

计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度

孙惠娟,宋煜钧,陈 俐,彭春华,姜 治

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为合理利用源侧备用资源,提出基于随机潮流和半不变量法的备用风险评估指标,以准确量化因备用不足而造成的潮流越限风险;为了实现源侧备用资源和网侧可控资源的协同优化,将网侧有载调压变压器和电容器组无功补偿装置纳入决策变量,以系统运行成本最低和系统运行越限风险指标值最小为优化目标,构建计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型;将布朗运动和莱维飞行随机游走机制融入多目标微分进化算法,设计新型的布朗-莱维多目标微分进化算法,对模型进行高效求解。算例分析结果验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词:备用风险性;随机潮流;源网协同;越限风险;安全经济调度

中图分类号:TM761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202312018

0 引言

2021年3月,中央财经委员会提出我国要构建以新能源为主体的新型电力系统,以积极推进能源体系清洁低碳发展;2021年10月,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出构建新型电力系统,推动清洁电力资源大范围优化配置^[1]。预计我国风光发电量占比到2030年将增长到25%以上,到2060年将进一步提升至60%^[2]。随着新能源占比的不断提高,新型电力系统的电源结构将向强不确定性和弱可控性转变,电网运行风险也会显著提升;电力系统需要具备充裕的灵活调节性以应对新能源发电的强随机性与波动性^[3]。在上述背景下,备用资源是对电力系统运行进行灵活调节的重要保障,如何考虑备用风险性以高效利用备用资源,并综合考虑电力系统中的其他灵活资源,实现系统可靠性与经济性之间的平衡,已成为新型能源系统优化调度领域的研究重点。

为了衡量旋转备用容量配置方案的可靠性,大量文献对备用风险评估指标开展了一系列研究。文献[4]基于预想事故集考虑事故发生概率,并提出采用风险量化方法来配置事故备用容量,但该方法存在主观局限性,为解决该局限性问题,有学者基于概率性分析方法衡量备用可靠性;文献[5]将电量不足期望和弃风电量期望纳入综合优化目标中,在此基

础上构建风电接入后系统的旋转备用容量优化模型;文献[6]提出基于条件风险价值的风险成本评估方法,并利用该方法来衡量电动汽车参与备用所带来的风险性;文献[7]提出一种基于无效向上/向下备用容量的评价指标,将无效备用容量期望纳入旋转备用容量优化中,上述指标虽然考虑了由随机因素引起的事故发生的不确定性,但是未能计及事故后果的严重性。综合分析,现有文献大多基于传统备用风险指标评估备用方案的可靠性,这类指标没有计及潮流波动给电力系统带来的风险性,无法量化因备用不足而造成的潮流越限风险,这使旋转备用容量不能随着越限风险的大小而自适应变化,从而使得所制定的备用计划难以平衡经济性与可靠性。

此外,为充分发挥电网源-网-荷协同互动优势,电力系统中的各类资源参与优化调度也成为提升电网可靠性的有效方式之一。文献[8]根据分时电价和可中断负荷对备用方案的综合影响,合理利用用户侧资源来保证电网的稳定运行;文献[9]建立源-荷-储协调互动的电能-备用优化模型,能够快速平抑系统的不平衡功率,并降低系统的弃风量;文献[10]综合考虑发电机、储能、负荷3种灵活资源,构建含风电电力系统的源荷储日前概率优化调度模型。但上述文献很少综合考虑备用不足给系统带来的越限风险以及因潮流波动而引起的功率越限和电压越限,而且很少涉及源侧备用资源和网侧可控资源的协同优化,难以实现电网中各类资源的高效利用。

综上所述,为了提升备用风险评估指标的合理性,以制定兼顾系统经济性和安全性的调度方案,并高效利用新型电力系统中的各类灵活资源,本文提出一种考虑潮流越限的备用风险评估指标,并计及备用风险性,构建新型电力系统安全经济调度模型,

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-05-16

在线出版日期:2023-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52267007,52167009);江西省教育厅科技项目(GJJ210646);江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2021-S451)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52267007,52167009),Jiangxi Education Science and Technology Program(GJJ210646) and Jiangxi Graduate Innovative Specific Foundation(YC2021-S451)

将网侧有载调压变压器和电容器组无功补偿装置纳入决策变量,该模型通过充分挖掘源侧的备用潜力降低功率越限风险,并且利用网段可控元件来降低电压越限风险,从而降低系统的整体越限风险。由于上述源网协同安全经济调度模型具有非凸非线性、多目标耦合等特点,在利用传统多目标优化算法进行求解时,通常存在因进化后期种群失去个体多样性而导致进化趋于停滞并陷入早熟的现象,为此,本文借鉴海洋掠食者高效的随机游走觅食行为^[11],综合布朗运动和莱维飞行2种随机游走机制,并与高效的微分进化算法相融合,构造出一种新型的布朗-莱维多目标微分进化算法。该算法可通过布朗运动和莱维飞行2种随机游走机制进行良性互补,在算法寻优过程中对进化个体搜索区域进行反复性的高效调整,使得在进化过程中的个体能保持多样性,从而有效克服进化早熟的问题,最终实现对计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度的高效深度寻优。

1 计及随机潮流的备用风险评估指标

为准确量化可再生能源大量并网系统的备用风险性,本文提出一种基于随机潮流和半不变量法的备用风险评估指标。

1.1 基于半不变量的随机潮流计算

由于负荷、风机与光伏发电出力具有较强的随机性,节点的注入功率具有波动性,因此系统的潮流是随机的。随机潮流可通过已知功率注入随机变量获取未知潮流状态变量概率分布,进而充分考虑节点注入功率波动性的影响,比传统的确定性潮流计算能更深刻且全面地反映系统的运行特性,可更准确地对含可再生能源电力系统的薄弱点进行分析,并揭示电力系统风险^[12]。

半不变量法是一种求解随机潮流,并得出节点电压与支路功率概率分布的有效方法,已被成功应用于解决含可再生能源电力系统的随机潮流计算问题^[12],其中半不变量可以由不高于相应阶次的随机变量各阶矩求得^[13]。本文以风电出力的半不变量为例,说明各随机变量半不变量的求取流程。

通常采用威布尔分布近似描述风速概率密度函数^[14],即:

$$f(v_t) = \frac{k_t}{c_t} \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t-1} \exp \left[- \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t} \right] \quad (1)$$

式中: $f(v_t)$ 为 t 时段风速 v_t 对应的概率密度函数; k_t 为 t 时段威布尔分布的形状参数; c_t 为 t 时段威布尔分布的尺度参数。

风速 v_t 与风电机组输出功率 $P_{w,t}$ 的关系为:

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0 & v_t < v_{in}, v_t > v_{out} \\ \frac{v_t^3 - v_{in}^3}{v_{WN}^3 - v_{in}^3} P_{WN} & v_{in} \leq v_t < v_{WN} \\ P_{WN} & v_{WN} \leq v_t \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{in} 为风电机组切入风速; v_{out} 为风电机组切出风速; v_{WN} 为风电机组额定风速; P_{WN} 为风电机组额定输出功率。

风电出力的半不变量由蒙特卡罗抽样方法求得^[15],风电出力的各阶原点矩可表示为:

$$\phi_\xi^w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^\xi \quad \xi = 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中: ϕ_ξ^w 为风电出力的 ξ 阶原点矩, ξ 为阶数; N 为风电出力样本数; x_i^ξ 为第 i 个风电出力样本。

根据各阶半不变量与原点矩的关系求得风电出力的各阶半不变量^[13],即:

$$\begin{cases} \lambda_1^w = \phi_1^w \\ \lambda_{\xi+1}^w = \phi_{\xi+1}^w - \sum_{j=1}^{\xi} C_\xi^j \phi_j^w \lambda_{\xi-j+1}^w \end{cases} \quad \xi = 1, 2, \dots \quad (4)$$

