

DOI: 10.7667/PSPC171433

基于无迹变换随机潮流建模的主动配电网优化调度

韩笑, 周明, 李庚银

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为了解决风电和电动汽车大量接入主动配电网所引发的随机优化调度问题, 利用基于无迹变换的随机潮流计算方法处理风电出力的波动性、电动汽车充电的随机性以及电网负荷的随机波动。进而建立了以电动汽车充电功率和分布式电源出力为优化变量, 以配电网运行费用最小、有功网损最小和负荷方差最小为优化目标的主动配电网随机优化模型。同时, 采用多目标粒子群算法对模型进行求解, 并以改进的 IEEE 33 节点测试系统为例对该模型进行仿真。仿真结果表明: 考虑不确定性和电动汽车有序充电的优化调度模型, 可以有效地减少配电网运行的成本、降低网损和缩小峰谷差, 验证了所提模型的正确性和有效性。

关键词: 电动汽车; 主动配电网; 无迹变换; 随机潮流; 多目标优化

Stochastic optimal dispatching of active distribution networks based on stochastic power flow modeling using unscented transformation

HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin

(State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: In order to address the stochastic optimization scheduling problems brought by the high penetration of wind power and electric vehicles connected into active distribution network, this paper adopts a stochastic power flow method based on unscented transform to deal with uncertainties of wind power output, the charging pattern of electric vehicles, and the load of power grid. On this basis, this paper proposes a novel multi-objective stochastic optimization model of active distribution networks that aims to minimize the operational costs, the power losses, and load variance through controlling the charging power of electric vehicles and the output power of distributed generation. In addition, the multi-objective particle swarm algorithm is used to solve the proposed model. The proposed model is examined on transformed IEEE 33-bus test system. The simulation results show that optimal dispatching models that consider uncertainty and coordinated charging of electric vehicles can effectively cut down the operation cost of distribution networks, reduce the power losses, and decrease the difference between peak and valley, thereby verifying the validity and effectiveness of the proposed model.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: electric vehicles; active distribution networks; unscented transformation; stochastic power flow; multi-objective optimization

0 引言

当前, 全球面临的环境污染、气候变化及传统化石能源日益紧缺等危机, 促进了分布式发电技术^[1]尤其是可再生能源发电技术的飞速发展。与常规能源相比, 可再生能源具备清洁无污染^[2]、开发成本低和开发潜力大等优势, 能够改善能源结构, 减少环境污染并缓解电能紧张。预计到 2020 年, 中国

风电机组装机容量计划将达到 2 亿 kW^[3]。除了在电源侧实现可再生能源发电替代之外, 在需求侧大力推行电动汽车, 作为一种减缓能源紧缺和环境污染的有效措施。因而, 电动汽车充放电负荷已成为配电网的重要组成部分^[4]。然而, 大规模的电动汽车入网充电, 会加重高峰时段的电网负担, 对电网用电安全造成威胁^[5]。与此同时, 大量的可再生能源接入配电网后, 配电网将由传统的无源网络逐步演变为具有复杂特性的有源系统, 对配电网的运行与调度带来新的挑战。为了应对以上问题, 主动配电网

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0900100)

网(Active Distribution Network, AND)的概念应运而生。主动配电网是以经济性和安全性为目标,根据电力系统的实际运行状态,通过灵活的调节电源、网络和负荷,对大量接入的可再生能源、储能系统、可控负荷等分布式能源(Distribution Energy Resource, DER)进行主动控制和主动管理的配电网^[6-7]。显然,传统配电网优化运行模型和算法已难以满足新的发展需求,因此,适用于主动配电网特性的优化调度模型和算法成为当前配电网运行研究的热点问题之一。

目前,关于主动配电网优化调度研究,主要还是从经济运行的角度出发的。例如文献[8]以可控分布式发电单元、储能单元以及联络开关为控制手段,研究以整个调度周期的运行成本最低为目标的主动配电网调度问题;文献[9]提出了一个主动配电网优化调度的研究框架,通过优化控制分布式电源和需求响应负荷,达到日前运行费用最小的目的。然而,针对分布式电源大量接入的主动配电网,调度人员通过制定不同的研究目标来优化控制这些分布式电源,不但可以达到减少运行费用的目的,同时也可改变配电网潮流,进而改善配电网网损。同时,合理控制电动汽车的充电行为,将会缓解高峰时段用电紧张的情况,还可以减小峰谷差,抑制负荷波动。因此,采用多目标优化策略和考虑最优潮流的调度模型,将更适用于研究主动配电网优化运行问题。

