

含有风电与光伏发电以及电动汽车的电力系统概率潮流

吴晨曦^{1,2}, 文福拴¹, 陈 勇³, 辛建波⁴

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018;

3. 杭州市余杭供电局, 浙江 杭州 311100; 4. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006)

摘要: 建立含有风电、光伏发电和可入网电动汽车(PEV)的电力系统概率潮流模型。基于历史气象数据对不同季节和不同天气状况下的风光数据进行模拟,并计及风电、光伏发电、PEV 充/放电及负荷的不确定性,在此基础上,对不同季节中每日不同时段电力系统采用三点估计法(3PEM)进行概率潮流计算,进而计算潮流结果的统计特性。某 140 节点配电系统的仿真结果验证了所提模型和方法的准确性。

关键词: 风电; 光伏发电; 可入网电动汽车; 概率潮流; 点估计法; 电力系统; 电动汽车

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.002

0 引言

概率潮流 PLF(Probabilistic Load Flow)计算的概念是在 20 世纪 70 年代提出的^[1],其能够综合考虑各种随机因素,应用概率理论来描述电力系统稳态运行特性。概率潮流已经在电力系统分析的许多方面得到成功应用,如网损分析、可靠性评估、可用输电能力概率分析、暂态稳定分析等。通过概率潮流可以得到线路过负荷、母线过电压等的概率统计量,对发现和解决电力系统的潜在问题与薄弱环节具有重要作用。

随着化石能源的逐步枯竭和温室气体导致的全球变暖问题的趋于严重,风力发电与光伏发电等可再生能源发电得到了快速发展^[2-3]。风力发电和光伏发电具有间歇性,二者同时也具有一定的互补性。长期来看,某些季节风能丰富但光能较少,而有些季节风能较少而光能丰富;短期来看,白天光能丰富,夜晚基本没有光能但一般风能较大。风光互补系统能够在一定程度上弥补单独风力发电或光伏发电的供电不稳定性。文献[4]用修正的 RBTS(Roy Billinton Test System)和 IEEE-RTS 构建了 4 个测试系统,研究了风电渗透率为 14%~15% 时的系统供电可靠性。文献[5]用滑铁卢大学仿真实验室(WATSUN)开发的光伏发电系统仿真软件 WATSUN-PV 仿真每小时的太阳辐射强度,用风速历史数据预测下一小时的风速,对不同渗透率和不同位置情况下风能与太阳能对系统供电可靠性的影响与燃料节省情况进行了研究。

文献[6]采用多目标遗传算法优化风电、光伏发电和柴油机组成的混合系统结构和控制策略,分别以孤岛系统使用年限内的费用最小和失负荷最少为目标,确定 Pareto 前沿。文献[7]以年费用最小为目标优化风机数量、轮毂高度、光伏电池板的倾角和配套的蓄电池容量,并已应用于我国东部沿海一带的通信中继站供电方案设计。

近年来,电动汽车(EV)在很多国家尤其是发达国家得到了快速发展,成为今后一段时间内有望明显拉动电力负荷上升的一个重要行业。现有的研究工作表明绝大多数电动汽车在一天中的 96% 的时间里是闲置的^[8]。通过电动汽车接入网络 V2G(Vehicle to Grid)技术^[9],这些闲置的电动汽车可以在用电高峰期将电能反送到电力系统中。所以,可入网电动汽车 PEV(Plug-in Electric Vehicle)也可以被当作储能装置使用。另一方面,大量电动汽车广泛接入会给电力系统的安全与经济运行带来显著的不确定性。

概率潮流可用于研究风电和光伏发电出力以及电动汽车消耗功率和向电力系统反向供电功率的不确定性对电力系统的影响,发现系统运行中的潜在风险,为系统运行控制提供参考。已有一些针对包括风电、光伏发电和电动汽车的电力系统概率潮流计算方面的研究报道。文献[10]考虑风力发电机出力与电动汽车供需随机性,以多控制变量约束为目标的最优潮流,采用混合自动学习机系统 HLAS(Hybrid Learning Automata System)对多目标约束控制变量进行优化。文献[11]假设负荷服从正态分布、风速服从 Weibull 分布,建立了相应的概率潮流模型。文献[12]则采用蒙特卡洛(MC)仿真方法求解含有光伏发电的配电系统概率潮流。

到目前为止,尚没有针对含有风力与光伏发电和电动汽车的电力系统进行概率潮流计算的研究报道。且在现有的研究工作中一般都用 Weibull 分布来模拟风速变化,用当地纬度、太阳赤纬、日出日落

收稿日期:2012-10-08;修回日期:2013-09-06

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2011BAA07B02);浙江省教育厅 2012 年高校科研项目(Y201223118);江西省电力公司科技项目

Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of China(2011BAA07B02),2012 Research Foundation for Universities from the Department of Education of Zhejiang Province(Y201223118) and a Project from Jiangxi Power Company