式中: λ_1^w 、 $\lambda_{\xi+1}^w$ 为风电出力的各阶半不变量; ϕ_j^w 为风电出力的 j 阶原点矩; C_ξ^j 为从 ξ 个不同元素中取 j 个元素的组合数。

光伏出力和负荷的半不变量的推导表达式如附录A式(A1)~(A3)所示。

本文根据文献[12],在求得上述风光荷半不变量后,将随机变量期望值代入模型,采用牛顿-拉夫逊法进行确定性潮流计算,获取基准点处最后一次参与迭代的雅可比矩阵,并将其逆矩阵作为节点注入功率与状态变量之间的灵敏度矩阵,由式(5)得到支路功率与节点注入功率之间的灵敏度矩阵 K_0 。

$$K_0 = G_0 J_0^{-1} \quad (5)$$

式中: G_0 为支路功率对状态变量的导数; J_0 为基准点处对应的雅可比矩阵。

结合灵敏度矩阵和各节点的各阶半不变量求得状态变量以及支路功率的各阶半不变量,并将其与Cornish-Fisher级数相结合,进一步得到节点电压及支路功率的概率密度函数和分位函数,具体流程可参考文献[12]。

1.2 备用风险评估指标

为准确量化因备用配置不合理而造成的潮流越限风险,由于随机潮流是安全稳定分析的重要工具,比传统确定性潮流计算更能计及各种不确定因素,可利用随机潮流给出系统稳态运行时状态变量的概率分布来充分反映系统的运行特性,因此,本文基于随机潮流计算构建备用风险评估指标。以功率越限风险指标为例,说明风险评估流程。

支路功率的概率密度曲线如附录A图A1所示。图中: $P_{m,t}$ 为 t 时段支路 m 的功率; $P_m^{\max}$ 为支路 m 的功

率上限; $f(P_{m,t})$ 为 t 时段支路 m 功率对应的概率密度函数。支路功率越限风险指标可由支路功率超过该支路允许传输功率上限的概率及其严重度表示^[16], t 时段支路 m 的功率越限风险指标 $\delta_{m,t}^{\text{PVR}}$ 为:

$$\delta_{m,t}^{\text{PVR}} = \begin{cases} 0 & P_{m,t} \leq P_m^{\max} \\ \int_{P_m^{\max}}^{P_{m,t}} (P_{m,t} - P_m^{\max}) f(P_{m,t}) dP_{m,t} & P_{m,t} > P_m^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

根据文献[17], 可通过综合考虑系统整体风险(平均风险)和最薄弱环节风险(最大风险)构造风险指标函数, 由式(7)和式(8)可分别求得系统 t 时段功率越限风险和功率越限风险指标。

$$\delta_t^{\text{SPVR}} = \frac{1}{N^{\text{line}}} \sum_{m=1}^{N^{\text{line}}} \delta_{m,t}^{\text{PVR}} + \max_{m=1, 2, \dots, N^{\text{line}}} \{\delta_{m,t}^{\text{PVR}}\} \quad (7)$$

$$\delta^{\text{SPVR}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \delta_t^{\text{SPVR}} + \max_{t=1, 2, \dots, T} \{\delta_t^{\text{SPVR}}\} \quad (8)$$

式中: δ_t^{SPVR} 为 t 时段的系统功率越限风险; δ^{SPVR} 为系统功率越限风险指标; N^{line} 为系统支路数; T 为优化周期的时段数。

本文利用上述越限风险指标来协同优化机组出力及对应的备用容量, 降低潮流越限风险, 从而保证系统安全稳定运行, 具体流程如附录A图A2所示。

2 源网协同优化调度模型

为高效利用电网的备用资源和网侧可控资源, 本文以系统运行成本最低和系统运行越限风险指标值最小为优化目标, 并协同优化网侧可控变量, 构建计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型。

2.1 目标函数

1) 系统运行成本。

系统运行成本由电网购买常规机组出力的电量成本和备用容量成本组成, 系统运行成本 F_1 最小化的目标函数为:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_c} (d_i + g_i P_{i,t} + h_i P_{i,t}^2 + \alpha_i U_{i,t} + \beta_i D_{i,t}) \quad (9)$$

式中: N_c 为常规机组数目; $P_{i,t}$ 为 t 时段常规机组 i 的有功出力; d_i, g_i, h_i 为常规机组 i 的发电燃料成本系数; $U_{i,t}, D_{i,t}$ 分别为 t 时段常规机组 i 的正、负旋转备用容量; α_i, β_i 分别为常规机组 i 预留正、负旋转备用容量的成本系数。

2) 系统运行越限风险指标。

为了实现源侧备用资源和网侧可控资源的协同优化, 系统运行越限风险指标 F_2 最小化的目标函数为:

$$\min F_2 = \delta^{\text{SVR}} \quad (10)$$

$$\delta^{\text{SVR}} = \delta^{\text{SVVR}} + \delta^{\text{SPVR}} \quad (11)$$

式中: δ^{SVR} 为系统运行越限风险指标; δ^{SVVR} 为系统电压越限风险指标, 其推导过程与 δ^{SPVR} 类似, 此处不再赘述。

2.2 约束条件

本文不仅对系统源侧各常规发电机组出力以及旋转备用容量进行优化, 还对网侧可控资源(包括变压器变比、无功补偿容量)进行协同优化, 以进一步降低系统越限风险。

1) 系统潮流约束, 即:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{D}} = u_{i,t} \sum_{j=1}^{N_E} u_{j,t} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{i,t}^{\text{W}} = u_{i,t} \sum_{j=1}^{N_E} u_{j,t} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{D}}, Q_{i,t}^{\text{W}}$ 分别为 t 时段节点 i 注入的有功和无功功率; $u_{i,t}, u_{j,t}$ 分别为 t 时段节点 i, j 的电压; N_E 为系统节点总数; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 之间支路的电导和电纳; δ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电压相角差。

2) 系统安全约束, 即:

$$\begin{cases} u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max} \\ P_{m,t} \leq P_m^{\max} \\ I_m \leq I_m^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_i 为节点 i 的电压, $u_i^{\max}, u_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压的上、下限; $I_m, I_m^{\max}$ 分别为流过支路 m 的电流及其上限。

3) 机组相关约束, 即:

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

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (15)$$

$$P_{i,t-1} - r_i^{\text{down}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t-1} + r_i^{\text{up}} \quad (16)$$

$$0 \leq U_{i,t} \leq \min(P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}, r_i^{\text{up}} \Delta t) \quad (17)$$

$$0 \leq D_{i,t} \leq \min(P_{i,t} - P_{i,t}^{\min}, r_i^{\text{down}} \Delta t) \quad (18)$$

式中: $Q_{i,t}$ 为 t 时段常规机组 i 的无功出力; $P_{i,t}^{\max}, P_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段常规机组 i 的有功出力上、下限; $Q_{i,t}^{\max}, Q_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段常规机组 i 的无功出力上、下限; $r_i^{\text{up}}, r_i^{\text{down}}$ 分别为常规机组 i 的上升、下降爬坡速率; Δt 为时间间隔。

4) 系统备用容量约束, 即:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_c} U_{i,t} \geq P_{L,t} - P_{W,t} - P_{S,t} - \sum_{i=1}^{N_c} P_{i,t} \\ \sum_{i=1}^{N_c} D_{i,t} \geq \sum_{i=1}^{N_c} P_{i,t} - P_{L,t} + P_{W,t} + P_{S,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{L,t}$ 为 t 时段的系统负荷; $P_{S,t}$ 为 t 时段的光伏有功出力。

5) 风电、光伏出力约束, 即:

$$0 \leq P_{W,t} \leq P_{W,t}^{\max} \quad (20)$$

$$0 \leq Q_{W,t} \leq Q_{W,t}^{\max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{S,t} \leq P_{S,t}^{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq Q_{S,t} \leq Q_{S,t}^{\max} \quad (23)$$

式中: $Q_{W,t}, Q_{S,t}$ 分别为 t 时段的风电、光伏无功出力; $P_{W,t}^{\max}, P_{S,t}^{\max}$ 分别为 t 时段风电、光伏有功出力的上限;

