24)$$

定义 4(Pareto 最优解集) 所有 Pareto 最优解的集合称为 Pareto 最优解集, 即

$$P_S = \{\mathbf{x}_1 | \neg \exists \mathbf{x}: \mathbf{x} \succ \mathbf{x}_1\} \quad (25)$$

3 模型求解

3.1 多目标差分进化算法

差分进化算法(differential evolution, DE)是一种随机的并行直接全局搜索算法, 具有简单易用和全局寻优能力强等优点, 已广泛用于单目标优化问题和多目标优化问题的求解^[24-25]。本文采用多目标差分进化算法(differential evolution for multi-objective optimization, DEMO)对模型进行求解。DEMO 算法的优化流程包括种群初始化、变异、交叉、选择等步骤, 为了使 DEMO 算法能够方便地处理连续和离散变量共存的优化问题, 对于整数决策变量采用实数取整的方法, 即在实数域进行优化求解, 然后对实数值进行取整, 得到离散变量值。具体操作过程如下:

1) 种群初始化。

设初始种群为 $\mathbf{X}^0 = (\mathbf{x}_1^0, \mathbf{x}_2^0, \dots, \mathbf{x}_{N_p}^0)^\top$, N_p 为种群规模。种群中的每个个体代表着一组优化变量, 其中常规机组的有功出力和风电调度出力为连续变量, 高载能负荷的投切状态为离散变量, 而常规机组的启停状态由机组在某时段的出力大小来确定, 即:

$$U_{G_j}^t = \begin{cases} 0, & P_{G_j} = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

因此, 本文采用如下的混合编码方式:

$$X_i: [\underbrace{P_{W1}^1 \cdots P_{W_i}^1 \cdots P_{W_{N_w}}^1}_{\text{实数}}; \underbrace{P_{G1}^1 \cdots P_{G_j}^1 \cdots P_{G_{N_g}}^1}_{\text{实数}}; \underbrace{S_{H1}^1 \cdots S_{H_k}^1 \cdots S_{H_{N_H}}^1}_{\text{整数}}]$$

2) 变异。

变异操作是基于当代群体中随机采样的个体之间的差异进行的, 可表示为

$$\mathbf{v}_i^{G+1} = \mathbf{x}_{r_1}^G + F(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G) \quad (27)$$

式中: G 为进化代数; \mathbf{v}_i^{G+1} 为变异个体; $\mathbf{x}_{r_1}^G$ 为父代基向量; $(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G)$ 为父代差分向量, 且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$; F 为缩放因子, 表示差分向量对下一代个体的影响程度, 取值范围通常为 $[0.5, 1]$ 。

对于整数变量, 同时对变异个体向上和向下取整, 得到 2 个不同的变异个体。然后对 2 个变异个体择优选择, 进行交叉操作, 这样有利于扩大搜索范围, 从而提高算法搜索到全局最优点的鲁棒性。

对整数变量进行变异操作的方程为

$$\mathbf{v}_i^{G+1} = [\mathbf{x}_{r_1}^G + F(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G)] \quad (28)$$

式中 $[*]$ 表示相应的取整运算。

3) 交叉。

为保持种群的多样性, 采用二项式交叉算子生成试验个体 \mathbf{u}_i^{G+1} 的方式为

$$u_{ij}^{G+1} = \begin{cases} v_{ij}^{G+1}, & \text{rand}_j() \leq C_R \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ u_{ij}^G, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

式中: C_R 为交叉概率; $\text{rand}_j()$ 为 $[0, 1]$ 之间的均匀分布随机数; j_{rand} 是从 $[1, D]$ 中随机选取的一个整数, D 为优化变量的维数。

4) 选择。

本文采用文献[25]中的选择策略来求解含有约束条件的多目标优化问题, 方式如下: 设置临时种群 \mathbf{X}^* , 令试验个体 \mathbf{z}_i^{G+1} 和父代个体 \mathbf{x}_i^G 竞争, 若 \mathbf{z}_i^{G+1} 约束支配 \mathbf{x}_i^G , 则 \mathbf{z}_i^{G+1} 进入 \mathbf{X}^* , 反之, \mathbf{x}_i^G 进入 \mathbf{X}^* ; 若 2 个个体互不约束支配, 则 \mathbf{z}_i^{G+1} 和 \mathbf{x}_i^G 同时进入 \mathbf{X}^* 。