时角等参数计算太阳辐射强度,没有考虑风速和光照的季节特性与实际天气状况及一天中各小时的特性。事实上,每天的实际日照时数是决定太阳辐射量的最主要参数之一。这里采用三点估计法(3PEM)进行概率潮流计算,旨在以较少的计算量获得与大量蒙特卡洛仿真计算同等精度的结果^[13-14]。

在上述背景下,本文对含有风力与光伏发电和电动汽车的电力系统的概率潮流计算问题进行研究。首先推导一天内每个小时的风电机组出力与光伏发电出力的概率密度,并建立一天各时段电动汽车的充放电概率密度;然后发展了考虑天气状况的三点估计法概率潮流求解方法;最后,用真实的气象日值数据模拟不同季节的每天日照时数与日平均风速,并以某 140 节点配电系统为例来说明所构造的概率潮流模型的基本特征。本文所发展的概率潮流模型既考虑了风电和光伏发电的季节特性,又计及了风电和光伏发电的短期输出功率和电动汽车充/放电功率的不确定性,可以更准确地模拟系统运行状况。

1 风电/光伏发电出力的概率密度与电动汽车充/放电功率概率密度

1.1 风电机组出力的概率密度

气象站由测风仪测得的日平均风速 $\bar{v}_0$ 需要折算到在风机轮毂高度的日平均风速 $\bar{v}$ 。风速随高度的变化称为风切,通常用如式(1)所示的指数函数来描述风切变换:

$$\bar{v} = \bar{v}_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中, z 为轮毂高度; z_0 为气象测风仪的高度; α 为地面粗糙度,对开阔地一般取 1/7。

已有的研究工作普遍表明一年中每小时平均风速服从 Weibull 分布^[2]。但对于一天 24 h 的每个小时而言,湍流一般是不能忽略的^[2]。湍流指相对短期(如 10 min)的风速变化。为更准确地分析不同季节不同天气情况下每天各个时间段的风电机组出力,在每天平均风速的基础上考虑湍流对风机出力的影响是必要的,这较用全年的 Weibull 分布来统计风电机组出力更为合理。湍流的强度可用式(2)定义:

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \quad (2)$$

其中, σ_v 为 10 min 或 1 h 以上平均风速的标准差。考虑湍流的风速可粗略表示为服从均值为 $\bar{v}$ 、标准差为 σ_v 的正态分布^[2],其较用全年的服从 Weibull 分布的风速能更准确地模拟某季节一天内的风速变化:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} e^{-\frac{(v-\bar{v})^2}{2\sigma_v^2}} \quad (3)$$

风电机组的输出功率和风速的关系常用式(4)分段线性函数表示:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v-v_{in}-P_N}{v_N-v_{in}} P_N & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

其中, v_{in} 、 v_N 、 v_{out} 和 P_N 分别为切入风速、额定风速、切出风速和额定功率(即额定风速下的输出功率)。在已知一个小时内平均风速的概率密度和风机输出功率函数的情况下,即式(3)和(4)已知的情况下,可用式(5)和(6)求得该小时内风电机组的出力概率密度的平均值 $\mu_{P_{WT}}$ 与标准差 $\sigma_{P_{WT}}$

$$\mu_{P_{WT}} = E(P(v)) = \int_0^{+\infty} P(v) f(v) dv = \int_0^{v_{in}} 0 \times f(v) dv + \int_{v_{in}}^{v_N} \frac{v-v_{in}-P_N}{v_N-v_{in}} P_N f(v) dv + \int_{v_N}^{v_{out}} P_N f(v) dv + \int_{v_{out}}^{+\infty} 0 \times f(v) dv \quad (5)$$

$$\sigma_{P_{WT}} = \sqrt{E[(P(v) - \mu_{P_{WT}})^2]} = \sqrt{\int_0^{+\infty} (P(v) - \mu_{P_{WT}})^2 f(v) dv} \quad (6)$$

这里简单介绍原点矩与中心矩的概念。设 X 是随机变量,若 $E(X^j)$ ($j=1,2,\dots$) 存在,则称它为 X 的 j 阶原点矩;若 $[X - E(X)]^j$ ($j=1,2,\dots$) 的数学期望存在,则称 $E[(X - E(X))^j]$ 为 X 的 j 阶中心矩,一阶原点矩为变量 X 的均值,二阶中心矩为变量 X 的标准差的平方。用 MATLAB 可求得风电机组出力的 j 阶中心矩 $E[(P(v) - \mu_{P_{WT}})^j]$;三阶和四阶中心矩将在后面点估计算法中用到。

