

考虑输配交互的含风电场电力系统多目标 动态随机模糊最优潮流

左 剑¹, 汤吉鸿¹, 钟 伟¹, 杨 丹¹, 李 暄², 马 瑞²

(1. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要:提出一种考虑输配交互的含风电场电力系统多目标动态随机模糊最优潮流方法。突破传统输配网最优潮流独立计算且配网一般以负荷计及的现状,考虑主动配电网与输电网的双向潮流交互特性和风电注入功率随机模糊性,兼顾系统经济、低碳、降损多目标优化,考虑输配网静态安全,基于随机模糊机会约束规划建立含风电场电力系统输配交互多目标动态随机模糊潮流模型;提出在随机模糊模拟、牛顿拉夫逊法与前推回代法求解输配系统随机模糊潮流基础上,通过输配网节点功率和电压考虑输配交互特性,基于 Look-ahead 和 NSGA-II 获取各时段 Pareto 解,采用最大满意度法决策,从而提出模型求解算法。改进的 IEEE 30 节点输电系统与 IEEE 33 节点配电系统的算例仿真结果表明了文中提出的模型和算法有效性和优越性。

关 键 词:电力系统;风电场;输配网交互;随机模糊机会约束规划;多目标动态最优潮流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.006 中图分类号:TM71 文章编号:1673-9140(2020)01-0050-11

Multi-objective dynamic random fuzzy optimal power flow of wind integrated power system considering the interaction of transmission-distribution system

ZUO Jian¹, TANG Jihong¹, ZHONG Wei¹, YANG Dan¹, LI Xuan², MA Rui¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: This paper proposes a transmission-distribution interaction multi-objective dynamic random-fuzzy optimal power flow method for wind integrated power system. It is a breakthrough of the traditional independent optimal power flow method for transmission and distribution network and that the distribution network is seen as load. Considering bi-directional power interaction between active distribution network (ADN) and transmission system (TS) and the random-fuzzy nature of wind power injection, with multi-objectives of economic low-carbon and loss-reduction, with respect to steady-state security and based on random-fuzzy chance constraint programming, transmission-distribution interaction multi-objective dynamic random-fuzzy optimal power flow model is established. Random-fuzzy power flow of transmission-distribution system is calculated through the random-fuzzy simulation, Newton Ralph method and forward-backward sweep method. Based on this and considering transmission-distribution interaction power and voltage, Pareto optimal frontier of each time period is obtained through look-ahead and NASA-II, and the

maximizing-satisfaction method is adopted in decision-making. An illustration case based on modified IEEE 30 transmission system and IEEE 33 distribution system verifies the feasibility and superiority of the proposed method.

Key words: power system; wind power generation; transmission-distribution interaction; random-fuzzy chance constraint programming; multi-objective dynamic optimal power flow

为应对日益严峻的能源和环境危机,大量风电场以规模化接入输电网(transmission system, TS)或以分布式接入配电网^[1],风力发电固有随机性、波动性,且基于有限风速统计数据难以获取其精确的概率分布参数,客观上兼具随机性和模糊性^[2];同时,规模化风电接入 TS 和分布式电源(distributed generation, DG)高穿透的主动配网(active distribution network, ADN)必须依赖输配交互协同实现新能源高效消纳。为此,兼顾风电随机性和模糊性的输配交互电力系统潮流问题亟待研究。

传统潮流计算中一般以输电网或配电网分别为研究对象,在对输电网进行分析时将配电网等值为 PQ 负荷节点,配电网分析时将输电网等值为无穷大电源且禁止向主网倒送功率。然而随着 ADN 中 DG 渗透率不断升高,ADN 与 TS 连接馈线上的功率交互是必然趋势。近年来关于输配网的一体化问题研究主要针对潮流计算^[3,4]与机组组合^[5]两方面。在输配一体化潮流问题研究方面,文献[3]提出输配网主仆独立求解并协调的全局潮流方法,文献[4]基于该算法分析输配网 N-1 静态安全性。在输配一体化机组组合问题研究方面,文献[5]考虑基于体系工程理论思想构建考虑 ADN 影响的 TS 安全约束机组组合模型,通过迭代寻优使输配网共享变量达到一定精度的收敛实现输配网协调。总之,随着规模化风电接入输电网和大量分布式风电接入配网,考虑风电不确定性及 ADN 与输电网双向功率交互的潮流尤其是最优潮流问题亟待研究,但目前尚未见研究报道。

关于含规模化风电接入 TS 和含 DG 的 ADN 最优潮流研究一般独立开展,风电出力的不确定性一般以随机性或模糊性考虑。在考虑风电随机性的 TS 最优潮流问题研究中,学者们提出概率最优潮流^[6,7]与多目标动态最优潮流^[8,9]等方法以分析与优化发电计划,获得满足一定置信水平机会约束的最优调度方案。风电出力模型现广泛采用随机模糊模型^[10,11],文献[12]在日前调度时间尺度上,研究

了考虑风电预测误差随机性及其时空相关性的机会约束动态最优潮流。在 ADN 最优潮流研究中,文献[13]以 Weibull 分布描述风速继而获取 DG 出力,以禁止倒送功率概率约束考虑输配网交互问题;文献[14]在 ADN 日前最优潮流问题中认为风光出力服从正态分布;文献[15]中采用不确定时序场景集描述风光发电。尽管普遍认为风速服从 Weibull 分布,然而受统计数据所限,在概率分布拟合时客观上难以获取认识意义精确的概率分布参数,本质上兼具随机性和模糊性,因而用随机模糊变量模型^[2]描述更加科学准确。针对风电随机模糊功率注入现象,学者已开展了基于机组组合的含风电电力系统最优发电计划研究^[16]。综上所述可知,考虑风电随机模糊性和 TS 与 ADN 交互的最优潮流模型和算法的研究目前还尚未展开。

该文提出基于随机模糊机会约束规划的输配交互多目标动态随机模糊最优潮流方法,在分析 TS 与 ADN 连接馈线功率交互行为及其约束基础上,对 TS 中规模化风电与 ADN 中 DG 的随机模糊不确定功率注入及其影响下的电力系统静态安全约束进行随机模糊机会约束建模;进而构建含风电电力系统输配交互多目标动态随机模糊最优潮流(random-fuzzy optimal power flow, RFOPF)模型,并提出其相应的求解方法。最后通过基于改进 IEEE 30 节点输电系统与 IEEE 33 节点配电系统搭建的输配交互电力系统进行算例仿真分析,验证所提方法的正确性和有效性。