3.2 最优折衷解的选取

在电网实际运行中, 调度人员必须从一组 Pareto 最优解集中选择出最优折衷解, 即均衡风电消纳和系统经济运行的最优调度方案。本文采用模糊隶属度函数^[26]来分别表示每个 Pareto 解中各个目标函数对应的满意度, 通过满意度比较找出最优折衷解。定义模糊隶属度函数为:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i\min} \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}}, & f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ 0, & f_{i\max} < f_i \end{cases} \quad (30)$$

式中： f_i 为第 i 个目标函数值； f_{\max} 和 f_{\min} 分别为目标函数的上、下限。

当 $\mu=0$ 时表示调度人员对某个目标函数值完全不满意，而当 $\mu=1$ 时表示对某个目标函数值完全满意。对于 Pareto 最优解集中的每个解，根据下式求解其标准化满意程度值，其中满意程度值最大的解即为最优折衷解。

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_i$$

(31)

式中： μ 为标准化满意程度值； m 为待优化目标函数的个数。

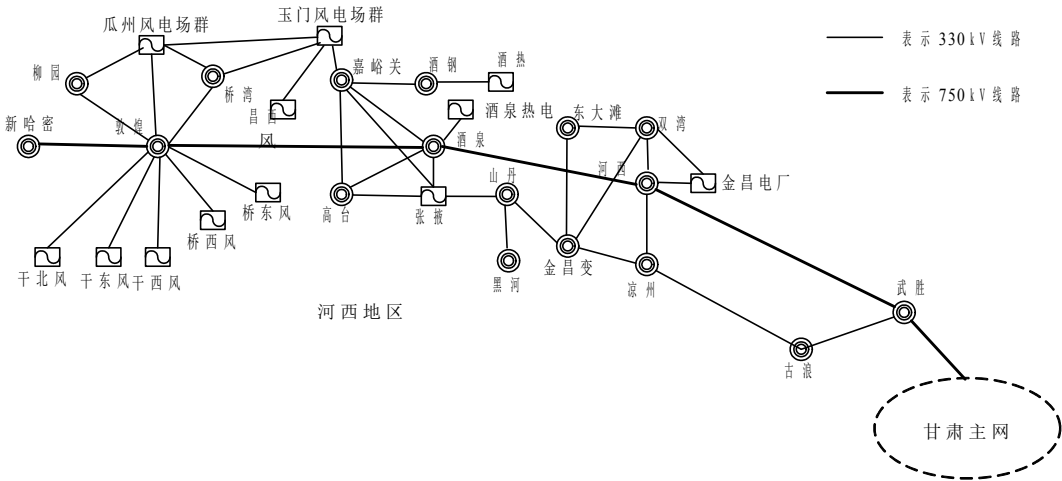


图 5 甘肃电网示意图

Fig. 5 Diagram of gansu power grid

1) 常规电源的爬坡速度为每分钟上升或下降 1%的机组额定容量；常规电源应对负荷预测误差所需正旋转备用容量为系统最大负荷的 8%，负旋转备用需求为系统最小负荷的 2%；常规电源应对风电出力波动所需正、负旋转备用容量均为风电出力的 15%；常规电源的最大、最小出力如表 1 所示。

表 1 甘肃常规电源调节参数

Tab. 1 Adjustment parameters of conventional power

常规电源	最小出力/%	最大出力/%
常规火电机组	50	100
供热火电机组	100	100
有调节水电机组	0	100
无调节水电机组	100	100

2) 调度周期为一天 96 时段，每时段 15 min；调度周期各时段的系统负荷预测曲线和风电输出功率预测曲线如图 6 所示。

3) 高载能负荷调节参数如表 2 所示。

4) DEMO 算法的种群规模取 100，最大迭代次数取 500，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.7。