由于可再生能源出力的间歇性和电动汽车充电行为的随机性,使得配电网运行面临大量的不确定性因素。目前,在处理这些不确定性问题时多采用随机规划的方法。文献[10]针对间歇性电源和负荷的不确定性问题,利用拉丁超立方抽样和样本缩减技术,构建研究场景,提出了一种包含日前和实时调度的两步优化模型。文献[11]针对负荷和风电的不确定性,基于多场景技术,建立了一种考虑可入网电动汽车的智能电网节能减排调度模型。上述文献均没有考虑潮流约束的影响,而且,基于场景的随机规划方法计算量大,通常需要借助场景缩减方法来降低计算负担。针对上述问题,本文采用基于无迹变化(Unscented Transformation, UT)的随机潮流来处理主动配电网调度模型中的不确定性因素和潮流约束。目前,随机潮流计算方法主要有蒙特卡洛模拟、解析法和点估计法。蒙特卡洛方法需要大量的随机抽样,求解速度较慢。解析法求解配电网交流潮流时,需要对这种非线性模型进行十分繁琐的线性化处理。点估计是根据输入随机变量的概率分布,近似求解输出变量的概率分布情况,计算速度快,但是,当随机变量数目较大时,其计算精度较

低,并且不能处理随机变量间的相关性。然而,UT方法被认为是一种有效地处理随机问题(具有或不具有相关性不确定变量)的方法^[12]。该方法通过一系列非线性变换,对输出的随机变量进行统计计算。其主要的优势在于:1)实现简单;2)计算效率高;3)当随机变量数目较大时,计算精度不会随之降低;4)适用于具有相关性的多个不确定性变量的随机问题^[13]。配电网中各类随机变量间是存在复杂的相关性的^[14],特别是在大规模风电接入的配电网系统中,风机地理位置比较靠近,各风机感受的风速具有较强的相关性^[15]。因此,UT相对于其他随机潮流计算方法,更适用于考虑随机因素的主动配电网潮流计算。

本文针对风电和电动汽车大量接入的主动配电网优化调度问题,考虑风场出力、电动汽车充电行为及负荷功率的不确定性,建立了相应的概率模型,采用基于无迹变换的随机潮流方法,将大量场景的不确定性潮流计算转化为少量Sigma样本点处的确定潮流计算。从减小运行费用、提高能量效率和改善负荷特性角度出发,建立了以调度运行费用均值、配电网网损均值和负荷方差均值最小的多目标随机优化调度模型。利用多目标粒子群算法对算例进行了求解。仿真结果验证了所提方法的正确性。本文的成果为研究含有大规模分布式电源和可控负荷的主动配电网优化运行问题,提供了新的研究方法和模型框架。

1 不确定性建模

1.1 风力发电机出力模型

根据大量实测数据,大部分地区的风速 v 遵从威布尔分布,其概率密度函数为^[16]

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

式中, c 和 k 分别为威布尔分布的形状和尺度参数。

风力发电机组的出力随风速的变化而波动,可以表示为风速的函数,如式(2)。

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < V_{ci}, v \geq V_{co} \\ P_r \frac{v - V_{ci}}{V_r - V_{ci}}, & V_{ci} \leq v \leq V_r \\ P_r, & V_r \leq v \leq V_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电机组实际输出的有功功率; P_r 为风电机组的额定功率; V_{ci} 、 V_{co} 、 V_r 分别为风电机组的切入、切出和额定风速。

1.2 负荷模型

由于测量误差、天气变化和电价波动等原因,负荷功率 P_L 是具有随机波动性的,可近似认为服从

正态分布, 其概率密度函数^[17]为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left(-\frac{(P_L - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right) \quad (3)$$

式中: σ_L 为负荷功率的标准差; μ_L 为负荷功率的预测值。

1.3 电动汽车充电模型

1) 电动汽车随机充电模型。根据一份交通部对家庭出行调查项目(NHTS)的数据^[18]显示: 利用极大似然估计的方法可以统计出电动汽车最后到达时刻近似服从正态分布, 日行驶里程数近似服从对数正态分布。则电动汽车最后到达时刻 t_s 的概率密度函数为

$$f_T(t_s) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(t_s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right), & (\mu_s - 12) < t_s < 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(t_s + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right), & 0 < t_s \leq (\mu_s - 12) \end{cases} \quad (4)$$

电动汽车日行驶里程数 s 的概率密度函数为

$$f_D(s) = \frac{1}{s\sigma_D\sqrt{2\pi}\sigma_D} \exp\left(-\frac{(\ln s - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) \quad (5)$$

式中: μ_D 和 μ_S 分别为电动汽车日行驶里程和最后到达时刻的期望; σ_D 和 σ_S 分别为它们的标准差。 $\mu_D = 3.2$, $\sigma_D = 0.88$, $\mu_S = 17.6$, $\sigma_S = 3.4$ 。

电动汽车充电时长 t_{ch} 可用式(6)表示。

$$t_{ch} = \frac{sW_{100}}{100\eta_c P_c} \quad (6)$$

式中: s 为日行驶里程(公里); W_{100} 为百公里耗电量; η_c 为充电效率; P_c 为充电功率。如果电动汽车充电功率为定值, 则电动汽车充电时长的概率密度函数与日行驶里程数的概率密度函数相同。