1 TS 与 ADN 连接馈线功率交互分析

传统研究通常不允许 ADN 向 TS 倒送电情况的发生,因而当 DG 出力过大时 ADN 则需采用主动管理方式对其并网功率进行削减。然而随着 ADN 中 DG 渗透率不断升高,过分削减功率与维持传统的配网禁止倒送功率约束将不利于大量分布式新能源接入配网的发展需求,因此 ADN 与 TS 有功

功率双向交互是必然趋势。

该文考虑输配网连接馈线的有功功率双向传输,除 ADN 孤岛运行外,对于 TS 而言 ADN 既可作为“电源”又可作为“负荷”。令 $P_{Li,t}$ 表示位于节点 i 的 ADN 在时段 t 的负荷功率,定义其流出节点时为正,即从 TS 流向 ADN 为正方向,则有

$$\begin{cases} P_{Li,t} > 0, & \text{ADN 为负荷} \\ P_{Li,t} < 0, & \text{ADN 为电源} \end{cases} \quad (1)$$

双向功率传输容量约束为联络变压器容量和线路传输容量,表示为

$$|S_{Li,t}| < S_{Li}^{\max}, \forall i \in \Phi_{T-D}, \forall t \quad (2)$$

式中 T 指代 TS, D 指代 ADN; Φ_{T-D} 指代 TS 中与 ADN 相连节点集合。按照输电网和配电网最大化消纳风电需求,若风电出力过大致使 ADN 母线倒送功率超出上述限制则采用主动管理或弃风等手段进行适当削减。

2 风电场出力及系统变量随机模糊模型

2.1 风电随机模糊模型

风速受自然环境影响而具有不确定性,服从 Weibull 分布,概率密度函数为

$$f_v(v) = k/c(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \quad (3)$$

式中 k 和 c 分别是形状参数和尺度参数。

受有限的历史统计数据所限,概率密度函数的参数获取具有认识意义上的模糊性,可通过统计和数据挖掘获取概率分布参数 k 和 c 的隶属度函数,即可用模糊变量 ξ_k 和 ξ_c 描述^[2]。

从而将风速描述为一随机模糊变量 ξ_v ,其机会测度分布函数为

$$F(\xi_v) = Ch(v < \xi_v) = 1 - \exp[-(\xi_v/\xi_c)^{\xi_k}] \quad (4)$$

TS 中大规模风电场的有功出力近似为单台风机的累加,表示为

$$P_{WG} = \begin{cases} 0, & \xi_v < v_{ci} \text{ or } \xi_v \geq v_{co} \\ N_{WG} \cdot P_{WGr} (\xi_v^3 - v_{ci}^3) / (v_r^3 - v_{ci}^3), & v_{ci} \leq \xi_v \leq v_r \\ N_{WG} \cdot P_{WGr}, & \xi_v \geq v_r \end{cases} \quad (5)$$

式中 v_{ci} 、 v_{co} 和 v_r 分别为切入、切出和额定风速;

P_{WGr} 为单个风力发电机的额定输出功率; N_{WG} 是风电场的风机台数。

假定风电场以恒功率因数模式运行在超前相位 φ_{WG} ,则其无功功率为

$$Q_{WG} = -P_{WG} \tan \varphi_{WG} \quad (6)$$

ADN 中 DG 出力 P_{DG} 为

$$P_{DG} = \begin{cases} 0, & \tilde{v} < v_{ci} \text{ or } \tilde{v} \geq v_{co} \\ 0.5\rho AC_r \tilde{v}, & v_{ci} \leq \tilde{v} \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq \tilde{v} \leq v_{co} \end{cases} \quad (7)$$

式中 v_{ci} 、 v_{co} 和 v_r 分别为切入、切出和额定风速; ρ 是空气密度; A 是风轮覆盖的面积; C_r 是风电机的气能利用系数; \tilde{v} 是随机模糊风速; P_r 是风电机组有功功率的额定值。限于篇幅,该文暂未考虑规模化风电场集群模型和风电出力相关性,风电出力模型也以简化模型描述。

2.2 随机模糊模拟抽样及系统状态变量机会约束

考虑风速服从随机模糊 Weibull 分布,通过随机模糊模拟获取 TS 中规模化风电场与 ADN 中 DG 的日有功和无功出力序列样本,结合牛顿拉夫逊与前推回代潮流算法,获取输配交互电力系统随机模糊潮流样本,从而描述输配交互电力系统的随机模糊机会约束。具体步骤如下:

1) 基于参数模糊隶属度函数,分别抽取满足某隶属度水平 λ 的 1 组 k - c 数值;

2) 判断是否满足 $k < c$,若是,则此 k - c 组合作为此次模拟的 Weibull 参数,若否,则转步骤 1);

3) 获得随机模糊风速:

$$v = c[-\ln(1 - F(v))]^{1/k} \quad (8)$$

生成 24 个风速值构成日风速 24 时段模拟序列;

4) 由式(5)、(6)获取风电场、分布式风电的日出力随机模糊序列;

5) 针对各时段风电注入功率样本,运用牛顿拉夫逊结合前推回代法计算输配交互系统潮流;

6) 进行步骤 1)~6)共 N_s 次,获取输配交互电力系统分时段潮流结果样本;

7) 分时段分别统计潮流结果样本中满足节点静态电压安全边界的频次 $k_{U,t}$ 、满足机组无功出力约束的频次 $k_{Q,t}$ 、满足输配交互功率约束的频次 $k_{T-D,t}$ 等,计算对应的随机模糊机会分别为

$$Ch \{Q_{Gi}^{\min} \leq \tilde{Q}_{Gi,t} \leq Q_{Gi}^{\max}\} (\lambda) = \frac{k_{Q,t}}{N_S} \quad (9)$$

$$Ch \{U_i^{\min} \leq \tilde{U}_{i,t} \leq U_i^{\max}\} (\lambda) = \frac{k_{U,t}}{N_S} \quad (10)$$

$$Ch \{|S_{Li,t}| < S_{Li}^{\max}\} (\lambda) = \frac{k_{T-D,t}}{N_S} \quad (11)$$