4 算例分析

4.1 算例描述

本文以甘肃省电网为实例，验证所提出的源荷协调多目标优化方法的可行性和有效性。甘肃电网风电总装机容量为 6343.1MW，主要集中在远离负荷中心的河西地区，通过长距离链式输电通道远距离向甘肃主网输送，如图 5 所示。常规电源总装机容量为 14350MW，其中，河西地区的常规电源装机容量为 3475MW，远远不足以平衡风电出力的大幅波动。高载能负荷主要分布在嘉峪关和瓜州 2 个风电并网点附近。算例给定条件如下所述。

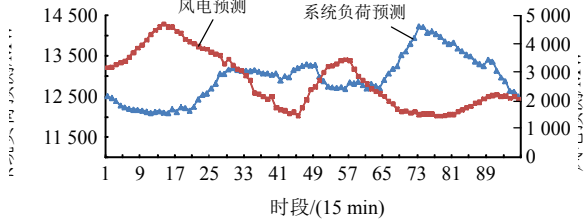


图 6 系统负荷预测和风电输出功率预测曲线

Fig. 6 Curve of power system load and wind power output forecasting

表 2 甘肃高载能负荷调节参数

Tab. 2 Adjustment parameters of high energy load

高载能负荷	所在位置	投切组数	P_{Hd}/MW	$\lambda_{Hd}/(元/(MW \cdot h))$
东兴铝业	嘉峪关	10	65	180
酒钢宏电	嘉峪关	5	40	70
三新硅业	瓜州	10	35	110
$P_{H,max}/MW$	$P_{H,min}/MW$	$M_{Hd}/次$	$T_{Hd,off}^{min}/h$	$T_{Hd,on}^{min}/h$
650	130	5	2	3
200	40	3	1	2
350	0	3	1	2

4.2 计算结果分析

采用 DEMO 算法求解本文提出的源荷协调多

目标优化模型，得到一组分布均匀、范围宽广的 Pareto 最优解。图 7 为 Pareto 最优集在目标函数空间上的分布。

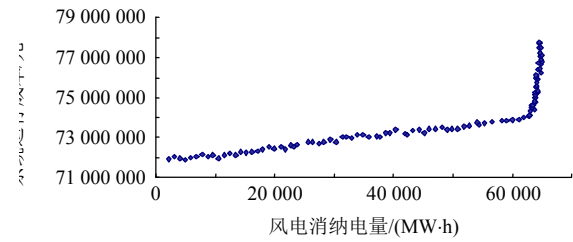


图 7 Pareto 最优解集分布

Fig. 7 Diagram of the distribution situation of Pareto optimal solution set

分别以风电消纳电量和系统运行成本最小为目标搜索极端解，如表 3 所示。

表 3 Pareto 最优解集中的极端解

Tab. 3 Extreme solutions in Pareto optimal set

优化模型	优化目标	$E_w/(MW\cdot h)$	$C_{GH}/\text{元}$
源荷协调优化	E_w 最大	64 454.04	77 758 439
模型	C_{GH} 最小	2 203.87	71 908 836

从表中可以看出，若仅以风电消纳为目标，则会增加系统的运行成本；若仅以经济运行为目标，则对风电消纳不利。因此需要权衡各方面的因素，充分挖掘 Pareto 最优解包含的信息，帮助运行人员做出决策。

根据模糊隶属度函数计算 Pareto 最优解集中决策向量的满意度，选择满意度值最大的解作为最优折衷解，如表 4 所示。

表 4 最优折衷解

Tab. 4 Best compromise solutions

优化模型	$E_w/(MW\cdot h)$	$C_{GH}/\text{元}$
源荷协调优化模型	62 894.79	74 122 109

多目标优化模型还可以通过加权方法将多个目标转化为单目标进行求解，这里将风电消纳情况用弃风成本来表示，得到不同权重下的最优解，如表 5 所示。其中， $F = w_1 C_{GH} + w_2 C_{AW}$ 为目标函数， C_{AW} 为弃风成本， w_1 、 w_2 分别为系统运行成本和弃风成本 2 个目标对应的权重系数； $C_{AW} = K_{AW} \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_w} (P_{W_i, \text{forecast}}^t - P_{W_i}^t) \Delta T$ ， K_{AW} 为弃风惩罚系数，取 350 元/(MW·h)。