电动汽车在某个时刻 t 处于充电状态的概率为

$$F_{ch}(t) = \int_0^{t_{ch\max}} \int_0^{t-t_{ch}} f_{tch} f_T dt_s dt_c + \int_0^{t_{ch\max}} \int_t^{t+24-t_{ch}} f_{tch} f_T dt_s dt_c \quad (7)$$

式中: f_{tch} 为充电时长的概率密度函数; $t_{ch\max}$ 为电动汽车充电时长的上限。

2) 电动汽车有序充电策略。大规模的电动汽车接入配电网, 将加剧配电网的负荷峰谷差, 对配电网的安全运行可能产生负面影响。为了减少这些负面影响, 需要通过充电站对电动汽车实施有序充电控制^[19]。目前, 充电站对站内电动汽车的有序充电的多种控制方法, 主要可以划分为不可间断充电和

可间断充电两类。本文主要研究通过优化控制电动汽车充电的起始时间, 实现对电动汽车的不间断充电的有序充电控制。具体有序充电控制策略为: 以各个电动汽车的开始充电时间为优化变量, 以缩小峰谷差、抑制负荷的波动、降低配电网运行费用和有功网损为目标, 控制到达站内的各个电动汽车的起始充电时间, 从而引导电动汽车有序充电, 并实现优化电动汽车充电功率的有序充电控制方法。

2 基于无迹变换的随机潮流

UT 方法是由英国学者 Julier 提出的一种非线性变化方法^[20], 可以克服需要线性化处理的传统概率方法的缺点, 编程简单, 易于实现, 近些年来得到了广泛的应用^[14, 21-24]。

下面以随机潮流计算为例, 对 UT 基本原理进行简要说明。假设随机变量 \mathbf{X} 和随机变量 \mathbf{Y} 分别为随机潮流的输入变量和输出变量, 则有

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{X}) \quad (8)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{P}_L, \mathbf{Q}_L, \mathbf{P}_{DG}, \mathbf{Q}_{DG}, \dots]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{S}_{ij}, \dots]^T \quad (10)$$

式中: \mathbf{P}_L 和 \mathbf{Q}_L 分别为负荷的有功、无功功率向量; \mathbf{P}_{DG} 和 \mathbf{Q}_{DG} 分别为分布式电源产生的有功、无功功率向量; \mathbf{U} 和 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压幅值和相角向量; \mathbf{S}_{ij} 为支路功率向量。

假设已知输入变量 \mathbf{X} 的均值 $\boldsymbol{\mu}_X$ 以及各个随机变量的标准差 δ_i 和各变量间的相关系数 ρ_{ij} 。首先, 由各随机变量的标准差 δ_i 和各变量间的相关系数 ρ_{ij} , 可以求得输入变量 \mathbf{X} 的协方差 \mathbf{C}_X 。

$$\mathbf{C}_X = \begin{bmatrix} \rho_{11}\delta_1^2 & \rho_{12}\delta_1\delta_2 & \dots & \rho_{1n}\delta_1\delta_n \\ \rho_{21}\delta_2\delta_1 & \rho_{22}\delta_2^2 & \dots & \rho_{2n}\delta_2\delta_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\delta_n\delta_1 & \rho_{n2}\delta_n\delta_2 & \dots & \rho_{nn}\delta_n^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

然后, 以对称采样为例, 按照式(11)一式(13)对变量 \mathbf{X} 进行采样, 形成 $N=2n+1$ 个 Sigma 样本点集 $\{\mathbf{X}_i\} (i=1, 2, \dots, N)$, 其中 n 为变量 \mathbf{X} 的个数; N 为采样点数。

$$\mathbf{X}_0 = \boldsymbol{\mu}_X \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_i = \boldsymbol{\mu}_X + \alpha \sqrt{\frac{n}{1-W_0}} \sqrt{\mathbf{C}_X(i)}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_{n+i} = \boldsymbol{\mu}_X - \alpha \sqrt{\frac{n}{1-W_0}} \sqrt{\mathbf{C}_X(i)}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中: α 为比例参数; W_0 为中心样本点权重系数; $\sqrt{\mathbf{C}_X(i)}$ 为下三角矩阵 $\sqrt{\mathbf{C}_X}$ 的第 i 列元素, 可以由协方差矩阵 \mathbf{C}_X 经过 Cholesky 分解得到。

各采样点对应的均值权重 $W_{m,i}$ 和协方差权重 $W_{c,i}$ 的计算表达式为

$$W_{m,o} = \frac{W_o}{\alpha^2} + 1 - \frac{1}{\alpha^2} \quad (15)$$

$$W_{m,i} = \frac{1 - W_o}{2n\alpha^2}, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (16)$$

$$W_{c,o} = \frac{W_o}{\alpha^2} + 1 - \frac{1}{\alpha^2} + \beta \quad (17)$$

$$W_{c,i} = \frac{1 - W_o}{2n\alpha^2}, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (18)$$