$Q_{W,t}^{\max}$ 、 $Q_{S,t}^{\max}$ 分别为 t 时段风电、光伏无功出力的上限。

6) 网侧可控元件约束, 即:

$$T_i^{\min} \leq T_{i,t} \leq T_i^{\max} \quad (24)$$

$$Q_{Cn}^{\min} \leq Q_{Cn,t} \leq Q_{Cn}^{\max} \quad (25)$$

$$Z_{h,t} \leq Z_h^{\max} \quad (26)$$

式中: $T_{i,t}$ 为 t 时段第 i 台有载调压变压器的变比; $T_i^{\max}$ 、 $T_i^{\min}$ 分别为第 i 台有载调压变压器变比上、下限; $Q_{Cn,t}$ 为 t 时段第 n 台电容器组无功补偿容量; $Q_{Cn}^{\max}$ 、 $Q_{Cn}^{\min}$ 分别为第 n 台电容器组无功补偿容量上、下限; $Z_{h,t}$ 为第 h 台无功电压设备在前 t 个时段的总操作次数; $Z_h^{\max}$ 为第 h 台无功电压设备操作次数上限。

3 求解算法

鉴于构建的计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型具有非凸非线性、多目标耦合等特点, 本文提出一种新型布朗-莱维多目标微分进化 (Brownian-Levy multi-objective differential evolution, BL-MODE) 算法对其进行高效求解。

3.1 布朗-莱维随机游走机制

布朗运动和莱维飞行是 2 种具有不同特征的代表性随机游走模式, 其中布朗运动的步长分布为正态分布, 莱维飞行的每一步方向完全随机且各向同性。莱维飞行轨迹和布朗运动轨迹分别如附录 A 图 A3、A4 所示。由图可知, 莱维飞行可实现大范围的搜索, 但是不够细致, 而布朗运动可在一定范围内局部搜索, 本文将 2 种机制的特性进行有机融合, 提出一种布朗-莱维随机游走机制, 能够使得运动过程中的个体实现大范围的细致搜索。

3.2 布朗-莱维微分进化机制

本文综合布朗运动和莱维飞行 2 种随机游走机制, 并将其与高效的微分进化算法相融合, 形成一种新型的布朗-莱维微分进化机制。

微分进化算法的具体流程可参考文献[18], 其变异机制可由式(27)表示。

$$\begin{cases} X_{i,g} = [x_{i,g}^1, x_{i,g}^2, \dots, x_{i,g}^d] \\ Y_{i,g+1} = X_{B,g} + F(X_{f_1,g} - X_{f_2,g}) \end{cases} \quad (27)$$

式中: $X_{i,g}$ 为进化 g 代的第 i 个个体向量, 向量维数为 d ; $x_{i,g}^1, x_{i,g}^2, \dots, x_{i,g}^d$ 为向量 $X_{i,g}$ 中包含的元素; $Y_{i,g+1}$ 为由变异操作得到的中间个体; $X_{B,g}$ 为进化 g 代的最佳个体向量, 将其选为变异基向量; F 为变异尺度因子; f_1, f_2 均为随机选取的个体编号, 且 $i \neq f_1 \neq f_2 \neq B$, $X_{f_1,g} - X_{f_2,g}$ 为变异差分项。

为避免出现微分进化寻优过程中因进化方向太过单一而导致寻优搜索遍历性不高的问题, 本文在微分进化过程中引入上述兼具布朗运动和莱维飞行特性的随机游走机制, 构造如式(28)所示的变异操作机制。

$$\begin{cases} X_{i,g} = [x_{i,g}^1, x_{i,g}^2, \dots, x_{i,g}^d] \\ Y_{i,g+1} = X_{B,g} + FS \end{cases} \quad (28)$$

$$S = \begin{cases} S^{\text{BM}} & |X_{f_1,g} - X_{f_2,g}| \geq \varepsilon \\ S^{\text{LF}} & |X_{f_1,g} - X_{f_2,g}| < \varepsilon \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} S^{\text{BM}} \sim N(X_{f_1,g} - X_{f_2,g}, \sigma_{\text{BM}}^2) \\ S^{\text{LF}} = [s_1, s_2, \dots, s_d] \\ s_k = \mu_k^{\text{LF}} / |\theta_k^{\text{LF}}|^{\frac{1}{\beta}} \quad k=1, 2, \dots, d \end{cases} \quad (30)$$

式中: S 为布朗-莱维随机游走步长; S^{BM} 为布朗运动步长向量, 服从均值为微分进化变异差分项的正态分布; S^{LF} 为莱维飞行步长向量, 向量维数为 d ; $s_1, s_2, \dots, s_d$ 为向量 S^{LF} 中包含的元素; ε 为莱维飞行阈值; σ_{BM}^2 为布朗运动步长的方差; 参数 $\beta=1.5$; μ_k^{LF} 、 θ_k^{LF} 分别为莱维飞行步长向量第 k 维的参数 I 和参数 II, 均服从正态分布, 如式(31)所示。

$$\begin{cases} \mu_k^{\text{LF}} \sim N(0, \sigma_{\mu}^2), \theta_k^{\text{LF}} \sim N(0, \sigma_{\theta}^2) \\ \sigma_{\mu} = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{\frac{1}{\beta}}, \sigma_{\theta} = 1 \end{cases} \quad (31)$$

式中: σ_{μ} 、 σ_{θ} 分别为 μ_k^{LF} 、 θ_k^{LF} 的正态分布标准差。

在布朗-莱维微分进化机制下, 在局部搜索阶段, 新的布朗-莱维微分进化个体在以当前最优个体向量为中心的高斯超椭球内生成, 布朗运动步长服从均值为微分进化变异差分项的正态分布。当变异差分项趋于 0 而小于莱维飞行阈值时, 进化个体会立即主动转为莱维飞行变异模式, 迅速跳出局部最优, 进入深度空间搜索; 当变异差分项大于莱维飞行阈值时, 进化个体随即转为布朗运动模式, 展开精细搜索的“光盘”行动。基于布朗-莱维微分进化机制的良性循环可高效实现深度寻优, 过程如附录 A 图 A5 所示。

3.3 多目标优化求解过程

本文结合布朗-莱维微分进化机制与非劣排序操作^[19], 构造出 BL-MODE 算法, 基于 BL-MODE 算法的源网协同安全经济调度模型求解流程如附录 B 图 B1 所示。具体求解步骤如下:

1) 输入各分布参数以及风光火电机组和系统相关数据, 设置算法参数, 并完成种群 (由随机生成的各调度方案的个体组成) 初始化;

2) 基于半不变量法求解随机潮流, 得到各 PQ 节点电压及各支路功率的概率密度曲线, 优化求解各个体的系统运行成本和系统运行越限风险指标值;

3) 通过帕累托非劣排序操作得到各个体的等级和拥挤距离, 对所有个体进行排序;

4) 采用 BL-MODE 算法得到子代种群;

5) 重复步骤 2)~4), 不断迭代直至达到最大迭

代次数 $G_{\max}$;

6)利用文献[20]中基于最短归一化距离的多目标优化决策方法来选取最优折中解,获取最佳的源网协同安全经济调度方案。

4 算例分析

本文以附录C图C1所示的改进IEEE 30节点输电网为例进行仿真计算。在改进系统中,将原系统节点13处的常规机组改为光伏电站,并在节点22处接入风电场,各时段风光出力如图1所示。系统中含有4台变压器和9台无功补偿设备,各变压器均有9个可调分接头,变比调节范围为 $1 \pm 4 \times 2.5\%$,各无功补偿设备由10组并联电容器组成,每组电容器容量为500 kvar。系统中各常规机组旋转备用成本系数如附录C表C1所示,各时段负荷需求如附录C图C2所示,系统其他参数参考文献[21]。本文设定备用优化时段的时间尺度为1 h,周期为24个时段,设定BL-MODE算法的种群规模为100,交叉概率因子为0.8,变异尺度因子为0.45,莱维飞行阈值为0.000 1,布朗运动步长方差为1,最大迭代次数为500。