3 考虑输配交互的电力系统多目标动态 RFOPF

基于经典随机机会约束最优潮流和动态最优潮流,构建考虑输配交互的静态安全约束下兼顾经济、低碳、降损等多目标动态 RFOPF 模型。

3.1 目标函数

以最小化发电费用、CO₂ 排放和系统有功网损为优化目标,即

$$f_1(u) = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i \in \Phi_{T-G}} (a_i \bar{P}_{Gi,t}^2 + b_i \bar{P}_{Gi,t} + c_i) \right] \quad (12)$$

$$f_2(u) = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i \in \Phi_{T-G}} (\alpha_i \bar{P}_{Gi,t}^2 + \beta_i \bar{P}_{Gi,t} + \gamma_i) \right] \quad (13)$$

$$f_3(u) = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i \in \Phi_T} \tilde{U}_{i,t} \sum_{bi \in \Gamma_T} \tilde{U}_{bi,t} (G_{i,bi,t} \cos \tilde{\delta}_{i,bi,t} + B_{i,bi,t} \sin \tilde{\delta}_{i,bi,t}) \right] \quad (14)$$

式中 Φ_T 为 TS 节点集合, Φ_{T-G} 为 TS 中接有火电机组的节点集合; a_i, b_i, c_i 是火电机组耗费参数, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 是碳排放参数, $\bar{P}_{Gi,t}$ 为机组有功出力, $\tilde{U}_{i,t}$ 为节点电压, $\tilde{\delta}_{i,bi,t}$ 是节点 i 与 bi 的相角差, $G_{i,bi,t}$ 与 $B_{i,bi,t}$ 为节点 i 与 bi 之间线路的电导和电纳, Γ_T 是与 i 相连的节点集合。上标“—”表示确定性变量,即可直接调控的决策变量,“~”为不确定性变量,代表受决策变量与随机模糊变量影响的电力系统状态变量。

3.2 约束条件

1) TS-ADN 功率交互约束。

$$Ch \{|S_{Li,t}| < S_{Li}^{\max}\} (\lambda) \geq \rho_{T-D} \quad (15)$$

2) 功率平衡约束。

对于 ADN 中的节点,有

$$\begin{cases} \tilde{U}_{j,t} \sum_{bj \in \Gamma_D} \tilde{U}_{bj,t} (G_{j,bj,t} \cos \tilde{\delta}_{j,bj,t} + B_{j,bj,t} \sin \tilde{\delta}_{j,bj,t}) = 0 \\ \tilde{U}_{j,t} \sum_{bj \in \Gamma_D} \tilde{U}_{bj,t} (G_{j,bj,t} \sin \tilde{\delta}_{j,bj,t} - B_{j,bj,t} \cos \tilde{\delta}_{j,bj,t}) = 0 \end{cases} \quad \forall j \in \Phi_D, \forall t \quad (16)$$

式中 Φ_D 指代 ADN 内部节点集合, $\tilde{U}_{j,t}$ 表示节点 j 的电压; bj 表示与节点 j 相连的节点,其集合为 Γ_D , $\tilde{U}_{bj,t}$ 表示节点 bj 的电压; $\tilde{G}_{j,bj,t}$ 、 $\tilde{B}_{j,bj,t}$ 、 $\tilde{\delta}_{j,bj,t}$ 分别表示节点 j 与节点 bj 连接支路的电导矩阵元素、电纳矩阵元素与相角差。

对于 ADN 中与 TS 共联节点即 ADN 母线,有

$$\begin{cases} \tilde{P}_{Li,t} = \sum_{j \in \Phi_D} (P_{Lj,t} - \tilde{P}_{DGj,t}) + \sum_{j \in \Phi_D} \tilde{U}_{j,t} \sum_{bj \in \Gamma_D} \tilde{U}_{bj,t} \cdot (G_{j,bj,t} \cos \tilde{\delta}_{j,bj,t} + B_{j,bj,t} \sin \tilde{\delta}_{j,bj,t}), \\ \tilde{Q}_{Li,t} = \sum_{j \in \Phi_D} (Q_{Lj,t} - \tilde{Q}_{DGj,t}) + \sum_{j \in \Phi_D} \tilde{U}_{j,t} \sum_{bj \in \Gamma_D} \tilde{U}_{bj,t} \cdot (G_{j,bj,t} \sin \tilde{\delta}_{j,bj,t} - B_{j,bj,t} \cos \tilde{\delta}_{j,bj,t}), \\ \forall i \in \Phi_{T-D}, \forall j \in \Phi_D, \forall t \end{cases} \quad (17)$$

式中 ADN 电功率负荷之和加网损,扣除分布式能源出力,即为母线负荷功率 $\tilde{P}_{Li,t}$ 。

对于 TS 中的节点,有

$$\begin{cases} \bar{P}_{Gi,t} + \tilde{P}_{WGi,t} - P_{Li,t} = \tilde{U}_{i,t} \sum_{bi \in \Gamma_T} \tilde{U}_{bi,t} (G_{i,bi,t} \cos \tilde{\delta}_{i,bi,t} + B_{i,bi,t} \sin \tilde{\delta}_{i,bi,t}), \\ \bar{Q}_{Gi,t} + \tilde{Q}_{WGi,t} - Q_{Li,t} = \tilde{U}_{i,t} \sum_{bi \in \Gamma_T} \tilde{U}_{bi,t} (G_{i,bi,t} \sin \tilde{\delta}_{i,bi,t} - B_{i,bi,t} \cos \tilde{\delta}_{i,bi,t}), \\ \forall i \in \Phi_T, \forall t \end{cases} \quad (18)$$

3) 火电机组约束。

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq \bar{P}_{Gi,t} \leq P_{Gi}^{\max}, \\ U_i^{\min} \leq \bar{U}_{i,t} \leq U_i^{\max}, \\ Ch \{Q_{Gi}^{\min} \leq \tilde{Q}_{Gi,t} \leq Q_{Gi}^{\max}\} (\lambda) \geq \rho_Q, \\ -\Delta P_{Gi}^{\text{down}} \leq \bar{P}_{Gi,t+1} - \bar{P}_{Gi,t} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{up}}, \\ \forall i \in \Phi_{T-G}, \forall t \end{cases} \quad (19)$$