式中, β 为高阶参数。

最后, 将样本点集 $\{X_i\}$ 代入潮流计算公式(8)中, 得到变换后的样本点集 $\{Y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。对点集 $\{Y_i\}$ 进行加权运算, 就可逼近输出随机变量 Y 的概率统计特性, 进而计算出 Y 的均值 μ_Y 和协方差矩阵 C_Y 。

$$\mu_Y = \sum_{i=1}^N W_{m,i} Y_i \quad (19)$$

$$C_Y = \sum_{i=1}^N W_{c,i} (Y_i - \mu_Y)(Y_i - \mu_Y)^T \quad (20)$$

根据输出变量的协方差 C_Y 的对角项, 可以确定各个待求量的方差。根据 C_Y 的非对角项和其对应的随机变量的方差, 可以确定任意两个待求变量间的相关系数^[23]。

3 优化模型

本文以风力发电和微型燃气轮机两种 DER 和居民小区电动汽车充电站为优化对象, 建立以调度运行费用均值最小、网损均值最小和负荷波动方差均值最小为目标的多目标配电网优化运行模型。

3.1 目标函数

1) 运行费用均值目标

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N W_{m,n} \left(\sum_{k=1}^{N_{DG}} C_{DG,k,t} P_{DG,k,n,t} \Delta t + C_{TR,t} P_{TR,n,t} \Delta t \right) \quad (21)$$

式中: $P_{DG,k,n,t}$ 为第 k 台分布式电源在 t 时刻对应第 n 个采样点的输出功率; $P_{TR,n,t}$ 为 t 时刻第 n 个采样点对应的从上级电网购买的功率; N_{DG} 为接入配电网的分布式电源台数; N 为采样点总数; $C_{DG,k,t}$ 为第 k 台分布式电源在 t 时刻的上网电价; $C_{TR,t}$ 为 t 时刻电网的购电电价。

2) 网损均值目标

网损是衡量配电网运行的重要指标之一^[25]。合理调控电动汽车充电行为以及优化分布式电源的出力, 可以有效降低网损, 提高能效, 有利于系统的经济运行。

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N W_{m,n} \sum_{i \in N_b, j \in N_i} G_{ij} \left(U_{i,n,t}^2 + U_{j,n,t}^2 - 2U_{i,n,t} U_{j,n,t} \cos \theta_{ij} \right) \quad (22)$$

式中: N_b 为母线集合; N_i 为与节点 i 相邻节点的集合; $U_{i,n,t}$ 和 $U_{j,n,t}$ 分别为 t 时刻第 n 个采样点对应的节点 i 和 j 处的电压幅值; G_{ij} 为节点 i 与 j 之间线路的电导; θ_{ij} 为节点 i 和 j 电压间的相差角。

3) 负荷方差均值目标

为了抑制电动汽车随机充电对负荷曲线峰谷差的影响, 以负荷曲线的方差均值最小化为目标, 优化控制电动汽车充电功率, 缩小峰谷差, 降低配电网负荷的波动, 使负荷曲线更加平坦。

$$\min f_3 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^N W_{m,n} \left(P_{load,n,t} + \sum_{k=1}^{N_{EV}} P_{EV,k,n,t} \right) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N W_{m,n} \left(P_{load,t} + \sum_{k=1}^{N_{EV}} P_{EV,k,n,t} \right) \right)^2 \quad (23)$$

式中: $P_{load,n,t}$ 为 t 时刻第 n 个采样点对应的负荷功率; $P_{EV,k,n,t}$ 为第 k 辆电动汽车在 t 时刻第 n 个采样点对应的充电功率; N_{EV} 为接入充电站的电动汽车总数。

3.2 约束条件

1) 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,n,t} = U_{i,n,t} \sum_{j \in i} U_{j,n,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,n,t} = U_{i,n,t} \sum_{j \in i} U_{j,n,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{i,n,t}$ 和 $Q_{i,n,t}$ 分别为 t 时刻第 n 个采样点对应的节点 i 处注入的有功功率和无功功率; B_{ij} 为节点 i 与 j 之间的线路电纳。

2) 线路潮流约束

$$S_{ij,n,t} \leq S_{ij,max} \quad (25)$$

式中, $S_{ij,n,t}$ 为 t 时刻第 n 个采样点对应的支路 ij 的功率。

3) 节点电压约束

$$U_{i,min} \leq U_{i,n,t} \leq U_{i,max} \quad (26)$$

式中, $U_{i,max}$ 和 $U_{i,min}$ 分别为节点 i 的电压上、下限。

4) 出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DG,k,n,t} \leq P_{DG,max,k,t} \\ 0 \leq P_{TR,n,t} \leq P_{TR,max,t} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{DG,max,k,t}$ 为第 k 台分布式电源有功出力的最大值; $P_{TR,max,t}$ 为上级电网输送的最大出力。