4.1 各时段越限风险及机组出力调度结果

为验证本文方法的合理性,结合各时段的风光出力和系统运行越限风险指标值进行分析,如图1所示。以图C1中常规机组 $G_1 \sim G_5$ 的向上旋转备用容量为例,分析旋转备用容量在各常规机组间的分配情况,如图2所示。各时段的风光出力结果如附录D图D1所示。

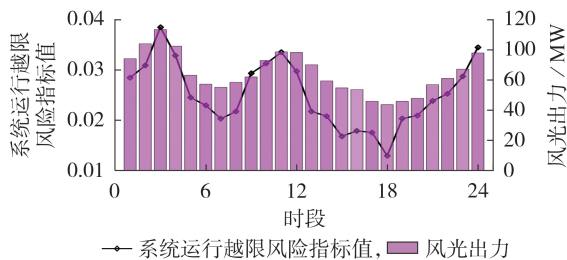


图1 各时段系统运行越限风险指标值

Fig.1 Over-limit risk index value of system operation in each period

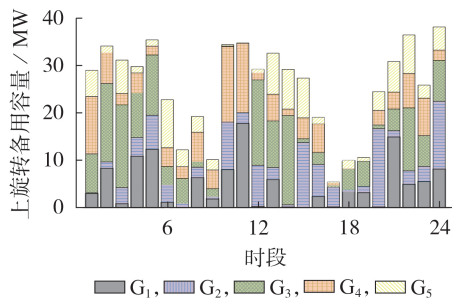


图2 各常规机组的向上旋转备用容量

Fig.2 Positive spinning reserve capacity of each conventional unit

由图1可知,各时段系统运行越限风险指标值的变化趋势与风光出力的变化趋势基本吻合,这是由于风光出力随机性引起的系统潮流波动性大幅升高,导致系统运行越限风险指标值明显增大;针对上述情况,常规机组 G_3 由于备用成本较低且爬坡速率较快,承担了较多的旋转备用容量配置任务,且在系统潮流波动较大的时段能够及时调整出力,有效降低系统潮流越限风险,而常规机组 G_4 由于备用成本较高以及调节速度较慢,承担了较少的旋转备用容量配置任务,这证明了本文模型可依据不同的系统运行越限风险指标值灵活安排旋转备用。

4.2 不同旋转备用优化方法对比

为验证本文方法处理不确定性旋转备用容量优化问题的优越性,将本文方法与固定比例法(比例一般取系统负荷的10%)的优化结果进行对比,不同方法的系统运行成本和系统运行越限风险指标以及旋转备用容量优化结果分别如表1、图3所示。

表1 不同方法的系统运行成本和系统运行越限风险指标

Table 1 System operation cost and system operation over-limit risk index of different methods

单位:\$

方法	F_1	F_2
固定比例法	73 372.14	0.125 6
本文方法	75 659.14	0.063 1

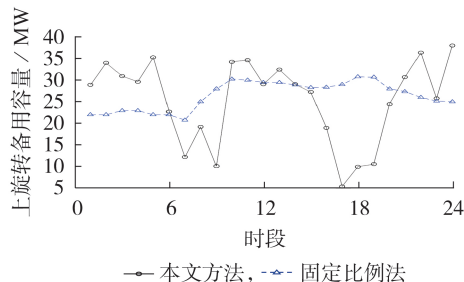


图3 不同方法的旋转备用容量优化结果

Fig.3 Spinning reserve capacity optimization results of different methods

由图3可知:固定比例法没有考虑系统潮流的随机性,导致部分时段配置的备用容量过多;本文方法更能自适应地应对系统潮流越限风险的变化,在系统潮流越限风险较小的时段适当减少预留的备用容量,而在潮流越限风险较大的时段增加预留的备用容量。同时,由表1可知,相较于固定比例法,本文方法增加了较少的运行成本,但大幅降低了系统运行越限风险指标值,避免了发电资源的浪费。由此可见,若要降低系统的越限风险性,则必须以牺牲一定的经济性为代价。本文所提方法在保证系统安全运行的前提下,提高了整体的高效性和可靠性。

4.3 节点电压概率密度曲线对比

为进一步展示本文计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度对节点电压概率密度曲线以及各节点电压分布的改善效果,以时段11节点21的电压概率密度曲线为例,将本文方法与固定比例法的结果进行对比,如图4所示(图中电压为标么值)。以该时段各节点电压水平为例,将本文方法与固定比例法进行对比,结果如附录D图D2所示,各时段网侧各可控元件优化结果如附录D表D1所示,各PQ节点的电压幅值如附录D表D2所示。

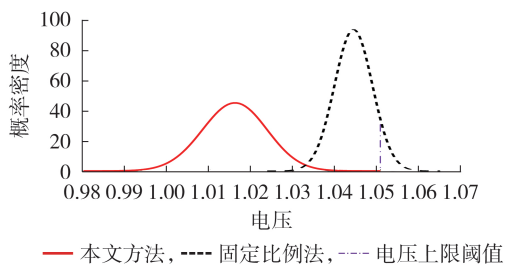


图4 节点21的电压概率密度曲线

Fig.4 Probability density curve of Bus 21 voltage

由图4可知,固定比例法的节点21电压区间上限超过1.05 p.u,一旦系统发生扰动,就会破坏系统自身的安全稳定运行,而本文方法将电压波动范围有效地控制在合理范围内,显著降低了节点电压越限风险。同时,由图D2和表A1可知,在时段11,风电出力的不确定性导致节点21的电压水平较高,因此节点21处的电容器投入无功补偿量较少,而节点29的电压水平较低,为维持正常电压,节点29处的电容器投入无功补偿量较多。不难看出,本文方法在电压水平总体分布以及电压偏差方面均优于固定比例法,这是由于源网协同调度模型充分利用网侧可控资源,使得电网传输电力的灵活性增强,从而使系统安全裕度提高,有助于降低系统运行的风险性。

4.4 BL-MODE算法寻优性能验证

为了验证BL-MODE算法的优越性,本文分别采用较为常用的改进型非劣排序遗传算法^[22](non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)、多目标微分进化(multi-objective differential evolution, MODE)和BL-MODE求解计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型。将3种算法的种群规模均设置为100,最大迭代次数设置为800。3种算法求解得到的帕累托前沿如图5所示,各算法的计算耗时如附录D表D3所示。

由图5和表D3可知,本文所提BL-MODE算法得到了更为优质的折中解且求解时间最短,这是由于该算法在微分进化过程中引入兼具布朗运动和莱维飞行特性的随机游走机制,很好地平衡了全局搜索和局部搜索能力,更好地保持了种群多样性,从而

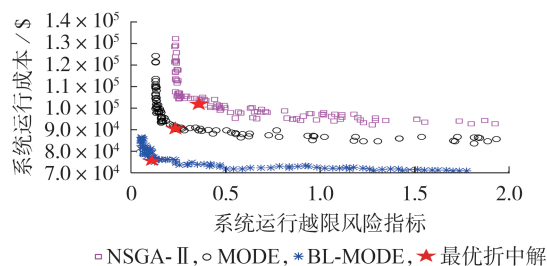


图5 3种算法的Pareto前沿对比

Fig.5 Comparison of Pareto fronts among three methods

在寻优速度、寻优深度以及Pareto前沿完整性和准确性方面均优于NSGA-II和MODE算法。

4.5 适用性验证

为验证本文方法的适用性,采用改进的IEEE 57节点系统算例进一步进行仿真计算,该系统包含14台抽头变压器,在节点18、25、53接入无功补偿设备,系统中各常规机组参数、旋转备用成本系数等可参考文献[23-24]。在该系统的节点27—29接入风电场,在节点47、49接入光伏电站,风电场和光伏电站相关参数见文献[20]。各时段有功负荷需求以及风光出力如附录E图E1所示。计算条件和算法参数设定与4.4节算例相同。