式中 包括发电机有功与无功功率上下限、机端电压调整上下限、爬坡约束等。

4) 节点电压上下限约束。

$$Ch\{U_i^{\min} \leq \tilde{U}_{i,t} \leq U_i^{\max}\}(\lambda) \geq \rho_U, \forall i \in \Phi_{PQ}, \forall t \quad (20)$$

式中 Φ_{PQ} 表示 TS 中 PQ 节点集合。

5) 系统旋转备用。

按系统最大负荷 P_L^{\max} 的某百分比 μ 考虑系统的旋转备用,由火电机组承担。

$$\sum_{i \in \Phi_{T-G}} [P_{Gi}^{\max} - \bar{P}_{Gi,t}] \geq \mu P_L^{\max}, \forall t \quad (21)$$

6) 无功补偿装置投入约束。

$$B_k^{\min} \leq \bar{B}_{k,t} \leq B_k^{\max}, \forall k \in \Phi_{T-SC} \quad (22)$$

式中 B_k^{\min}, B_k^{\max} 为第 k 个无功补偿设备上下限; Φ_{T-SC} 为 TS 中装有并联无功补偿装置的节点集合。

4 求解算法

4.1 算法流程

潮流计算中输电网采用牛顿拉夫逊算法,配电网采用前推回代算法。为促进风电最大化消纳,首先通过前推回代法求取 ADN 母线功率与电压,若其满足要求,则输配交互功率约束,若不满足则适当削减风电;然后以 ADN 连接母线功率的源或荷表征 TS 中该节点的功率,采用牛顿拉夫逊潮流算法获取 TS 潮流结果,通过 ADN 节点功率与电压收敛判断,形成输配交互电力系统潮流分布结果,算法流程如图 1 所示。

首先,以风电场与分布式风电的随机模糊期望值为注入功率,通过 NSGA-II、最大满意度决策与 Look-ahead^[17] 的混合算法求解确定性多目标动态最优潮流,获取最优调度方案;

其次,考虑风电随机模糊不确定功率,通过多次随机模糊模拟抽样结合输配网潮流算法,获取系统各个状态变量的随机模糊机会测度分布;

最后,判断是否满足置信水平约束,若满足则结束,输出 DRFOPF 方案及其对应的各目标值与潮流分布等,否则调整机会约束的上下限,重新进行整个流程,直至迭代至寻到满足机会约束限制的方案。

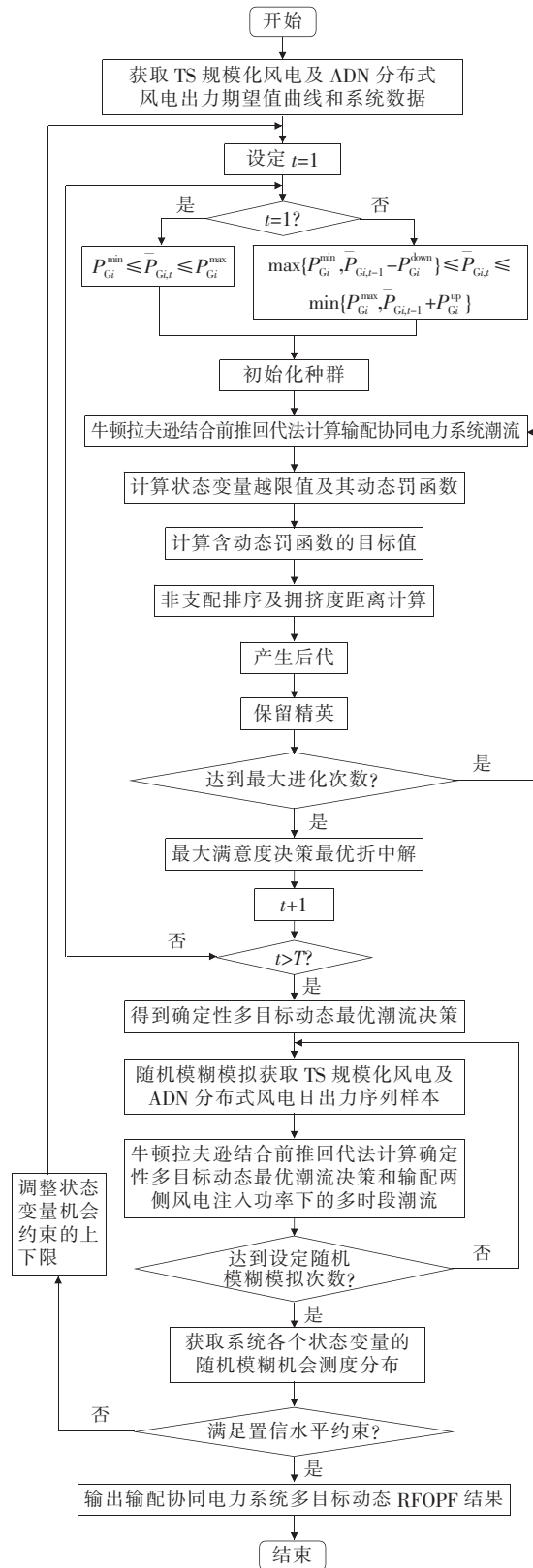


图 1 输配交互多目标动态 RFOPF 算法流程

Figure 1 Solving process of transmission-distribution coordination multi-objective dynamic RFOPF

4.2 随机模糊机会约束的处理

模型中随机模糊机会约束可统一表示为

$$Ch \{x_i^{\min} < \tilde{x}_{i,t} < x_i^{\max}\} (\lambda) \geq \rho_x \quad (23)$$

以 PQ 节点电压 $\tilde{U}_{i,t}$ 为例,若其随机模糊机会测度不满足置信水平约束,即不满足落在 $[U_i^{\min}, U_i^{\max}]$ 的机会大于设定置信水平,则分为 2 种情况:电压样本落在了偏小的范围或落在了偏大的范围。一般不会出现样本点分散落在小于 U_i^{\min} 和大于 U_i^{\max} 的两边的情况。

因此,针对不满足机会约束的状态变量 $\tilde{x}_{i,t}$,计算其落在 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 之外的样本均值 $\tilde{x}_{i,t}^{av}$ 。