5) 电动汽车

$$S_{OCn,t} = S_{OCn,t-1} + \frac{\eta_c P_{EV,n,t}}{E_{n,max}} \quad (28)$$

$$S_{OCn\min} \leq S_{OCn,t} \leq S_{OCn\max} \quad (29)$$

式中: $E_{m\max}$ 为电池容量; $S_{OCn,t}$ 为电池的荷电状态; $S_{OCn\max}$ 和 $S_{OCn\min}$ 分别为荷电状态的上、下限。

4 模型求解

4.1 多目标求解方法

针对上述的多目标优化问题, 本文采用多目标粒子群算法进行求解。粒子群算法能够很好地处理非线性混合整数问题, 比其他智能算法具有更高的收敛速度, 在多目标优化方面得到了广泛的研究。

多目标优化问题的解通常不是唯一的, 而是存在一个最优解集合, 集合中元素称为 Pareto 最优解。基于 Pareto 占优关系, 利用粒子群算法求解本文所提模型, 得到 Pareto 最优集, 然后使用模糊决策方法从 Pareto 最优集中选取最优解。第 i 个 Pareto 解的第 j 个目标值的隶属函数^[26]为

$$u_{ij} = \frac{f_{j\max} - f_{ij}}{f_{j\max} - f_{j\min}}, \quad j=1,2,3 \quad (30)$$

式中: f_{ij} 为第 i 个 Pareto 解的第 j 个目标值; $f_{j\max}$ 和 $f_{j\min}$ 分别为 Pareto 解的第 j 个目标的最大和最小值。则对于第 i 个 Pareto 解, 其标准化的隶属度函数为

$$u_i = \frac{\sum_{j=1}^M u_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^M u_{ij}} \quad (31)$$

式中, I 为 Pareto 解的个数。选择隶属度函数 u_i 的最大值为最优解。

4.2 计算流程

本文利用 UT 方法和粒子群算法对所提的配电网优化模型进行求解, 求解的流程如图 1 所示。具体求解步骤如下所述。

1) 输入原始数据。输入风电、负荷、电动汽车充电行为和电网结构参数以及 UT 方法和粒子群算法参数。

2) 根据风速、负荷和电动汽车充电行为的概率分布以及各风场间风速的相关系数, 确定输入变量的均值 μ_X 和协方差 C_X 。

3) 根据本文第 2 节有关 UT 方法计算原理的介绍, 利用式(12)一式(18), 可以确定 N 个样本点集 $\{X_i\}$ 以及各样本点对应的均值权重 $W_{m,i}$ 和协方差权重 $W_{c,i}$ 。