从以上求解过程中可以发现，采用加权方法存在以下缺点：1) 求得的最优解与权重系数有关，权重系数通常由人为给定，具有较大的随意性；2) 风电消纳情况需要通过弃风惩罚系数转化为弃

表 5 不同权重下单目标优化模型的最优解

Tab. 5 Optimal solutions of single-objective optimization model in different weights

$F/\text{元}$	w_1	w_2	$w_1 C_{GH}/\text{元}$	$w_2 C_{AW}/\text{元}$	$E_w/(MW\cdot h)$
89 947 340	0.8	0.2	72 408 144	17 539 196	14 342.05
78 127 078	0.5	0.5	73 700 268	4 426 810	51 806.01
75 887 498	0.2	0.8	75 550 424	337 074	63 490.97

风成本来进行求解，但如何确定合适的弃风惩罚系数具有一定的难度。

综上可知，本文求得的最优折衷解能够从系统整体角度进行统筹考虑，直观、清晰地反映出决策者所关心的系统运行经济性和风电消纳情况，避免了决策过程中的主观臆断性，为调度运行人员提供科学的决策指导。

为了说明高载能负荷对风电消纳的作用，将源荷协调多目标优化模型与不考虑高载能负荷调节的传统优化调度模型进行对比分析，并从源荷调节情况、风电消纳情况和系统运行成本 3 个方面来验证本文模型的有效性。

1) 源荷运行情况。

源荷协调多目标优化模型和传统优化调度模型得到的常规机组和高载能负荷最优方案如图 8 和图 9 所示。

在本文源荷协调优化模型中，当风电出力较大而系统负荷处于低谷时(8~21 时段)，常规电源运行调节能力不足，为提高风电消纳能力，高载能负荷全部投入；当风电出力较小而负荷处于高峰时(35~50 时段)，为满足系统功率平衡和负荷供电需求，部分高载能负荷从电网切除，从而保证常规电

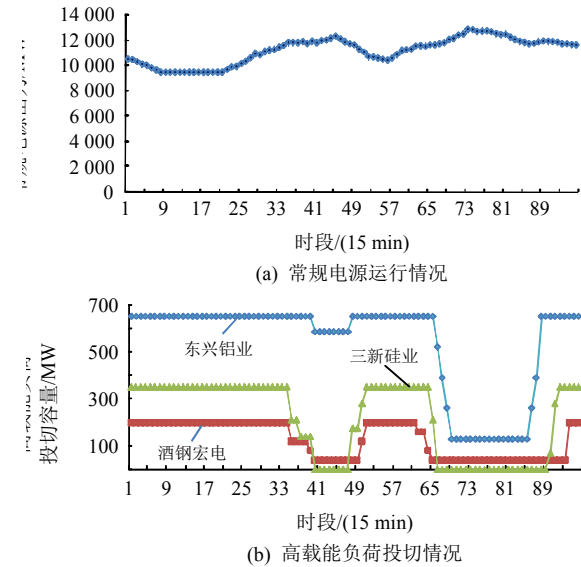


图 8 源荷协调优化模型的优化方案

Fig. 8 Results of source-load coordination optimal model

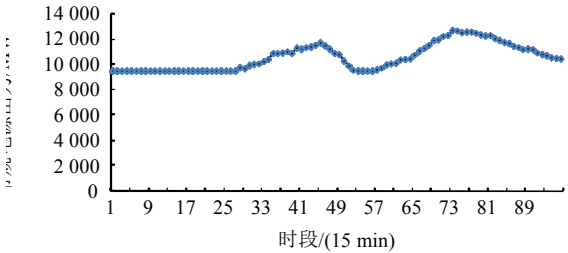


图 9 传统优化调度模型的优化方案

Fig. 9 Results of traditional scheduling optimal model

源运行在较高出力水平，且变化较为平稳。而在传统优化调度模型中，由于缺乏高载能负荷参与调节，常规电源绝大部分时段都运行在最小出力位置附近(1~27 时段和 52~57 时段)，这不仅增加了常规电源的发电成本，也导致常规电源调节能力严重不足，最终被迫弃风。