1) 若 $\tilde{x}_{i,t}^{av} \leq x_i^{\min}$,则在下一轮确定性 DOPF 中,该状态变量在该时段的约束上限不变,调整其约束下限,即

$$\begin{cases} x_{i,t}^{\max''} = x_{i,t}^{\max'} \\ x_{i,t}^{\min''} = x_{i,t}^{\min'} + (x_i^{\min} - \tilde{x}_{i,t}^{av}) \times \\ [1 - Ch \{x_i^{\min} \leq \tilde{x}_{i,t} \leq x_i^{\max}\} (\lambda)] \end{cases} \quad (24)$$

式中 $x_{i,t}^{\min'}$ 与 $x_{i,t}^{\max'}$ 表示该轮计算中的下限;

2) 若 $\tilde{x}_{i,t}^{av} \geq x_i^{\max}$,则在下一轮确定性 DOPF 中,该状态变量在该时段的约束下限不变,调整其约束上限,即

$$\begin{cases} x_{i,t}^{\max''} = x_{i,t}^{\max'} - (\tilde{x}_{i,t}^{av} - x_i^{\max}) \times [1 - \\ Ch \{x_i^{\min} \leq \tilde{x}_{i,t} \leq x_i^{\max}\} (\lambda)] \\ x_{i,t}^{\min''} = x_{i,t}^{\min'} \end{cases} \quad (25)$$

将更新后的状态变量约束上下限用于下一轮寻优过程。

5 算例仿真及结果分析

5.1 算例系统及其参数

算例系统如图 2 所示,在 IEEE 30 节点 TS 的第 8 节点接入规模化风电场,第 20 节点通过母线变压器与 IEEE 33 节点 ADN 连接,TS 中的其余负荷节点视为传统 PQ 节点,在 ADN 的第 3、7、10、19、28 节点接入分布式风电。

日负荷率波动曲线如图 3 所示,TS 以 IEEE 30 节点系统原始负荷扩大 1.6 倍为基准负荷,ADN 以 IEEE 33 节点系统原始负荷为基准负荷。火电机组参数如表 1 所示,规模化风电场与单个分布式风电参数如表 2 所示。当 DG 发电量大于配电网所带负

载时,将发生 ADN 作为电源状态向 TS 倒送功率现象。

风速来源于对美国 NREL 历史风速数据的挖掘分析,其 8 月份日风速的威布尔分布参数可分别表示为三角形模糊变量 $\xi_k = (1.14, 1.75, 3.64)$ 与梯形模糊变量 $\xi_c = (2.95, 4.40, 6.40, 8.22)^{[2]}$,隶属函数分别为

$$\mu(k) = \begin{cases} \frac{k - 1.14}{0.61}, & 1.14 \leq k \leq 1.75 \\ \frac{3.64 - k}{1.89}, & 1.75 \leq k \leq 3.64 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (26)$$

$$\mu(c) = \begin{cases} \frac{c - 2.95}{1.45}, & 2.95 \leq c \leq 4.40 \\ 1, & 4.40 \leq c \leq 6.40 \\ \frac{8.22 - c}{1.82}, & 6.40 \leq c \leq 8.22 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (27)$$

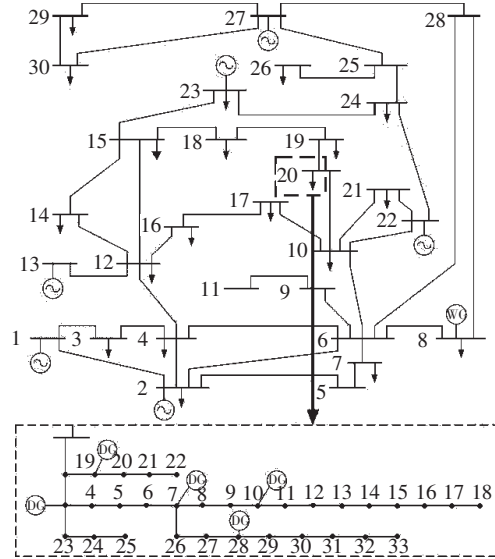


图 2 算例系统

Figure 2 Outline of the case study

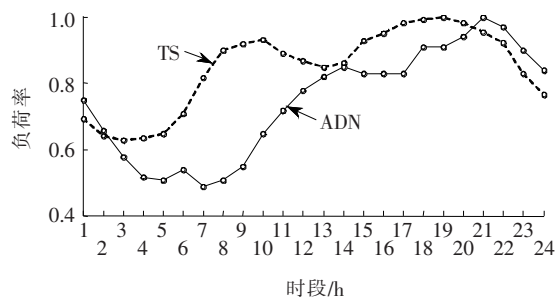


图 3 TS 日负荷

Figure 3 Daily load of TS

表 1 火电机组参数

Table 1 Parameters of coal-fired generation

机组 编号	节点 编号	$P_{Gi}^{max}/$ MW	$P_{Gi}^{min}/$ MW	$Q_{Gi}^{max}/$ MVar	$Q_{Gi}^{min}/$ MVar	$\Delta P_{Gi}^{down}/$ MW	$\Delta P_{Gi}^{up}/$ MW	$a_i/$ (\$/(MW ² ·h))	$b_i/$ (\$/(MW·h))	$c_i/$ (\$/h)	$\alpha_i/$ (t/(MW ² ·h))	$\beta_i/$ (t/(MW·h))	$\gamma_i/$ (t/h)
1	1	80	40	150	-20	20	20	0.02	2.00	0	6.490×10^{-6}	-5.554×10^{-6}	4.091×10^{-6}
2	2	80	40	60	-20	20	20	0.017 5	1.75	0	3.380×10^{-6}	-3.550×10^{-6}	5.326×10^{-6}
3	22	50	25	62.5	-15	13	13	0.008 3	3.25	0	5.638×10^{-6}	-6.047×10^{-6}	2.543×10^{-6}
4	27	55	30	48.7	-15	14	14	0.025 0	3.00	0	4.568×10^{-6}	-5.094×10^{-6}	4.258×10^{-6}
5	23	40	20	40	-10	10	10	0.025 0	3.00	0	4.568×10^{-6}	-5.094×10^{-6}	4.257×10^{-6}
6	13	50	30	44.7	-15	15	15	0.062 5	1.00	0	3.245×10^{-6}	-2.777×10^{-6}	2.045×10^{-6}

表 2 风电机组额定参数

Table 2 Parameters of wind farm and DG

输入 方式	额定切 入风速/ (m·s)	额定切 出风速/ (m·s)	额定功 率/MW	风电机 台数	功率 因数
规范化风电场	3	20	1	30	0.95
分布式 DG	3	20	0.1	10	0.95