4) 利用粒子群算法, 计算每个样本点 X_i 变换后的目标变量样本点 Y_i , 形成输出变量样本点集 $\{Y_i\}$ 。

5) 通过式(19)一式(20), 对样本点集 $\{Y_i\}$ 进行加权处理, 就可以得到输出变量的均值 μ_Y 和协方差矩阵 C_Y 。

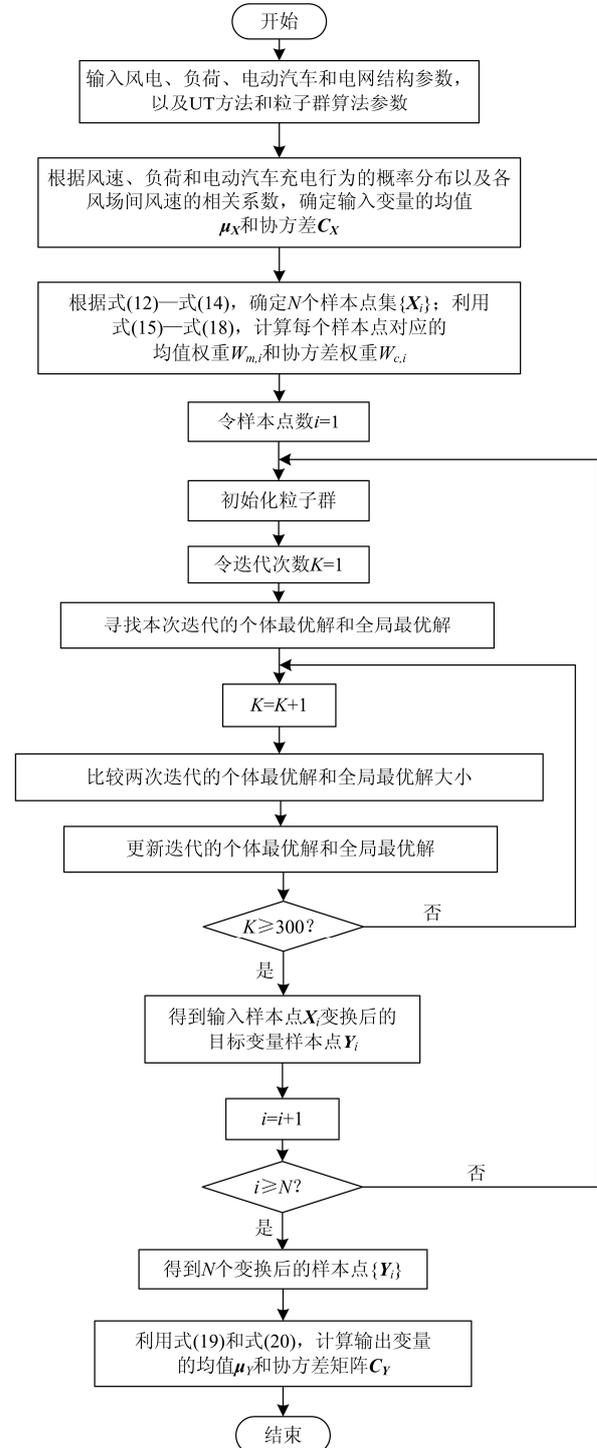


图 1 模型求解流程图

Fig. 1 Flowchart of model solution

5 算例仿真

5.1 算例描述

为验证上述随机优化模型的有效性, 本文对标准 IEEE 33 节点系统进行了改造, 改造后的算例系统如图 2 所示。电压上限取 1.05 倍的额定电压, 电

压下限取 0.95 倍的额定电压。支路容量最大值为 5300 kVA^[27]。

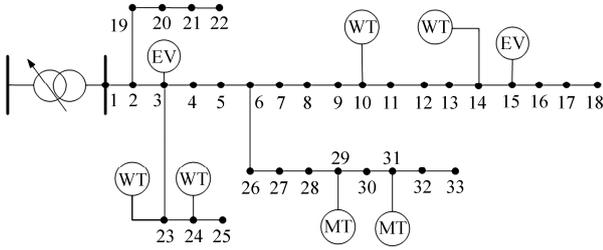


图 2 IEEE 33 节点系统

Fig. 2 IEEE 33-bus system

5.2 基本数据

这个配电网系统包含 4 个风电场, 2 台燃气轮机和 2 个居民小区电动汽车充电站。为了研究相近地区风速的相关性, 这里将 4 个同等容量的风电场分别安装在节点 10、节点 14、节点 23 和节点 24 上, 各节点风电场装机容量均为 0.5 MW。假设 4 个风电场接入区域的全天风速预测值近似相同, 具体如图 3 所示。风速 Weibull 分布中参数 $k=3.5$ 、 $c=10.7$ 。切入风速 $V_{ci}=3$ m/s, 切出风速 $V_{co}=25$ m/s, 额定风速 $V_r=14$ m/s。将上述风速和风电场额定容量等信息代入式(2)中, 可以算出风电场的发电功率。燃气轮机安装在节点 29 和节点 31, 有功出力范围为 $[0, 0.6$ MW]。节点 3 和节点 5 上分别接有电动汽车充电站, 假设一天之内会有 1000 辆电动汽车均匀接入这两个充电站完成充电。电动汽车电池容量为 45 kWh, 百公里耗电量为 20 kWh, 常规充电功率为 2 kW, 充电效率为 90%。考虑到用车早高峰, 本文将早晨 8 点作为结算点。假设每日出行前, 电动汽车均被充满。

在该算例中, 假设电力公司对用户售电实行分时电价, 每个时段的具体电价如表 1 所示。假设风电上网电价为 800 元/MWh, 燃气轮机上网电价为 500 元/MWh。该系统全天负荷预测值曲线如图 4 所示。

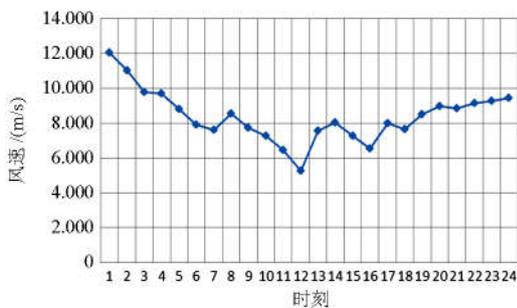


图 3 全天风速预测值

Fig. 3 Wind speed prediction for a day

表 1 分时价格

Table 1 Electricity prices of time-of-use

分时电价	时段	电价/(元/MWh)
峰时	12:00—16:00; 19:00—21:00	550
平时	8:00—11:00; 17:00—18:00; 22:00—24:00	480
谷时	1:00—7:00	250