1.2 光伏发电出力概率密度

气象日值数据中的日照时数是一天内不同辐射强度下的累加值,在已知某日日照时数 S 的前提下,全天日照辐射总量 H 如式(7)所示,式(7)体现了日照时数对每天太阳辐射量的影响。

$$H = H_L \left(a + b \frac{S}{S_L} \right) \quad (7)$$

$$S_L = (2/15) W_s \quad (8)$$

$$H_L = \tau H_0 \quad (9)$$

其中, H_L 为进入地球大气层内的太阳辐射强度; a 和 b 为经验系数; S_L 为每天日长,单位为 h; W_s 为时角; H_0 为地球大气外层的辐射强度; τ 为空气透明系数, $\tau \in [0.4, 0.8]$ 。本文采用式(12)描述空气透明系数的概率密度函数^[15]。

$$W_s = \arccos(-\tan \Phi \tan \delta) \quad (10)$$

$$H_0 = (1/\pi) G_{sc} E_0 [\cos \Phi \cos \delta \sin W_s + (\pi/180) W_s \sin \Phi \sin \delta] \quad (11)$$

$$f(\tau) = c \frac{\tau_{max} - \tau}{\tau_{max}} e^{\lambda \tau} \quad (12)$$

其中, Φ 为纬度; δ 为太阳赤纬角, 一年中每天太阳赤纬角是一定的, 可以通过查万年历的方法得出; $G_{SC} = 1.367 \text{ kW/m}^2$ 为太阳常数; E_0 为地球轨道偏心率校正因子, 其可由式(13)计算得到; $\tau_{\max}$ 为空气透明系数最大值; c 和 λ 为与最大空气透明系数及空气透明系数均值相关的量, 可由式(14)和(15)求得。

$$E_0 = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (13)$$

$$c = \frac{\lambda^2 \tau_{\max}}{e^{\lambda \tau_{\max}} - 1 - \lambda \tau_{\max}} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{2\gamma - 17.519e^{-1.3118\gamma} - 1062e^{-5.0426\gamma}}{\tau_{\max}} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max} - \tau_{\text{mean}}} \quad (16)$$

其中, Γ 为日角, $\Gamma = 2\pi(l-1)/N$, l 为一年中的日序数, N 为一年的天数, 闰年时 $N = 366$, 平年时 $N = 365$; τ_{mean} 为空气透明系数平均值。

在已知每天的总辐射量 H 的前提下, 从日出到日落各个时段的辐射量占一天内总辐射量的比率可以用式(17)所描述的正态分布来模拟^[16]:

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} e^{-\frac{(t-12)^2}{2\sigma_R^2}} \quad (17)$$

$$\sigma_R = d_0 + d_1 S_L \quad (18)$$

其中, $t \in [1, 24]$; d_0 和 d_1 均为常系数。正午时日照辐射最强。每小时日照辐射量 $H(t) = R(t)H$, 可按式(19)折算成峰瓦时数。峰瓦时定义为当大气质量为 1.5 AM (Air Mass), 温度为 25 °C, 日照强度为 1000 W/m² 的时间。

$$D(t) = 0.0116 H(t) \quad (19)$$

其中, $D(t)$ 为峰瓦时数 (单位为 h); 0.0116 为折算系数 (单位为 h·cm²/cal)。

光伏电池组每小时的发电量可由式(20)计算:

$$W_{PV}(t) = P_{\text{peak}} \eta D(t) \times 10^{-3} \quad (20)$$

其中, P_{peak} 和 η 分别为光伏电池组的峰瓦功率(W)和效率; $W_{PV}(t)$ 的单位为 kW·h。光伏电板在 t 时刻的输出功率为 $P_{PV}(t) = P_{\text{peak}} \eta D(t)$ 。用 MATLAB 可以求得 $P_{PV}(t)$ 的各阶中心矩。

1.3 电动汽车充/放电功率的概率密度

本文以 PHEV 60 (EPRI)^[17] 为例进行电动汽车充/放电概率密度的研究, 该电池的容量为 18 kW·h, 本文电动汽车在充电站中进行集中充/放电, 假设充/放电功率恒定为 3.6 kW, 即充满完全放电的电池需要 5 h。设系统中一共有 n 台电动汽车, 考虑到电动汽车的出勤率, 每天 αn 台参与向系统放电的行为。本文采用文献[18]描述的智能充/放电模式建立每小时接入电网进行充/放电的电动汽车数目模型, 即每个时间段内期望接入电网进行充/放电的电动汽车

台数如式(21)所示的正态分布。

$$n_{EV}(t) = n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t} e^{-\frac{(t-\mu_{t0})^2}{2\sigma_t^2}} \quad (21)$$

其中, μ_{t0} 为电动汽车接入电力系统的期望时间; σ_t 为标准差, 指充/放电的时间范围。充电的期望时间为 $\mu_{t0}=1$, 指时段 1, 即 00:00—01:00, 放电时间为 $\mu_{t0}=13$, 指时段 13, 即 12:00—13:00, 令充/放电的时间分布范围均为 $\sigma_t=2$ 。每个实际时间段内接入电网的电动汽车台数可以用泊松分布模拟, 如式(22)所示:

$$p(n_{EV}) = \frac{e^{-\lambda_{EV}} \lambda_{EV}^{n_{EV}}}{n_{EV}!} \quad n_{EV}=0, 1, \dots \quad (22)$$

其中, λ_{EV} 为由式(21)求得的该时间段内接入电动汽车的期望值, n_{EV} 为可能接入电网的电动汽车台数。在得到每个小时接入电力系统的电动汽车台数的概率密度函数后, 就可以求得该小时电动汽车充/放电功率的均值、标准差和高阶中心矩。