随机模糊模拟规模为 500×24 , 对每一个时段首先模拟 500 组具有随机模糊性的风速值, 取其平均值作为每一个风机的实时风速。机会约束中的隶属度水平为 $\lambda = 0.9$, 置信度水平 $\rho_U = \rho_Q = \rho_{T-D} = 0.9$ 。NSGA-II 算法种群大小为 100, Pareto 前沿因素 0.3, 遗传变异代数 300。

5.2 结果分析

算例仿真寻优过程中得到分布均匀收敛良好的 Pareto 前沿, 表明算法良好的寻优能力。图 4 为第 14 时段 Pareto 最优前沿, 含风电的输配交互电力系统多目标 Pareto 前沿趋势显示, 多目标问题本质存在冲突, 显示出在调度运行中必须多目标协调的必要性。

图 4 中每一个非支配解对应一个满足潮流安全

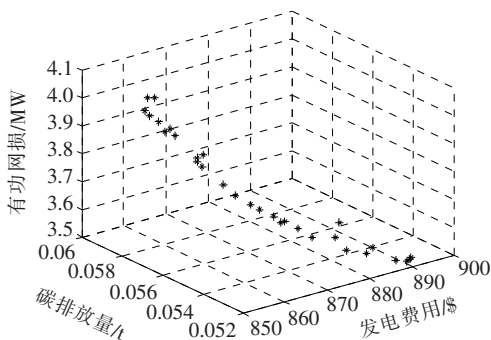
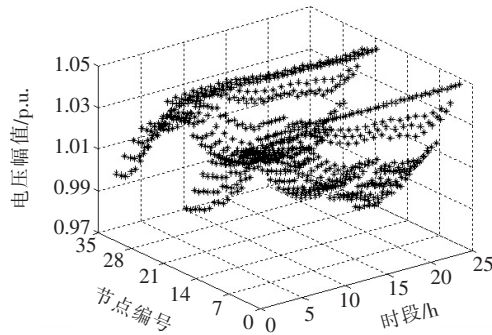


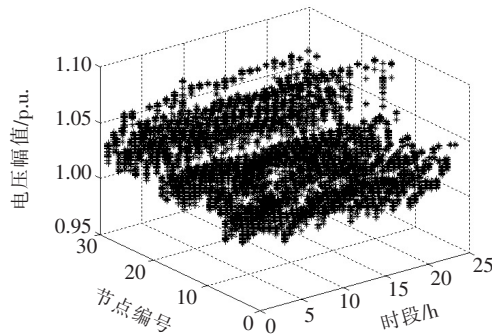
图 4 14 时段 Pareto 前沿图

Figure 4 Pareto frontier of 14th time period

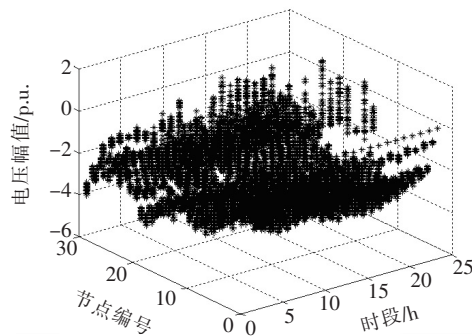
随机模糊机会约束的可行的输配交互日前最优调度策略, 24 时段 Pareto 策略下的输配交互电力系统电压幅值和相角随机模糊期望值如图 5 所示。因而



(a) Pareto 策略下的 ADN 电压幅值随机模糊期望值



(b) Pareto 策略下的 TS 电压幅值随机模糊期望值



(c) Pareto 策略下的 TS 电压相角随机模糊期望值

图 5 Pareto 策略下的随机模糊期望值

Figure 5 Random-fuzzy expectation under Pareto solutions

Pareto 前沿包含丰富的决策信息,向决策者提供多种可行方案供其依据实际情况与偏好而作出选择。该文采用最大满意度决策选取 Pareto 最优前沿中

兼顾经济、低碳、降损这 3 个相悖目标折衷最优的策略,表 3 列出最末一次迭代寻优中多时段决策时 3 个目标的最值及最大标准化模糊满意度值情况。

表 3 多时段决策时目标函数值及最大标准化满意度

Table 3 maximum and minimum values of objectives and maximum satisfaction

t	$f_{1\min}/$ \$	$f_{1\max}/$ \$	$f_{2\min}/$ t	$f_{2\max}/$ t	$f_{3\min}/$ (MW · h)	$f_{3\max}/$ (MW · h)	μ
1	643.43	664.37	0.033 9	0.035 7	2.371 9	2.634 3	0.051 8
2	583.68	592.05	0.029 4	0.030 0	2.103 1	2.182 3	0.058 6
3	570.49	574.09	0.028 5	0.028 9	2.071 2	2.144 4	0.069 3
4	575.61	578.98	0.028 7	0.029 3	2.044 4	2.108 3	0.057 9
5	590.81	596.03	0.030 1	0.030 6	2.155 7	2.228 9	0.058 9
6	659.96	666.33	0.035 7	0.037 1	2.447 2	2.586 4	0.057 1
7	792.71	804.72	0.047 1	0.050 8	3.254 3	3.493 0	0.060 4
8	898.57	935.38	0.055 3	0.062 7	3.984 6	4.469 9	0.058 0
9	929.15	966.84	0.058 1	0.064 7	4.004 8	4.617 8	0.050 6
10	954.41	990.30	0.059 3	0.066 0	4.096 9	4.796 5	0.053 2
11	900.88	905.41	0.057 8	0.059 3	4.048 5	4.219 1	0.051 3
12	864.70	888.73	0.053 0	0.058 7	3.621 4	4.047 7	0.056 9
13	838.49	869.46	0.051 3	0.056 0	3.493 3	3.933 5	0.053 1
14	856.67	890.32	0.052 1	0.058 3	3.516 8	4.043 8	0.061 6
15	953.60	969.59	0.060 9	0.064 9	4.256 3	4.517 9	0.060 4
16	979.48	1 015.21	0.062 2	0.070 8	4.357 1	5.030 9	0.064 3
17	1 031.16	1 042.27	0.068 2	0.072 0	4.932 5	5.266 4	0.058 8
18	1 049.91	1 088.40	0.067 8	0.074 8	4.828 1	5.609 9	0.054 2
19	1 058.73	1 084.23	0.069 5	0.074 8	5.000 7	5.529 4	0.064 5
20	1 038.05	1 060.71	0.067 5	0.073 6	4.905 5	5.316 0	0.057 8
21	991.81	1 021.90	0.063 2	0.069 3	4.602 5	5.119 2	0.058 2
22	947.72	949.12	0.063 9	0.064 6	4.583 5	4.635 4	0.057 4
23	816.02	842.26	0.048 5	0.054 4	3.581 4	3.903 4	0.060 3
24	733.12	741.28	0.042 7	0.045 2	3.083 2	3.267 0	0.064 1