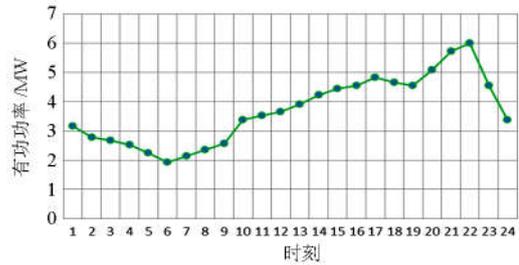


图 4 负荷预测值曲线

Fig. 4 Load forecasts curve

5.3 场景设置

本文从三个方面开展对比研究: 1) 大量电动汽车入网无序和有序充电对配电网的影响; 2) 风电出力的波动性及电动汽车充电的随机性对配网运行的影响; 3) 风电场间的风速相关性对配电网优化调度结果的影响。针对这三个方面的内容, 本文设置以下三个场景, 对调度结果进行对比分析。

场景 1: 不考虑风电出力的随机性和风速的相关性, 大量电动汽车随机接入配电网充电的调度场景。

场景 2: 不考虑风速相关性, 仅考虑风速、负荷以及电动汽车入网时间和日行驶里程这些不确定性因素, 大量电动汽车接入配电网根据调度指令进行有序充电的调度场景。

场景 3: 在场景 2 的基础上, 考虑风速相关性的调度场景。

5.4 优化结果

本文采用粒子群算法, 在 Matlab 仿真平台上对所提模型进行仿真分析。假设粒子种群大小为 100, 迭代次数为 300。无迹变换方法计算过程中, 采样的中心样本点权重系数 W_0 取 0.5, 比例参数 α 取 0.2, 高阶参数 β 取 2。研究不确定性因素对系统的影响时, 分别取风速和负荷的预测值作为其均值, 风速和负荷的标准差分别取其均值的 4%和 5%。

场景 1 的调度结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 大部分用户都选择下班后的晚高峰, 对电动汽车进行充电, 严重增加了此时段配电网的负担, 拉大了全网负荷的峰谷差。与原始负荷预测值比较, 该场景下负荷的峰值从原来的 5.9849 MW 增加到

6.9905 MW, 负荷峰谷差从 4.053 MW 增加到 4.9754 MW, 峰荷增长率为 17%, 峰谷差增长率为 23%。可见, 大量电动汽车随机充电会对配电网负荷曲线以及系统安全运行产生严重的负面影响。



图 5 场景 1 的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of scenario 1

在场景 2 运行模式下, 充电站根据配电网的调度指令, 控制电动汽车的充电行为, 同时, 为了研究风场出力、电动汽车充电行为及负荷功率的不确定性对配电网运行的影响, 选取基于 UT 的随机潮流处理这些不确定性因素, 具体调度结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 配电网的用电晚高峰时段, 燃气轮机基本处于满发状态, 而此时的电动汽车充电功率基本为零, 从而减少了此时段的用电负荷, 降低了高峰时段的购电成本; 在负荷低谷时段, 燃

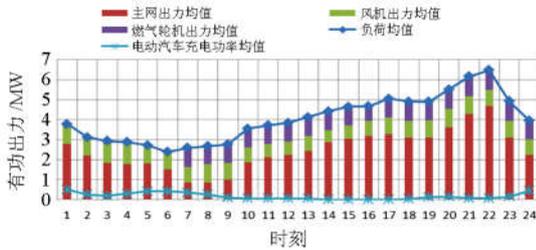


图 6 场景 2 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of scenario 2

气轮机出力基本为零, 电动汽车在此时段进行大量充电工作, 增加了低谷时段的用电负荷, 缩小了系统的负荷峰谷差, 使得负荷曲线更加平坦。

相关系数取 0.5~1.0 时, 一般表示随机变量间存在强相关。为了研究风速相关性对调度结果的影响, 在场景 3 运行模式中, 假设相邻风电场间风速的相关系数为 0.6, 具体的仿真结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 风电出力的均值和燃气轮机出力的均值与场景 2 相比, 变化不大。



图 7 场景 3 的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of scenario 3

表 2 列出了 3 个场景的调度结果的均值和标准差。从表 2 中可以看出, 通过合理调度电动汽车充电和分布式电源出力, 场景 2 和场景 3 的调度运行费用相比于场景 1 有所降低, 负荷波动也得到了抑制, 网损略有升高。对比场景 3 与场景 2 的调度结果可知, 考虑风速相关性后, 目标函数值、分布式电源出力和主网出力的均值, 受风速相关性的影响很小, 其均值的变化均不超过 0.5%; 同时, 目标函数值和随机变量的标准差受风速相关性的影响较明显, 变化超过 10%。综上可知, 考虑随机变量相关性的配电网调度优化方案能更全面地指导实际运行。

表 2 不同场景下调度结果对比分析

Table 2 Comparison of scheduling results under different scenarios

结果类型	场景	调度费用/元	网损/MWh	负荷方差/MW ²	风电 总出力/MW	燃气轮机 总出力/MW	主网 总出力/MW
均值	场景 1	50 310.94	0.3224	2.1198	19.31	16.19	61.87
	场景 2	48 651.23	0.3273	1.3036	19.44	17.66	59.72
	场景 3	48 666.14	0.3283	1.3092	19.51	17.71	59.57
标准差	场景 2	774.95	0.0247	0.073	0.9723	0.3034	1.0748
	场景 3	869.12	0.0275	0.085	1.957	0.3413	1.2125