2 考虑天气状况的三点估计法概率潮流模型

2.1 采用三点估计法计算概率潮流

概率潮流方程可用式(23)描述:

$$g(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) = 0 \quad (23)$$

其中, $g(\cdot)$ 表示节点注入功率净向量; $\mathbf{Z}$ 为待求向量 (输出向量), 即节点电压的模值和相角; $\mathbf{X}$ 为已知向量 (输入向量), 包括一些随机变量和一些确定量, $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m, X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_M)$, $X_1, X_2, \dots, X_m$ 为随机变量, $X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_M$ 为确定量。

点估计法就是在每个随机变量上取若干点进行确定性潮流计算来估计输出量的概率密度。在本文中, 随机变量包括负荷的有功和无功、光伏和风电机组的注入功率以及电动汽车充/放电功率。其余变量为常数, 如普通 PV 节点的注入有功功率与节点电压幅值。

三点估计法在每个变量的均值及其两侧取值。每个随机变量集合 X_k 在均值及其两侧的取值方法如式(24)所示:

$$x_{k,r} = \mu_{x_k} + \xi_{k,r} \sigma_{x_k} \quad k=1, 2, \dots, m; r=1, 2, 3 \quad (24)$$

其中, μ_{x_k} 和 σ_{x_k} 分别为 X_k 的均值与标准差, r 为取点个数, $\xi_{k,r}$ 为位置度量系数。 $r=3$ 时, $\xi_{k,3}=0$, 表示在均值取点, 即 $x_{k,3} = \mu_{x_k}$; $r=1, 2$ 时, $\xi_{k,r} = \lambda_{k,3}/2 + (-1)^{(3-r)} \times \sqrt{\lambda_{k,4} - 3\lambda_{k,3}^2/4}$, $x_{k,1}$ 和 $x_{k,2}$ 在均值右邻域和左邻域取点。其中 $\lambda_{k,3}$ 和 $\lambda_{k,4}$ 分别为 X_k 的偏度系数和峰度系数。

$$\lambda_{k,3} = \frac{E[(X_k - \mu_{x_k})^3]}{\sigma_{x_k}^3}, \quad \lambda_{k,4} = \frac{E[(X_k - \mu_{x_k})^4]}{\sigma_{x_k}^4} \quad (25)$$

其中, $E[(X_k - \mu_{x_k})^3]$ 和 $E[(X_k - \mu_{x_k})^4]$ 分别为随机变量集合 X_k 的三阶中心矩与四阶中心矩。可以采用 1.1 节介绍的方法求取各阶中心矩。

对于 m 个随机注入功率,每个变量 x_k 用式(24)确定的 3 个点分别代替,其他随机注入功率量在均值处取值,即 $(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \cdots, \mu_{x_{i-1}}, x_{k,r}, \mu_{x_{i+1}}, \cdots, \mu_{x_m}, \mu_{x_m})$ ($r=1,2,3$),进行 3 次确定性潮流计算,可以得到待求解的某变量 Z_k 的 3 个估计值 $Z(k,1)$ 、 $Z(k,2)$ 和 $Z(k,3)$ 。给定每个随机变量在 m 个随机变量中的权重为 $1/m$,即这些随机变量的重要性是相同的(如果随机变量的重要性不同,可以给定每个随机变量不同的权重)。对于某一随机变量集合 X_k ,所取点 $x_{k,r}$ 的权重为 $\omega_{k,r}$, $\omega_{k,r}$ 的计算方法如式(26)所示:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^3 \omega_{k,r} = 1$$
$$\omega_{k,r} = \frac{1}{m} \frac{(-1)^{3-r}}{\xi_{k,r}(\xi_{k,1} - \xi_{k,2})} \quad r=1,2 \quad (26)$$
$$\omega_{k,3} = \frac{1}{m} - \omega_{k,1} - \omega_{k,2}$$

求得每个估计点权重 $\omega_{k,r}$ 后即可利用式(27)求取 Z_k 的 j 阶原点矩:

$$E(Z_k^j) = \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^3 \omega_{k,r} [Z(k,r)]^j =$$
$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^3 \omega_{k,r} [h(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \cdots, \mu_{x_{i-1}}, x_{k,r}, \mu_{x_{i+1}}, \cdots, \mu_{x_m})]^j \quad (27)$$

其中, $Z(k,r)$ 为第 k 个待求变量的第 r 个估计值; $h()$ 表示在求解式(23)所表示的概率潮流收敛后,待求向量(输出向量)和已知向量(输入向量)之间的函数关系,即 $Z=h(X)$ 。 Z_k 的标准差为 $\sigma_{Z_k} = \sqrt{E(Z_k^2) - [E(Z_k)]^2}$ 。可用潮流输出量(即节点电压、支路潮流等)的统计矩来估计其概率密度函数 $f_{Z_k}^{[19-20]}$ 。