将本文方法与固定比例法的结果进行对比,不同方法的系统运行成本和系统运行越限风险指标以及旋转备用容量优化结果分别如表2和图6所示。

表2 IEEE 57节点系统的系统运行成本和系统运行越限风险指标

Table 2 System operation cost and system operation over-limit risk index of IEEE 57-bus system
单位:\$

方法	F_1	F_2
固定比例法	152743.09	0.2764
本文方法	155256.41	0.1839

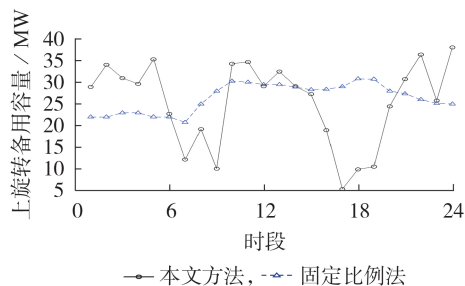


图6 IEEE 57节点系统的旋转备用容量优化结果

Fig.6 Spinning reserve capacity optimization results of IEEE 57-bus system

由图6可知,固定比例法在部分时段的备用容量配置过多,本文方法更能自适应地应对系统潮流越限风险的变化,更能合理地配置旋转备用,从而高效利用备用资源。另外,由表2可知,相较于固定比

例法,本文方法虽然牺牲了一定的经济性,但在保证系统安全运行的前提下,实现了调度方案的综合性最优,这是由于本文模型准确量化了备用不足导致的越限风险并将网段可控元件纳入决策变量,进而能合理配置源侧备用资源和网侧可控资源,有效降低系统的功率越限风险和电压越限风险,实现了电网中各类灵活资源的高效利用,降低了调度整体风险性。

5 结论

本文提出一种基于随机潮流和半不变量法的系统越限风险评估指标,并以系统运行成本和系统运行越限风险指标值为优化目标,构建计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型,可高效利用备用资源并综合考虑电力系统中的其他灵活资源,兼顾系统的经济性和安全性。同时,采用融合布朗运动和莱维飞行特性随机游走机制的BL-MODE算法高效求解该模型。得到如下结论:

1)为充分挖掘源侧备用潜力,本文提出一种计及潮流越限的备用风险评估指标,以准确量化因备用不足而造成的越限风险,进而充分考虑潮流波动所带来的运行风险,使得旋转备用能够随着越限风险的大小而自适应变化,得到了更为准确且合理的备用方案,从而实现了源侧备用资源的高效利用;

2)计及备用风险性的新型电力系统源网协同安全经济调度模型充分调用源侧备用资源和网侧可控资源,有效提升了电网的可靠性,实现了更具安全性的源网协同优化调度方案;

3)BL-MODE算法比传统多目标智能优化算法有更好的寻优性能,得到了较高质量的帕累托前沿,使得各目标向量更能均匀且完整地分布在帕累托前沿上。

本文计及随机潮流的不确定性建模及多目标优化算法思想可拓展至源-网-荷-储协调优化调度中。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 舒印彪,张丽英,张运洲,等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [3] 刘映尚,马骞,王子强,等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1694-1706.
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1706.
- [4] 周霞,李威,唐静,等. 基于风险量化的事故备用容量协调分配方法[J]. 电网技术,2015,39(7):1927-1932.
ZHOU Xia, LI Wei, TANG Jing, et al. Risk quantification based coordinative allocation of emergency reserve [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1927-1932.
- [5] 艾小猛,塔伊尔江·巴合依,杨立滨,等. 基于场景集的含风电电力系统旋转备用优化[J]. 电网技术,2018,42(3):835-841.
AI Xiaomeng, TAIERJIANG B, YANG Libin, et al. Spinning reserve optimization of wind power system based on scenario set [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 835-841.
- [6] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰,等. 基于充电行为预测的电动汽车参与系统调频备用:容量挖掘与风险评估[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):18-26.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie, et al. EVs' participation in system frequency regulation reserve based on charging behavior prediction: capacity mining and risk evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 18-26.
- [7] 张丹宁,徐箭,孙元章,等. 含风电电力系统日前备用动态评估与优化[J]. 电网技术,2019,43(9):3252-3260.
ZHANG Danning, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Day-ahead dynamic estimation and optimization of reserve in power systems with wind power [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3252-3260.
- [8] 陈厚合,王杨,张儒峰,等. 考虑源荷协调的风电并网系统旋转备用容量优化[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):185-192.
CHEN Houhe, WANG Yang, ZHANG Rufeng, et al. Spinning reserve capacity optimization considering coordination between source and load for power system with wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 185-192.
- [9] 鄢发齐,李姚旺,汪旸,等. 含CAES和多类型柔性负荷的电力系统多时间尺度电能-备用联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):73-81.
YAN Faqi, LI Yaowang, WANG Yang, et al. Multi-time scale joint optimal dispatch of energy and reserve in power system with CAES and multi-type flexible load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 73-81.
- [10] 张紫菁,张芳,姚文鹏. 基于风电出力概率预测模型的源荷储日前概率优化调度[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):190-197.
ZHANG Zijing, ZHANG Fang, YAO Wenpeng. Day-ahead probabilistic optimal dispatching of source-load-storage based on probabilistic prediction model of wind power output [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 190-197.
- [11] HUMPHRIES N E, QUEIROZ N, DYER J R, et al. Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators [J]. Nature, 2010, 465(7301): 1066-1069.
- [12] 陈朝宽,张靖,何宇,等. 基于Cornish-Fisher级数和半不变量法的含光伏配电系统风险评估[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):91-96.
CHEN Chaokuan, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 91-96.
- [13] 廖星星,吴奕,卫志农,等. 基于GMM及多点线性半不变量法的电-热互联综合能源系统概率潮流分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):55-62.
LIAO Xingxing, WU Yi, WEI Zhinong, et al. Probabilistic power flow analysis of integrated electricity-heat energy system based on GMM and multi-point linear cumulant method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 55-62.
- [14] 颜湘武,徐韵,李若瑾,等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报,2019,34(10):2022-2037.

- YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [15] 石东源, 蔡德福, 陈金富, 等. 计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 104-113.
- SHI Dongyuan, CAI Defu, CHEN Jinfu, et al. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method considering correlation between input variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 104-113.
- [16] 谢桦, 陈昊, 邓晓洋, 等. 基于改进K-means聚类技术与半不变量法的电-气综合能源系统运行风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 59-69, 374.
- XIE Hua, CHEN Hao, DENG Xiaoyang, et al. Electric-gas integrated energy system operational risk assessment based on improved K-means clustering technology and semi-invariant method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 59-69, 374.
- [17] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328-6338.
- FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6328-6338.
- [18] PENG C H, XIONG Z S, ZHANG Y, et al. Multi-objective robust optimization allocation for energy storage using a novel confidence gap decision method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107902.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] 彭春华, 刘兵, 孙惠娟. 基于分类不确定性集合的电力系统环境经济鲁棒调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2202-2212, 2399.
- PENG Chunhua, LIU Bing, SUN Huijuan. Environmental / economic / robust dispatch of power system based on classification uncertainty sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2202-2212, 2399.
- [21] 温泽之, 彭春华, 孙惠娟. 计及风电置信风险成本的多目标最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 36-43.
- WEN Zezhi, PENG Chunhua, SUN Huijuan. Multi-objective optimal power flow calculation considering wind power confidence risk cost[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 36-43.
- [22] 彭咏泉, 林湘宁, 陈乐, 等. 计及全寿命周期效益的超导故障限流器全局协同配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6275-6288.
- PENG Yongquan, LIN Xiangning, CHEN Le, et al. Research on global cooperative configuration of superconducting fault current limiter considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6275-6288.
- [23] 杨明, 罗隆福. 计及风电与负荷不确定性的电力系统无功随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 134-141.
- YANG Ming, LUO Longfu. Stochastic optimal reactive power dispatch in a power system considering wind power and load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 134-141.
- [24] 刘硕, 王剑晓, 宋懿洋, 等. 主辅电力市场外部性价值优化定价方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 11-19.
- LIU Shuo, WANG Jianxiao, SONG Yiyang, et al. Externality value based optimal pricing method for energy and ancillary service markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 11-19.