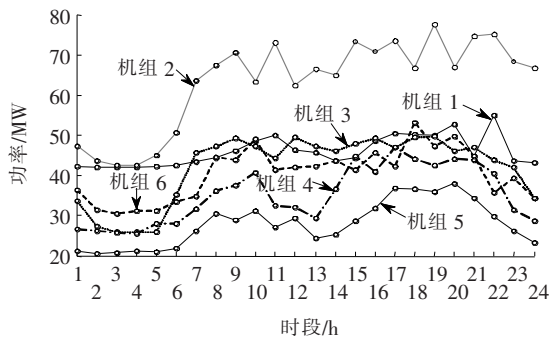
最大满意度决策获得满足随机模糊机会约束的日前 24 时段输配交互最优潮流策略,日前最优折衷机组调度计划如图 6 所示。图中火电机组 2 出力波动性较大,火电机组的机端调压与无功装置调整计划也具有一定波动,显示了常规火电机组和无功补偿为应对负荷变化和风电随机模糊不确定性的调节,与常规机组出力不同的是图中曲线是随机模糊模拟下最大满意度决策结果,是随机模糊期望值,具有更加丰富的不确定性信息。

最大满意度决策的目标值如表 4 所示,日前多目标最优折衷策略下 24 时段输配交互电力系统的电压幅值和相角随机模糊期望值如图 7 所示。

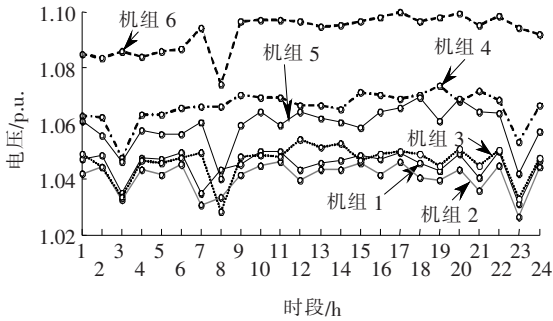
在 ADN 内部,接入分布式风电的 ADN 节点电压期望曲线如图 8 所示,由图可知,风电接入节点的电压波动范围均处在 $[0.99-1.05]$ 之间且波动幅度不大,在该算例中,分布式风电渗透率为 ADN 最大负荷的 128%且全额并网,却未引起其电压的强烈波动,TS 中规模化风电场以 10%渗透率全额并网,

仿真结果中的电压也处在安全范围内,说明该文中输配交互优化调度策略对风电的良好消纳作用。

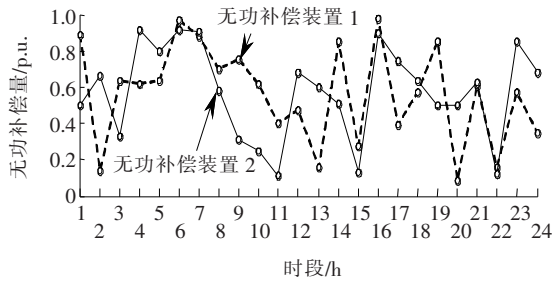
图9为各时段500次随机模糊模拟风电功率注入下ADN与TS交互功率曲线,图中功率正负分别表示ADN作为“电源”与“负荷”2种状态,从图中可知,配电网与输电网可以进行双向有功功率交互,当功率为正时,ADN向TS输送有功功率;当功率为负时,ADN从TS吸收有功功率。



(a) 机组有功输出功率



(b) 机组机端电压



(c) 无功补偿量

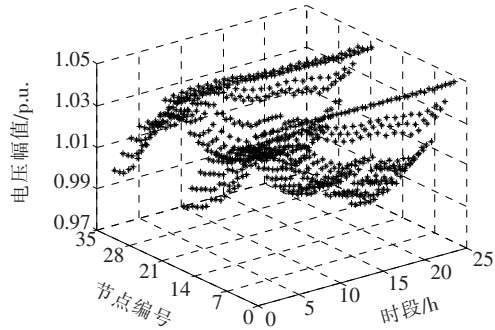
图6 日前最优折衷调度计划曲线

Figure 6 Day-ahead compromise optimal scheduling curve

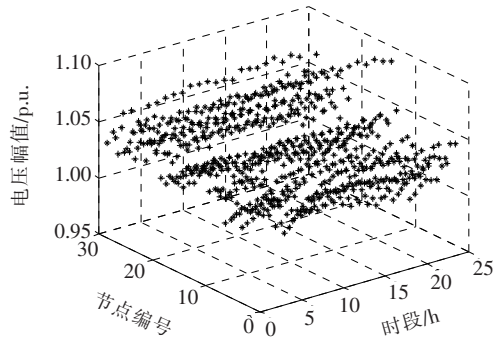
表4 最大满意度决策下的目标值

Table 4 objective values under the compromise optimal scheduling curve

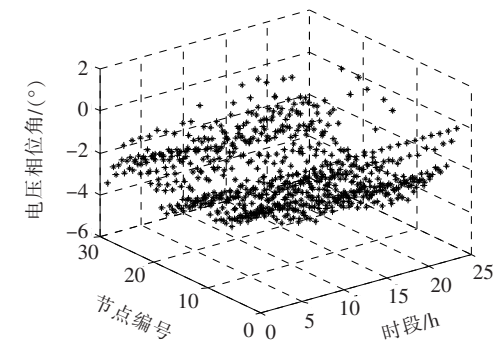
发电耗资/\$	碳排放量/t	网损/(MW·h)
2.0562×10^4	1.2496	87.9152