对于有 m 个注入功率随机变量的电力系统,三点估计法需进行 $2m+1$ 次确定性潮流计算^[21]。

2.2 考虑不同季节不同天气状况时每天各小时概率潮流

设某季节有 C 种可能的天气状况,这样该季节每天第 t 个小时的节点电压、支路潮流等潮流输出量 Z_k 的概率密度函数 $f_{Z_k}^t$ 可表示为:

$$f_{Z_k}^t = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C f_{Z_k}^{t,wc_i} \quad (28)$$

其中 $f_{Z_k}^{t,wc_i}$ 表示第 t 小时第 i 种天气状况下 Z_k 的概率密度函数,上标 wc_i 表示第 i 种天气状况。采用三点估计法求得每个季节每天 24 h 不同天气状况下 Z_k 的均值和标准差后,先用正态分布拟合各种天气状况下 Z_k 的概率密度,再重新估算计及各种天气状况下这些潮流输出量的概率密度。具体实现方法为:先针对每种天气状况生成一组规模相同的正态分布随机数,再把所有天气状况下生成的随机数用概率密度函数拟合。

3 算例与结果

以图 1 所示某 140 节点配电系统为例来说明所

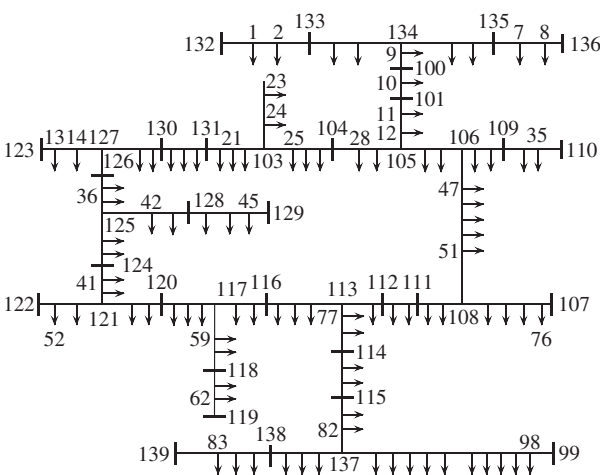


图 1 140 节点配电系统
Fig.1 140-bus distribution system

发展的概率潮流模型与求解方法。该配电系统的总负荷为 $26.33+j18.61 \text{ MV}\cdot\text{A}$;节点 107、123 和 136 为 3 个电源点,注入功率分别为 $6+j3.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、 $4+j2.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 和 $7+j4.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。馈线的电阻和电抗参数为: $r=0.27 \text{ }\Omega/\text{km}$, $x=0.327 \text{ }\Omega/\text{km}$ 。各线路长度如表 1 所示。

表 1 线路长度
Tab.1 Line lengths

首节点	末节点	长度/m	首节点	末节点	长度/m	首节点	末节点	长度/m
132	1	200	106	32	450	67	113	1200
1	2	600	32	33	800	113	68	200
2	133	300	33	109	350	68	112	500
133	3	800	109	34	250	112	69	400
3	4	700	34	35	150	69	70	1900
4	134	900	35	110	150	70	111	200
134	5	100	127	126	350	111	71	650
5	6	500	126	36	850	71	72	800
6	135	900	36	37	150	72	108	100
135	7	200	37	125	900	96	97	500
7	8	300	125	38	950	97	98	100
8	136	900	38	39	750	108	73	550
136	9	700	39	124	150	73	74	200
100	10	400	124	40	800	74	75	500
10	101	700	40	41	450	75	76	800
101	11	200	41	121	1350	76	107	850
11	12	800	125	42	650	117	59	300
12	105	100	42	43	500	59	60	300
123	13	900	43	128	450	60	118	1800
13	14	200	128	44	1150	118	61	900
14	127	400	44	45	250	61	62	200
127	115	800	94	95	600	62	119	1200
15	16	600	95	96	700	113	77	200
16	130	350	45	46	950	77	78	200
130	17	250	46	129	1350	78	114	300
17	18	500	106	47	550	114	79	400
18	19	500	47	48	250	79	80	200
19	131	200	48	49	1350	80	115	500
131	20	650	49	50	850	115	81	600
20	21	250	50	51	700	81	82	700
21	22	1200	51	108	900	82	137	800

续表								
首节点	末节点	长度/m	首节点	末节点	长度/m	首节点	末节点	长度/m
22	103	850	122	52	800	139	83	400
103	24	250	52	53	750	83	84	300
93	140	600	53	121	200	84	85	300
140	94	300	121	54	550	85	138	900
24	23	900	54	55	800	138	86	300
23	102	550	55	120	750	86	87	600
103	25	400	120	56	200	87	88	1200
25	26	200	56	57	200	88	137	300
26	27	900	57	58	200	137	89	600
27	104	650	58	117	500	89	90	700
104	28	700	117	63	600	90	91	400
28	29	900	63	64	850	91	92	800
29	105	1500	64	116	100	92	93	300
105	30	800	116	65	700	98	99	600
30	31	100	65	66	300			
31	106	200	66	67	950			