作者简介:

孙惠娟(1982—), 女, 副教授, 研究方向为智能电网优化调度与配电网规划(E-mail: sunhuijuan1982@163.com);
宋煜钧(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统备用优化(E-mail: 1493945721@qq.com);
彭春华(1973—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统优化运行、微电网优化运行与控制(E-mail: chinapch@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Source-grid coordination security and economic dispatching of new power system considering reserve risk

SUN Huijuan, SONG Yujun, CHEN Li, PENG Chunhua, JIANG Zhi

(School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to rationally use the reserve resources at the source side, a reserve risk assessment index based on stochastic power flow and semi-invariant method is proposed to accurately quantify the power flow over-limit risk caused by insufficient reserve. In order to realize the cooperative optimization of reserve resources at the source side and the controllable resources at the network side, the on-load tap changer and reactive power compensation device at the network side are included into the decision variables, and a source-grid coordination security and economic dispatching model of new power system considering reserve risk is constructed, which takes the minimum system operating cost and the minimum system operating over-limit risk index value as the optimal objects. Brownian motion and Levy flight random walk mechanism are integrated into the multi-objective differential evolution algorithm, and a novel Brownian-Levy multi-objective differential evolution algorithm is designed to efficiently solve the model. The effectiveness and superiority of the proposed method are verified by an example analysis.

Key words: reserve risk; stochastic power flow; source-grid coordination; over-limit risk; security and economic dispatching

附录 A

a) 光伏出力的半不变量

光照强度通常近似服从贝塔分布，则光伏输出功率概率密度函数可表示为：

$$f(P_{S,t}) = \frac{\Gamma(a_t + b_t)}{\Gamma(a_t)\Gamma(b_t)} \left(\frac{P_{S,t}}{P_N}\right)^{a_t-1} \left(1 - \frac{P_{S,t}}{P_N}\right)^{b_t-1} \quad (A1)$$

式中：\$P_{S,t}\$, \$P_N\$ 为 \$t\$ 时段的光伏有功出力 and 额定功率，

\$\Gamma(\cdot)\$ 为伽玛函数；\$a_t\$, \$b_t\$ 为 \$t\$ 时段 Beta 分布的形状参数；光伏出力半不变量具体计算过程与风电半不变量类似，此处不予赘述。

b) 负荷的半不变量

电力负荷近似服从正态分布，其概率密度函数可表示为：

$$f(P_{L,t}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_{L,t}}} \exp\left[-\frac{(P_{L,t} - \mu_{P_{L,t}})^2}{2\sigma_{P_{L,t}}^2}\right] \quad (A2)$$

式中：\$P_{L,t}\$ 为 \$t\$ 时段的系统有功负荷需求；\$\mu_{P_{L,t}}\$ 和 \$\sigma_{P_{L,t}}^2\$

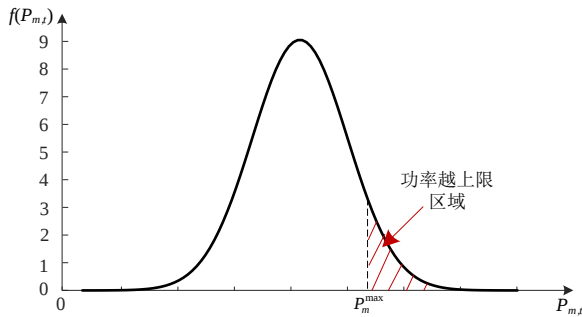
分别为 \$t\$ 时段有功负荷的期望值和标准差。

电力负荷各阶中心矩可表示为：

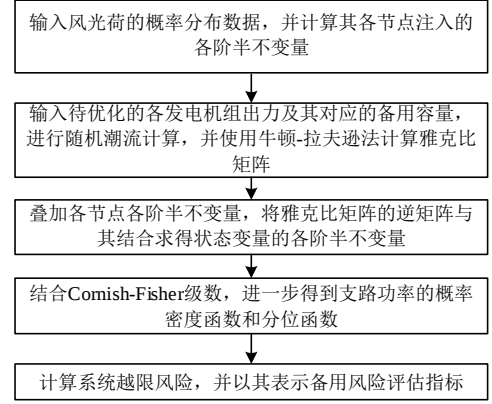
$$M_\xi = \begin{cases} \sigma_{P_{L,t}}^\xi (\xi-1)!! & \xi \text{ 为偶数} \\ 0 & \xi \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (A3)$$

式中：\$M_\xi\$ 为电力负荷的阶中心矩；\$!!\$ 表示双阶乘。

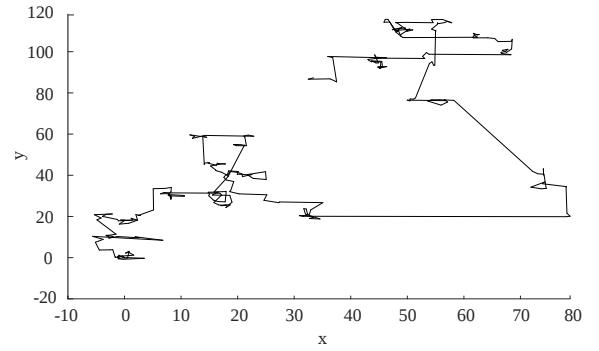
根据各阶半不变量与原点矩的关系求得电力负荷的各阶半不变量^[13]，其中电力负荷一阶半不变量和二阶半不变量分别为 \$\mu_{P_{L,t}}\$、\$\sigma_{P_{L,t}}^2\$，其余阶半不变量均为 0。



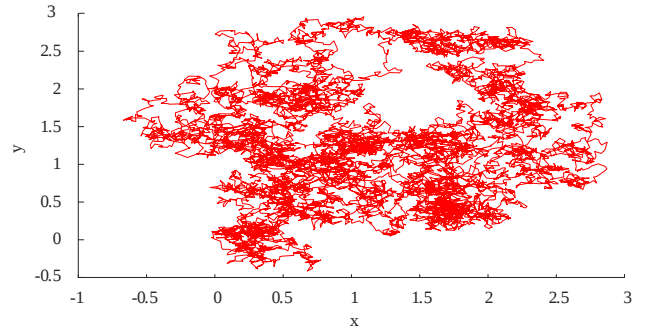
图A1 支路功率的概率密度曲线
Fig.A1 Probability density curve of branch power



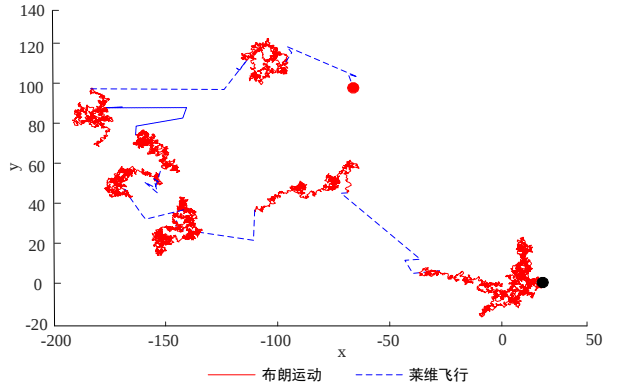
图A2 备用风险评估量化流程
Fig.A2 Quantitative assessment process of over-limit risk