2) 风电消纳情况。

源荷协调多目标优化模型和传统优化调度模型得到的风电调度出力曲线如图 10 和图 11 所示。

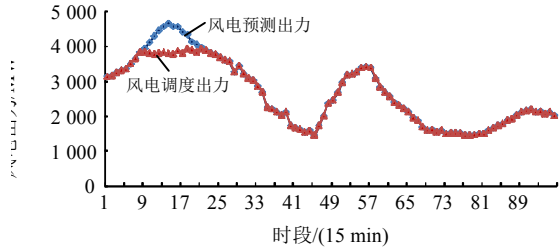


图 10 源荷协调优化模型下的风电调度出力

Fig. 10 Wind dispatching of source-load coordination optimal model

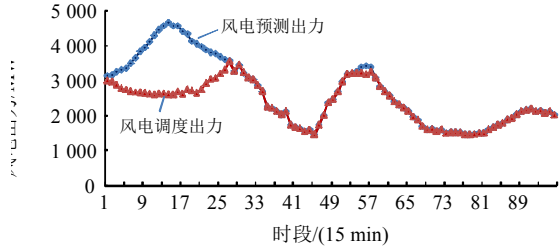


图 11 传统优化调度模型下的风电调度出力

Fig. 11 Wind dispatching of traditional scheduling optimal model

采用传统优化调度模型时，电网消纳的风电电量为 56 796.24 MW·h，风电调度出力方案在 1 天 96 个时段中受限时段多达 31 个，受限电量为 7657.81 MW·h；采用源荷协调优化模型时，电网消纳的风电电量增加到 62 894.79 MW·h，风电调度出力受限时段仅为 13 个，受限电量减少至 1 559.25 MW·h，风电消纳水平得到了显著的提高，有效减少了弃风量。

3) 系统运行成本。

源荷协调多目标优化模型和传统优化调度模

型得到的系统运行成本如表 6 所示。

表 6 2 种优化模型下的系统运行成本

Tab. 6 System operation costs of different optimal model

优化模型	$C_{\text{gen}}/\text{元}$	$C_{\text{high-load}}/\text{元}$	$C_{\text{GH}}/\text{元}$
源荷协调优化模型	71 019 509	3 102 600	74 122 109
传统优化调度模型	75 476 088	0	75 476 088

传统优化调度模型虽然没有高载能负荷调节成本，但由于只采用常规电源对风电波动进行调节，使得常规电源的发电成本远远高于源荷协调优化结果。

综上所述，源荷协调优化模型用较少的高载能负荷调节成本换取了更少的常规电源发电成本和更高的风电消纳水平，是缓解常规电源调节压力、提高系统运行经济性和风电消纳水平的有效手段。

5 结论

1) 针对大规模风电消纳困难和常规电源调节能力不足等问题，将高载能负荷作为调节手段与常规电源共同参与电网优化调度，提出源荷协调运行模式。

2) 在深入研究风电出力特性和源荷运行特性的基础上，揭示了源荷协调运行对风电消纳的影响机理，从理论上证明源荷协调能够有效提高风电消纳水平，减少弃风。

3) 建立了以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标的多目标优化模型，统筹兼顾了源荷协调对风电消纳和经济运行的影响，避免目标之间度量不一致、相互冲突等问题。

4) 采用多目标差分算法对优化模型进行求解，并通过模糊隶属度函数来选取最优折衷解，得到最小源荷调节成本和最大风电消纳水平下的协调优化方案，为调度运行人员提供了科学的决策指导。

参考文献

[1] 白建华，辛颂旭，贾德香，等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源，2010，26(1): 14-17.
Bai Jianhua, Xin Songxu, Jia Dexiang, et al. Study of major questions of wind power digestion and transmission in China[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(1): 14-17(in Chinese).
[2] 张宁，周天睿，段长刚，等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术，2010，34(1): 152-158.
Zhang Ning, Zhou Tianrui, Duan Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System