以河北省张北市(北纬 41.09°)1995 年至 2004 年这 10 年间的气象数据为例来仿真多种可能的天气状况。以 2011 年为例,选取了能表征春夏秋冬 4 个季节特性的 4 天:1 月 10 日,4 月 11 日,8 月 1 日,11 月 21 日。所选的这 4 天的气象信息如表 2 所示,一年中某天的日序数、太阳赤纬角、日出日落时间是确定的,可以查阅历史数据或由第 1 节的相关公式计算得到。以 1 月 10 日为例,天气状况用 1995 年至 2004 年每年 1 月中每天的平均风速与日照时数来模拟 1 月 10 日的不同天气状况。

表 2 2011 年张北气象数据
Tab.2 Meteorological data of Zhangbei in 2011

日期	日序数	太阳赤纬角/rad	日出时间	日落时间	日长/h
1 月 10 日	10	-0.3853	07:46	17:11	10.183
4 月 11 日	100	0.1319	05:50	18:56	12.597
8 月 1 日	213	0.3206	05:16	19:39	13.471
11 月 21 日	324	-0.3373	07:15	16:58	10.414

3.1 风力发电机参数

风力发电机组安装在节点 122,装机容量 15 MW,切入风速 v_{in} 、额定风速 v_N 和切出风速 v_{out} 分别为 3 m/s、12 m/s 和 25 m/s。

3.2 光伏发电参数

光伏发电安装在节点 99,峰瓦值为 15 MW;根据第 1 节的计算公式和表 2 的气象参数可计算出光伏发电系统每小时的发电功率的统计数字特征。

3.3 电动汽车充/放电功率参数

给定:该系统所覆盖区域中共有 3500 台 PHEV 60;电动汽车充电地点为节点 138(住宅区),放电地点为节点 110(办公区);每天放电的电动汽车数量为其总量的 75%;每辆电动汽车的充/放电功率为 3.6 kW;电动汽车电池充/放电时的能量转换效率为 0.75;充/放电功率因数为 0.99。

3.4 负荷的概率密度参数

这里用正态分布来描述负荷^[22]。为更好地模拟 4 个季节中每天 24 h 的负荷概率密度,取各负荷节点每小时负荷均值与该节点最大负荷比值 $\mu_{P_{d,(t)}}/\mu_{P_{d,max}}$ 都按图 2 负荷曲线变化。本文中时段 1 表示 00:00—01:00,其他时段依此类推。表 3 给定的系统初始负荷设为 $0.8\mu_{P_{d,max}}$,根据图 2 负荷曲线与原始负荷数据

表 3 初始负荷
Tab.3 Original loads

节点	有功/MW	无功/Mvar	节点	有功/MW	无功/Mvar
1	0.210	0.140	50	0.032	0.030
2	0.360	0.240	51	0.036	0.024
3	0.430	0.310	52	0.055	0.036
4	0.520	0.340	53	0.370	0.230
5	0.280	0.210	54	0.670	0.390
6	0.650	0.420	55	0.003	0.002
7	0.260	0.190	56	0.290	0.170
8	0.610	0.490	57	0.040	0.020
9	0.260	0.210	58	0.042	0.027
10	0.540	0.350	59	0.120	0.080
11	0.360	0.230	60	0.400	0.300
12	0.540	0.410	61	0.620	0.610
13	0.520	0.340	62	0.790	0.600
14	0.420	0.330	63	0.053	0.036
15	0.310	0.200	64	0.027	0.024
16	0.051	0.037	65	0.080	0.060
17	0.600	0.400	66	0.330	0.220
18	0.062	0.039	67	0.031	0.020
19	0.070	0.040	68	0.011	0.008
20	0.037	0.028	69	0.021	0.013
21	0.490	0.320	70	0.028	0.018
22	0.540	0.390	71	0.044	0.036
23	0.020	0.010	72	0.027	0.019
24	0.060	0.040	73	0.070	0.050
25	0.620	0.410	74	0.190	0.140
26	0.490	0.400	75	0.060	0.040
27	0.040	0.020	76	0.110	0.070
28	0.500	0.320	77	0.460	0.330
29	0.040	0.020	78	0.020	0.010
30	0.440	0.280	79	0.190	0.150
31	0.460	0.370	80	0.019	0.012
32	0.260	0.210	81	0.190	0.150
33	0.760	0.440	82	0.010	0
34	0.280	0.190	83	0.210	0.140
35	0.230	0.150	84	0.250	0.160
36	0.020	0.010	85	0.190	0.120
37	0.740	0.380	86	0.630	0.420
38	0.280	0.180	87	0.360	0.230
39	0.190	0.140	88	0.670	0.500
40	0.300	0.240	89	0.470	0.290
41	0.020	0.010	90	0.450	0.280
42	0.350	0.260	91	0.039	0.024
43	0.030	0.020	92	0.290	0.180
44	0.300	0.190	93	0.021	0.016
45	0.270	0.190	94	0.180	0.140
46	0.470	0.290	95	0.280	0.190
47	0.180	0.140	96	0.030	0.010
48	0.300	0.240	97	0.620	0.390
49	0.004	0.002	98	0.430	0.330