图A3 莱维飞行轨迹
Fig.A3 Levi's flight trajectory

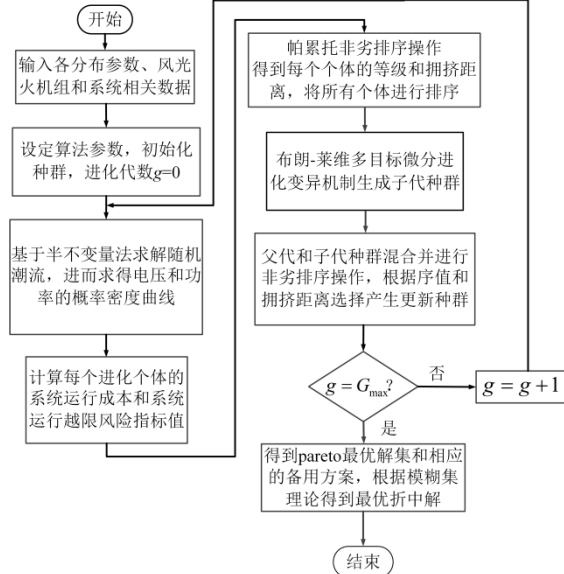


图A4 布朗运动轨迹
Fig.A4 Brownian motion trajectory



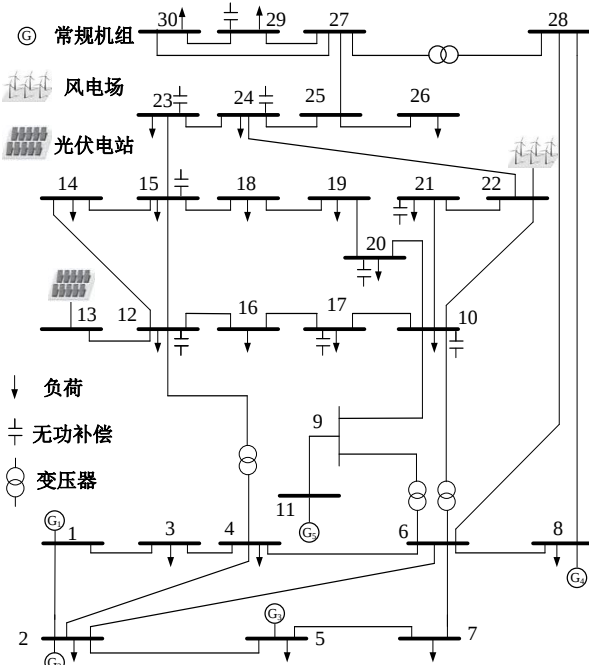
图A5 布朗-莱维搜索示意图
Fig.A5 Brownian-Levy search diagram

附录 B



图B1 基于BL-MODE的源网协同调度模型求解流程
Fig.B1 BL-MODEbased source-grid coordination optimal scheduling solution process

附录 C

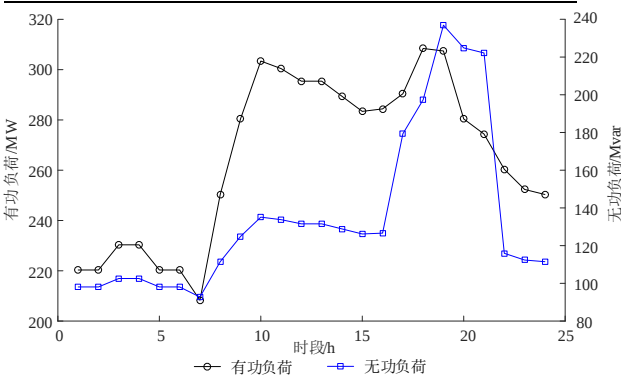


图C1 含风光的IEEE 30节点系统
Fig.C1 IEEE 30-bus system with wind-photovoltaic power

表 C1 IEEE 30 节点系统常规发电机旋转备用成本系数

Table C1 Conventional generator spinning reserve cost factors of IEEE 30-bus system

编号	$\alpha_i / [\$/ (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\beta_i / [\$/ (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$
1	17.70	15.40
2	14.10	13.10
3	13.89	11.80
4	16.74	12.51
5	18.14	15.34



图C2 各时段的负荷需求
Fig.C2 Load demand in each period

附录 D

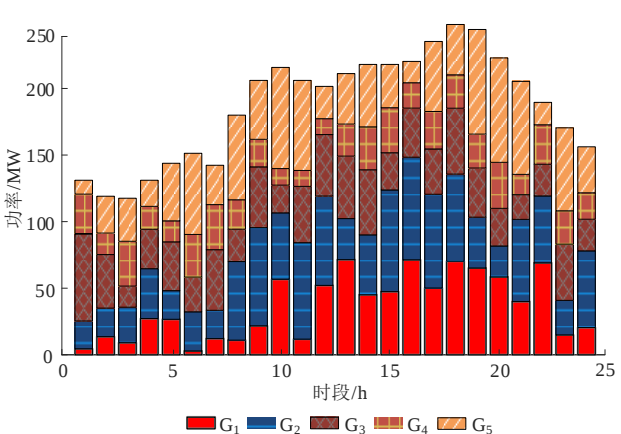
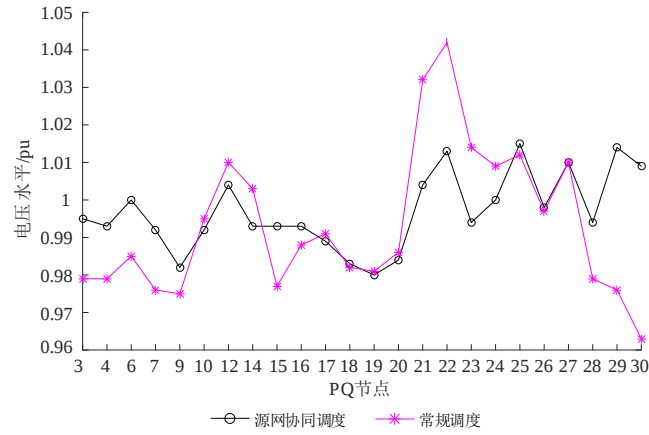


图 D1 各时段机组出力
Fig.D1Unit output in each period



图D2 网络节点电压水平对比

Fig.D2 Voltage level comparison of network buses

表 D1 各时段网侧各可控元件优化结果

Table D1 Optimization results of each controllable component of network in each period

时段	$T_{11(6-9)}/$ pu	$T_{12(6-10)}/$ pu	$T_{15(4-12)}/$ pu	$T_{36(28-27)}/$ pu	$Q_{C10}/$ Mvar	$Q_{C12}/$ Mvar	$Q_{C15}/$ Mvar	$Q_{C17}/$ Mvar	$Q_{C20}/$ Mvar	$Q_{C21}/$ Mvar	$Q_{C23}/$ Mvar	$Q_{C24}/$ Mvar	$Q_{C29}/$ Mvar
1	1.05	1.025	0.95	0.975	0	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
2	1.05	1.025	0.95	0.975	0	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
3	1.05	1.025	0.95	0.975	1	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
4	1.05	1.025	0.95	0.975	1	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
5	1.05	1.025	0.95	0.975	1	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
6	1.05	1.025	0.95	0.975	1	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
7	1.05	1.025	0.95	0.975	1	2	3	1.5	1	0.5	1	1.5	2
8	1.05	1.025	0.925	0.975	1	2	2.5	1.5	1	0.5	1.5	1.5	2
9	1.05	1.025	0.925	0.975	1	2	2.5	1.5	1	0.5	1.5	1	2
10	1.05	1.025	0.925	0.975	1	1	2.5	1.5	1	0.5	1.5	1	2
11	1.05	1	0.925	0.975	1	1	2.5	1.5	1	0.5	1.5	1	2
12	1	1	0.925	0.975	1	1	2.5	1.5	1	0.5	1.5	1	2
13	1	1	0.925	0.975	1	1	2.5	2	1	1	1.5	1	2
14	1	1	0.925	0.975	1.5	1	2.5	2	1.5	1	1.5	1	2
15	1	1	0.925	0.975	1.5	1	2.5	2	1.5	1	1.5	1	2
16	1	1	0.925	0.975	1.5	2	2.5	2	1.5	1	1.5	1	2
17	1	1	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	1	3
18	1	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
19	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
20	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
21	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
22	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
23	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3
24	1.025	1.025	0.925	1	1.5	2	3	2	1.5	1	0.5	2	3