- Technology, 2010, 34(1): 152-158(in Chinese).
- [3] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4219-4226.
- Yao Mingtao, Hu Zhaoguang, Zhang Ning, et al. Multi-agent response simulation of industrial loads for ancillary services[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4219-4226(in Chinese).
- [4] Callaway D S, Hiskens I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [5] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 1-6.
- Yao Jianguo, Yang Shengchun, Wang Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 1-6(in Chinese).
- [6] 马林东, 葛智平, 张世才, 等. 基于高耗能企业参与电网内风电消纳的主动调峰技术[J]. 电力建设, 2013, 34(10): 102-106.
- Ma Lindong, Ge Zhiping, Zhang Shicai, et al. Active peaking technology based on high energy-consumption enterprise participating in wind power accommodation in power grid[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(10): 102-106(in Chinese).
- [7] 江岳春, 王志刚, 杨春月, 等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2875-2880.
- Jiang Yuechun, Wang Zhigang, Yang Chunyue, et al. Multi-objective optimization strategy of controllable load in microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2875-2880(in Chinese).
- [8] Callaway D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation with application to wind energy[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1389-1400.
- [9] Battistelli C, Baringo L, Conejo A J. Optimal energy management of small electric energy systems including V2G facilities and renewable energy sources[J]. Electric Power Systems Research, 2012(92): 50-59.
- [10] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 17-35.
- Ai Xin, Liu Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science, 2011, 38(3): 17-35(in Chinese).
- [11] Ramteen S, Walter S. Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 516-524.
- [12] Zhong H, Xie L, Xia Q. Coupon incentive-based demand response: Theory and case study[J]. IEEE Transactions on Power System, 2013, 28(2): 1266-1276.
- [13] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(26): 63-69.
- Yang Nan, Wang Bo, Liu Dichen, et al. An integrated supply-demand stochastic optimization method considering large-scale wind power and flexible load [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(26): 63-69(in Chinese).
- [14] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.
- Xiao Chuangying, Wang Ningbo, Ding Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7(in Chinese).
- [15] 辛颂旭, 白建华, 郭雁珩. 甘肃酒泉风电特性研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(12): 16-20.
- Xin Songxu, Bai Jianhua, GuoYanheng. Study on wind power characteristics of Jiuquan wind power base [J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(12): 16-20(in Chinese).
- [16] 丰佳, 周芸菲. 浙江省典型用电行业负荷特性和可中断能力分析[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(4): 48-53.
- Feng Jia, Zhou Yunfei. The analysis of typical load characteristic and the ability of interruptible load of the electrical customer in Zhejiang province[J]. Power DSM, 2011, 13(4): 48-53(in Chinese).
- [17] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
- Yan Gangui, Feng Xiaodong, Li Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 27-35(in Chinese).
- [18] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 风电受限态下的大电网有功实时控制模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 1-6.
- Chen Jianhua, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. An active power real-time control method for large power grid under wind power curtailment[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 1-6(in Chinese).
- [19] 王卿然, 谢国辉, 张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 15-18.
- Wang Qingran, Xie Guohui, Zhang Lizi. An integrated generation-consumption dispatch model with wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 15-18(in Chinese).
- [20] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工

- 程学报, 2013, 33(22): 35-44.
- Wang Beibei, Liu Xiacong, Li Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44(in Chinese).
- [21] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- Zhou Wei, Peng Yu, Sun Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18(in Chinese).
- [22] 王倩倩, 赵彩虹, 马成飞, 等. 基于二进制粒子群算法的可中断负荷优化调度[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2011, 11(2): 19-25.
- Wang Qianqian, Zhao Caihong, Ma Chengfei, et al. Scheduling of interruptible load based on binary particle swarm optimization[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11(2): 19-25(in Chinese).
- [23] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Lei Deming, Yan Xinping. Multi-objective intelligence optimization algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009(in Chinese).
- [24] Robič T, Filipič B. DEMO: Differential evolution for multiobjective optimization[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Heidelberg, Springer: IEEE, 2005: 520-533.
- [25] 邱威, 张建华, 刘念. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.
- Qiu Wei, Zhang Jianhua, Liu Nian. Multi-objective optimal power flow considering environmental factor and voltage stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 190-197(in Chinese).
- [26] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 143-148.
- Liu Wenying, Xie Chang, Wen Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 143-148(in Chinese).
-
- 
刘文颖
- 收稿日期: 2014-10-15。
- 作者简介:
- 刘文颖(1955), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度, liuwenyingls@sina.com;
- 文晶(1987), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制;
- 谢昶(1983), 男, 博士, 研究方向为电力系统在线安全分析。
- (编辑 李泽荣)