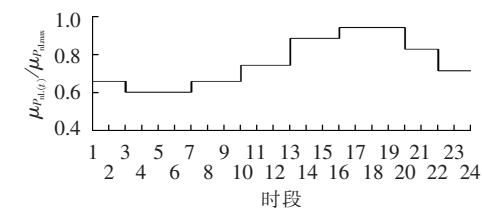


图 2 各节点日负荷曲线
Fig.2 Daily load curve of each bus

可以计算所有负荷节点每小时的负荷均值。4 月 11 日和 11 月 21 日负荷均值与最大负荷值的比值与图 2 的变化模式一致,而 1 月 10 日和 8 月 1 日每小时的负荷与最大负荷的比值在图 2 基础上乘以 1.1 的系数。每小时的负荷功率服从 $N(\mu_{P_{l(t)}}, \sigma^2_{P_{l(t)}})$ 所表示的正态分布, $\sigma_{P_{l(t)}}=0.1\mu_{P_{l(t)}}$ 。对于无功功率也进行类似处理。

3.5 140 节点配电系统仿真结果

以 1 月 10 日为例,分别对 140 节点配电系统有、无电动汽车 2 种情况进行概率潮流计算;表 4 列出了有、无电动汽车充/放电情况下各个时间段所有节点平均电压平均值的标幺值。考虑电动汽车充/放电后,在 22:00 至次日 03:00 总体电压水平较低,而 03:00—21:00 之间电压水平相对较高。

表 4 1 月 10 日各时间段所有节点平均电压的平均值
Tab.4 Average of all bus voltage averages for different daily periods on Jan.10

时段	节点平均电压平均值		时段	节点平均电压平均值	
	无 EV	有 EV		无 EV	有 EV
1	0.9491	0.9203	13	0.9510	0.9516
2	0.9546	0.9508	14	0.9534	0.9543
3	0.9566	0.9559	15	0.9555	0.9567
4	0.9574	0.9590	16	0.9566	0.9585
5	0.9576	0.9598	17	0.9570	0.9590
6	0.9577	0.9600	18	0.9564	0.9582
7	0.9577	0.9601	19	0.9553	0.9567
8	0.9567	0.9592	20	0.9535	0.9540
9	0.9553	0.9578	21	0.9539	0.9544
10	0.9531	0.9552	22	0.9543	0.9541
11	0.9508	0.9521	23	0.9557	0.9540
12	0.9498	0.9508	24	0.9565	0.9548

选取节点 62、88 和 129 来分析一天 24 h 的节点电压幅值的平均值。图 3 为 1 月 10 日 3 个节点每小时的电压平均值标幺值,节点 62 和 88 在 00:00—01:00 电压较低,节点 88 的平均电压为 0.9156 p.u.,而节点 129 的电压水平较高。在 12:00—13:00 之间,节点 62 和 88 的平均电压约为 0.95 p.u.,而节点 129 的平均电压约为 0.99 p.u.。

图 4 和图 5 分别为用三点估计法和蒙特卡洛仿真方法得到的 1 月 10 日 11:00—12:00 线路 127-15 的有功功率概率密度和节点 61 的电压幅值概率密度,图 5 中节点 61 电压为标幺值。为比较三点估计

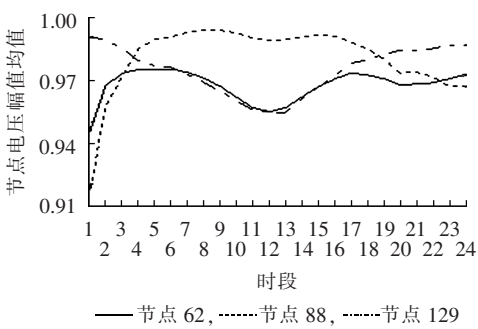


图 3 1 月 10 日 24 h 的 3 个节点电压均值
Fig.3 Average of three bus voltages for 24 hours on Jan.10

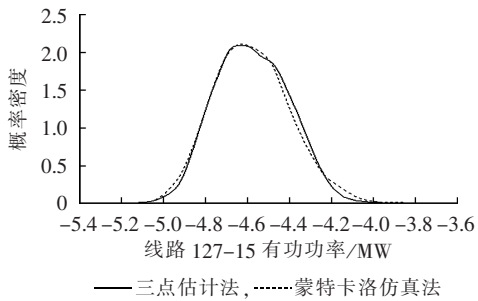


图 4 1 月 10 日时段 12 线路 127-15 的有功功率概率密度函数
Fig.4 Active power probabilistic density function of line 127-15 in period 12 on Jan.10

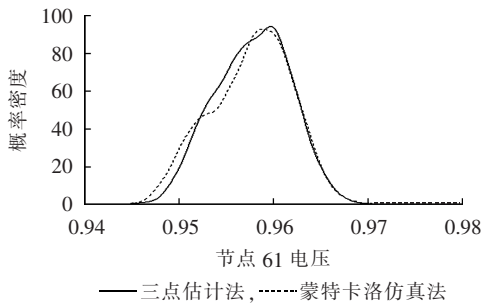


图 5 1 月 10 日时段 12 节点 61 电压幅值概率密度函数
Fig.5 Voltage amplitude probabilistic density function of bus 61 in period 12 on Jan.10