(a) 日前最大满意度决策下的ADN电压幅值随机模糊期望值



(b) 日前最大满意度决策下的TS电压幅值随机模糊期望值



(c) 日前最大满意度决策下的TS电压相角随机模糊期望值

图7 Pareto策略下的随机模糊期望值

Figure 7 Random-fuzzy expectation under Pareto solutions

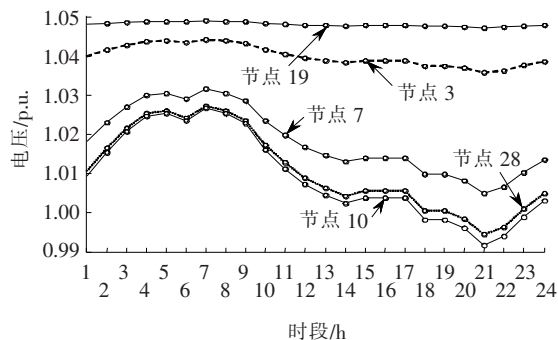


图8 ADN中DG接入节点电压幅值随机模糊期望值

Figure 8 DG bus magnitude random-fuzzy expectation in ADN

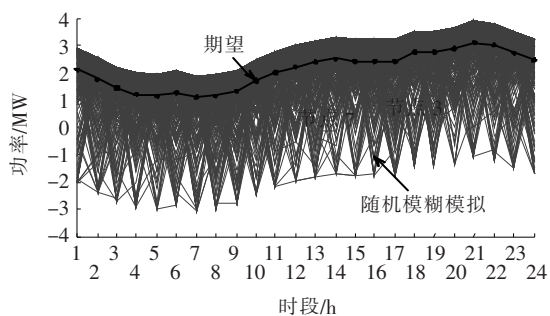


图 9 随机模糊注入下的 TS-ADN 交互功率

Figure 9 TS-ADN interaction power under random-fuzzy power

6 结语

针对风电规模化接入输电网和高比例分布式接入配网实际,考虑风电出力客观上具有的随机模糊性和波动性,提出一种考虑输配交互的电力系统多目标动态最优潮流方法,主要结论如下:

1)突破传统输配独立的最优潮流方法,考虑 ADN 与 TS 有功功率双向交互,为通过输配交互协同进行多目标优化和新能源消纳奠定理论基础,文中算例仅以一个输电系统和一个配网进行阐述,但该方法可方便地拓展到一个输电网与多个 ADN 交互的多目标最优潮流计算;

2)突破目前不确定性最优潮流一般以随机性或模糊性考虑风电出力的现状,考虑风电出力的随机模糊性,提出一种兼顾随机性和模糊性的最优潮流模型,更加符合不确定客观实际、具有丰富的信息;

3)提出随机模糊模拟、牛顿拉夫逊潮流、前推回代潮流、look-ahead、NSGA-II 可得到满足一定随机模糊机会约束置信水平的多目标日前动态最优潮流计划 Pareto 解集,利用最大满意度决策可根据决策者偏好进行决策,为日前调度决策者提供更加丰富的信息,表明算法正确有效性。

参考文献:

[1] Gupta N. A review on the inclusion of wind generation in power system studies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 530-543.
 [2] 马瑞,张强,吴瑕,等. 日风速随机模糊不确定模型[J].

中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6351-6358.

MA Rui, ZHANG Qiang, WU Xia, et al. Random fuzzy uncertain model for daily wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6351-6358.

[3] SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1484-1492.

[4] LI Zhengshuo, WANG Jianhui, SUN Hongbin, et al. Transmission contingency analysis based on integrated transmission and distribution power flow in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 30(6): 3356-3367.

[5] Kargarian A, FU Yong. System of systems based security-constrained unit commitment incorporating active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2489-2498.

[6] KE Deping, Chung C Y, SUN Yuanzhang. A novel probabilistic optimal power flow model with uncertain wind power generation described by customized gaussian mixture model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 200-212.

[7] Shargh S, Mohammadi-Ivatloo B, Seyedi H, et al. Probabilistic multi-objective optimal power flow considering correlated wind power and load uncertainties[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 10-21.

[8] 李暄,马瑞,曾婷,等. 含风电与碳捕集电厂的电力系统多目标动态最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 30-37.

LI Xuan, MA Rui, ZENG Ting, et al. Multi-objective dynamic optimal power flow for power system considering wind farm and carbon capture power plant[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 30-37.

[9] 马瑞,曾婷,陈元新,等. 考虑碳捕集电厂的电力系统多目标最优潮流及其碳流分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 14-21.

MA Rui, ZENG Ting, CHEN Yuanxin, et al. Analysis of carbon capture power plants-considered multi-objective optimal power flow and carbon flow for Power Systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 14-21.

- [10] 吴瑕,马瑞,李晖,等. 高风电穿透变电站母线净有功功率分布的随机模糊模型[J]. 电力科学与技术学报, 2017,32(2):111-118.
WU Xia, MA Rui, LI Xuan, et al. Random fuzzy model of net active power for high wind penetrated substation bus[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(2):111-118.
- [11] 马瑞,苏珏,蒋铁铮,等. 风电场风速概率分布云变换建模[J]. 电力科学与技术学报, 2016,31(3):35-41.
MA Rui, SU Yu, JIANG Tiezheng, et al. Wind speed probability distribution modeling with cloud transformation for wind power plant[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(3):35-41.
- [12] 秦泽宇,马瑞,张强,等. 考虑风光互补的电力系统多目标随机优化发电方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015,30(3):53-60.
QIN Zeyu, MA Rui, ZHANG Qiang, et al. A multi-objective stochastic optimization scheduling of electricity-generating system considering wind and photovoltaic complementary[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015,30(3):53-60.
- [13] 马瑞,金艳,刘鸣春. 基于机会约束规划的主动配电网分布式风光双层优化配置[J]. 电工技术学报, 2016,31(3):145-154.
MA Rui, JIN Yan, LIU Mingchun. Bi-level optimal configuration of distributed wind and photovoltaic generations in active distribution network based on chance constraint programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(3):145-154.
- [14] 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.
- [15] 高红均,刘俊勇,魏震波,等. 主动配电网分层鲁棒规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(5):1389-1400.
GAO Hongjun, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. A bi-level robust planning model of active distribution network and its solution method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(5):1389-1400.
- [16] 马瑞,康仁,姜飞,等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(1):150-156.
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(1):150-156.