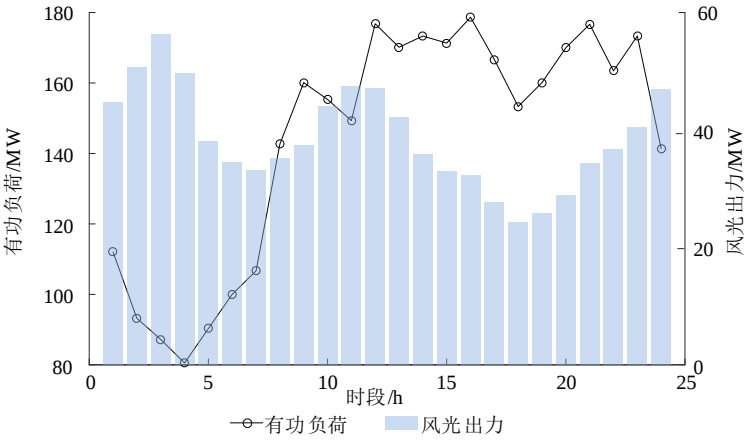
表 D2 各时段 PQ 节点的电压幅值
Table D2 Voltage amplitude of PQ nodes in each period

时段	u_3/pu	u_4/pu	u_6/pu	u_7/pu	u_9/pu	u_{10}/pu	u_{12}/pu	u_{14}/pu	u_{15}/pu	u_{16}/pu	u_{17}/pu	u_{18}/pu
1	0.997	0.997	1.004	0.996	0.978	1.003	1.001	0.992	0.994	0.997	0.997	0.987
2	0.999	0.999	1.005	0.997	0.983	1.011	1.007	0.999	1.003	1.003	1.005	0.996
3	1.000	1.000	1.007	0.997	0.987	1.020	1.010	1.004	1.009	1.009	1.013	1.006
4	0.999	0.999	1.006	0.997	0.985	1.017	1.009	1.002	1.007	1.007	1.010	1.003
5	0.998	0.997	1.004	0.996	0.981	1.007	1.008	1.001	1.004	1.002	1.002	0.998
6	0.999	0.999	1.005	0.996	0.981	1.007	1.011	1.004	1.006	1.005	1.005	1.000
7	0.999	0.999	1.005	0.997	0.980	1.006	1.012	1.006	1.007	1.006	1.005	1.001
8	0.998	0.997	1.003	0.994	0.977	1.000	1.008	0.999	1.000	1.000	0.998	0.992
9	0.996	0.995	1.001	0.992	0.971	0.989	1.005	0.994	0.993	0.992	0.987	0.982
10	0.996	0.995	1.000	0.991	0.967	0.981	1.003	0.990	0.987	0.987	0.980	0.974
11	0.995	0.993	1.000	0.992	0.982	0.992	1.004	0.993	0.993	0.993	0.989	0.983
12	0.996	0.995	1.000	0.991	0.966	0.979	1.002	0.989	0.986	0.986	0.977	0.973
13	0.996	0.995	0.999	0.991	0.963	0.973	1.001	0.988	0.983	0.982	0.972	0.969
14	0.995	0.994	0.999	0.991	0.963	0.975	1.001	0.988	0.985	0.984	0.974	0.971
15	0.995	0.994	0.999	0.991	0.963	0.974	1.002	0.989	0.985	0.984	0.974	0.971
16	0.996	0.995	1.000	0.992	0.967	0.980	1.003	0.990	0.988	0.987	0.980	0.975
17	0.994	0.992	0.998	0.990	0.968	0.983	1.001	0.988	0.987	0.987	0.981	0.976
18	0.993	0.992	0.998	0.990	0.967	0.982	1.000	0.987	0.986	0.986	0.980	0.973
19	0.993	0.992	0.998	0.990	0.969	0.985	1.000	0.987	0.987	0.988	0.983	0.975
20	0.995	0.993	1.000	0.992	0.972	0.992	1.004	0.993	0.993	0.993	0.989	0.983
21	0.996	0.996	1.002	0.993	0.976	0.999	1.006	0.996	0.997	0.998	0.996	0.988
22	0.997	0.996	1.003	0.994	0.979	1.005	1.007	0.998	1.000	1.001	1.002	0.993
23	0.998	0.997	1.004	0.995	0.982	1.010	1.009	1.000	1.004	1.004	1.006	0.997
24	0.999	0.999	1.005	0.996	0.985	1.015	1.010	1.003	1.007	1.008	1.011	1.002
时段	u_{19}/pu	u_{20}/pu	u_{21}/pu	u_{22}/pu	u_{23}/pu	u_{24}/pu	u_{25}/pu	u_{26}/pu	u_{27}/pu	u_{28}/pu	u_{29}/pu	u_{30}/pu
1	0.986	0.990	1.027	1.039	0.999	1.012	1.018	1.004	0.981	0.997	1.016	1.007
2	0.995	0.998	1.039	1.042	1.009	1.024	1.030	1.017	1.010	0.999	1.037	1.025
3	1.006	1.011	1.037	1.038	1.018	1.037	1.037	1.023	1.008	1.001	1.040	1.027
4	1.004	1.008	1.035	1.041	1.015	1.032	1.035	1.021	1.023	1.000	1.040	1.027
5	0.997	1.001	1.028	1.039	1.009	1.022	1.032	1.019	1.028	0.999	1.041	1.028
6	0.998	1.002	1.026	1.035	1.011	1.021	1.031	1.018	1.031	0.999	1.040	1.027
7	0.999	1.002	1.025	1.034	1.012	1.022	1.033	1.020	1.033	0.999	1.042	1.030
8	0.990	0.994	1.016	1.025	1.003	1.011	1.023	1.007	1.025	0.997	1.031	1.018
9	0.978	0.982	1.001	1.009	0.992	0.998	1.013	0.995	1.018	0.994	1.022	1.007
10	0.970	0.974	0.992	1.000	0.985	0.989	1.005	0.986	1.012	0.993	1.014	0.997
11	0.981	0.984	1.004	1.013	0.994	1.000	1.015	0.998	1.011	0.994	1.014	1.009
12	0.969	0.972	0.986	0.993	0.983	0.985	1.003	0.985	1.012	0.993	1.014	0.998
13	0.964	0.967	0.978	0.985	0.979	0.979	0.998	0.979	1.010	0.992	1.010	0.994
14	0.966	0.970	0.979	0.985	0.980	0.980	1.001	0.983	1.012	0.992	1.013	0.998
15	0.966	0.970	0.978	0.984	0.981	0.980	1.002	0.984	1.012	0.992	1.015	0.999
16	0.971	0.975	0.987	0.994	0.985	0.987	1.006	0.988	1.015	0.993	1.017	1.002
17	0.972	0.976	0.990	0.997	0.985	0.989	1.008	0.990	1.014	0.992	1.019	1.004
18	0.970	0.974	0.990	0.997	0.983	0.987	1.005	0.986	1.012	0.991	1.015	0.998
19	0.972	0.976	0.994	1.002	0.985	0.990	1.008	0.988	1.014	0.992	1.017	1.000
20	0.980	0.984	1.004	1.013	0.994	1.000	1.015	0.998	1.020	0.994	1.024	1.009
21	0.986	0.991	1.015	1.025	1.000	1.009	1.020	1.003	1.024	0.996	1.027	1.012
22	0.992	0.997	1.024	1.034	1.005	1.016	1.026	1.010	1.027	0.997	1.033	1.019
23	0.997	1.001	1.031	1.041	1.009	1.022	1.029	1.014	1.028	0.998	1.035	1.021
24	1.001	1.006	1.032	1.042	1.014	1.029	1.032	1.017	1.030	0.999	1.036	1.023

表 D3 不同算法的计算时间
Table D3 Calculation time of different algorithms

算法	计算时间/s
NSGA-II	5946
MODE	3652
BL-MODE	2528

附录 E



图E1 各时段有功负荷需求和风电出力
Fig.E1 Active load and wind-photovoltaic output power demand in each period