6 结论

本文建立了以调度运行费用、网损及负荷方差最小为目标的多目标主动配电网随机优化调度模型。通过仿真分析得到以下结论:

- 1) 利用 UT 方法, 可以有效地求解含有随机变量的配电网潮流, 并能简单地处理随机变量的相关性。
- 2) 对电动汽车和分布式电源进行协同优化, 可以有效地减少运行费用, 降低网损, 缩小峰谷差, 实现配电网的经济可靠运行。

3) 考虑风速相关性的调度结果表明, 调度结果的标准差受相关性影响较大, 实际调度运行中应考虑随机变量间的相关性。

参考文献

- [1] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [2] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources—a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [3] 刘琳. 新能源风电发展预测与评价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Lin. Research on forecast and evaluation model in new energy wind power development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [4] 国务院. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[S]. 2012.
- [5] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plugin electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [6] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [7] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23.
- [8] 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.
- [9] GOLSHANNAVAZ S, AFSHARNIA S, AMINIFAR F. Smart distribution grid: optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2402-2411.
- [10] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657-1665.
GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657-1665.
- [11] 张晓花, 谢俊, 赵晋泉, 等. 考虑风电和电动汽车等不确定性负荷的电力系统节能减排调度[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2408-2414.
ZHANG Xiaohua, XIE Jun, ZHAO Jinquan, et al. Energy-saving emission-reduction dispatching of electrical power system considering uncertainty of load with wind power and plug-in hybrid electric vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2408-2414.
- [12] ZUBO R H A, MOKRYANI G, RAJAMANI H S, et al. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 72: 1177-1198.
- [13] AIEN M, HAJEBRAHIMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M. A comprehensive review on uncertainty modeling techniques in power system studies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1077-1089.
- [14] 蒲天骄, 赵灿, 陈乃仕, 等. 基于 D-S 理论的主动配电网不确定性潮流及运行风险分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 53-61.
PU Tianjiao, ZHAO Can, CHEN Naishi, et al. D-S theory based uncertainty flow calculation and operational risk analysis for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 53-61.
- [15] 蔡德福, 陈金富, 石东源, 等. 风速相关性对配电网运行特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 150-155.
CAI Defu, CHEN Jinfu, SHI Dongyuan, et al. Impact of wind speed correlation on operation characteristics of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 150-155.
- [16] 张沈习, 程浩忠, 张立波, 等. 含风电机组的配电网多

- 目标无功规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 40-46.
- ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Multi-objective reactive power planning in distribution system incorporating with wind turbine generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 40-46.
- [17] 谢开贵, 肖畅. 计及负荷不确定性的无功优化模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 18-22.
- XIE Kaigui, XIAO Chang. A reactive power optimization model and algorithm considering load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 18-22.
- [18] Federal High Way Administration. US department of transportation[EB/OL]. [2011-06]. <http://nhts.ornl.gov/2009/pub/stt.pdf>.
- [19] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.
- HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [20] JULIER S, UHLMANN J, DURRANTWHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [21] AIEN M, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F. Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2233-2241.
- [22] VALVERDE G, TERZIJA V. Unscented Kalman filter for power system dynamic state estimation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 5(1): 29-37.
- [23] 鲍海波, 韦化. 基于无迹变换的含大规模风电场电力系统概率最优潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 46-53.
- BAO Haibo, WEI Hua. Probabilistic optimal power flow computation in power systems including large-scale wind farms based on unscented transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 46-53.
- [24] 楚云飞, 孙国强, 卫志农, 等. 基于无迹变换的含风电场电力系统可用输电能力计算[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2122-2128.
- CHU Yunfei, SUN Guoqiang, WEI Zhinong, et al. Calculation of available transfer capability of power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2122-2128.
- [25] 曾博, 杨煦, 张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 148-158.
- ZENG Bo, YANG Xu, ZHANG Jianhua. Multi-objective optimization for active distribution network scheduling considering renewable energy harvesting across regions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 148-158.
- [26] AGHAJANI G R, SHAYANFAR H A, SHAYEGHI H. Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 106: 308-321.
- [27] 宋文. 含分布式发电的配电网优化规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- SONG Wen. Research on optimal planning of the distribution network with distributed generation[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

收稿日期: 2017-08-25; 修回日期: 2017-10-29

作者简介:

韩笑(1987—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化调度、需求响应等; E-mail: hanxiao1118@126.com

周明(1967—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、电力市场、电力系统规划与可靠性等; E-mail: zhouting@ncepu.edu.cn

李庚银(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统、电能质量、新型输配电技术等。

E-mail: ligy@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)