法概率潮流的准确性,表 5 列出了用三点估计法和蒙特卡洛仿真方法得到的几个节点在 1 月 10 日不同时段的电压均值与标准差标幺值,表 6 为用三点估计法和蒙特卡洛仿真法得到的几条支路的有功功率的均值与标准差。由表 5 和表 6 可知,采用三点估计法求得的潮流量的均值和标准差与采用蒙特卡洛仿真法求得的相应量的偏差在 5% 以内。

4 月 11 日、8 月 1 日和 11 月 21 日这 3 天系统节点电压在各小时的均值标幺值分别如图 6—8 所示。可见,在春秋 2 季负荷相对较小,风电和光伏发电出力相对较高,节点 62、88 和 129 的电压水平较好;而夏冬 2 季电压水平相对较低,尤其是夏季 8 月,该地区的平均风速为全年最小的月份,所选 3 个节点的

表 5 部分节点在 1 月 10 日不同时段的电压均值与标准差
Tab.5 Mean and standard deviation of part bus voltages for different daily periods on Jan.10

节点	参数	时段 1		时段 7		时段 10		时段 13		时段 17		时段 22	
		3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC
10	μ	1.0045	1.0046	1.0121	1.0121	1.0113	1.0112	1.0095	1.0095	1.0110	1.0110	1.0116	1.0116
	σ	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
36	μ	1.0088	1.0080	1.0098	1.0097	1.0011	1.0011	0.9875	0.9870	1.0073	1.0071	1.0086	1.0087
	σ	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0018	0.0018	0.0017	0.0017	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013
60	μ	0.9609	0.9607	0.9927	0.9899	0.9792	0.9790	0.9736	0.9729	0.9932	0.9923	0.9939	0.9917
	σ	0.0008	0.0008	0.0006	0.0006	0.0013	0.0013	0.0016	0.0016	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
82	μ	0.9230	0.9299	0.9969	0.9879	0.9939	0.9919	0.9899	0.9845	0.9927	0.9899	0.9894	0.9853
	σ	0.0011	0.0011	0.0002	0.0002	0.0006	0.0006	0.0009	0.0009	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
100	μ	0.9451	0.9444	0.9823	0.9811	0.9690	0.9589	0.9629	0.9620	0.9815	0.9797	0.9826	0.9810
	σ	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0013	0.0013	0.0016	0.0016	0.0009	0.0009	0.0006	0.0006

表 6 部分支路在 1 月 10 日不同时段的有功功率均值与标准差
Tab.6 Mean and standard deviation of part line active powers for different daily periods on Jan.10

支路	参数/MW	时段 1		时段 7		时段 10		时段 13		时段 17		时段 22	
		3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC	3PEM	MC
33-109	μ	0.4449	0.4445	0.0422	0.0424	-0.3347	-0.3345	-2.1310	-2.1300	-0.0221	-0.0219	0.1880	0.1897
	σ	0.0004	0.0004	0.0041	0.0040	0.0107	0.0103	0.0253	0.0255	0.0101	0.0100	0.0001	0.0001
120-56	μ	6.6511	6.6518	-3.7934	-3.8022	-6.1870	-6.1834	-6.5085	-6.5111	-2.2582	-2.2601	-1.9485	-1.9398
	σ	0.0910	0.0919	0.0223	0.0222	0.1165	0.1153	0.1399	0.1400	0.0120	0.0120	0.0175	0.0179
68-112	μ	-4.8978	-4.8883	-5.3031	-5.3000	-5.3496	-5.3508	-5.3277	-5.3276	-5.2007	-5.2113	-5.2265	-5.2301
	σ	0.0009	0.0009	0.0006	0.0006	0.0017	0.0017	0.0019	0.0019	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
60-118	μ	0.9859	0.9798	0.2127	0.2177	0.1693	0.1721	0.2224	0.2200	0.4039	0.4101	0.3627	0.3653
	σ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
115-81	μ	8.1347	8.1198	0.5050	0.5112	-2.4659	-2.4502	-3.1524	-3.1546	1.6763	1.6769	2.1493	2.1487
	σ	0.0645	0.0628	0.0266	0.0271	0.1668	0.1664	0.2095	0.2076	0.0012	0.0012	0.0192	0.0196

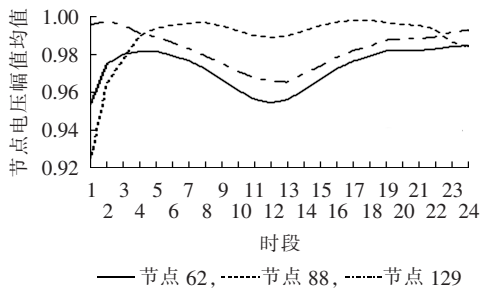


图 6 4 月 11 日 24 h 一些节点电压均值
Fig.6 Average of a few bus voltages for 24 hours on Apr.11

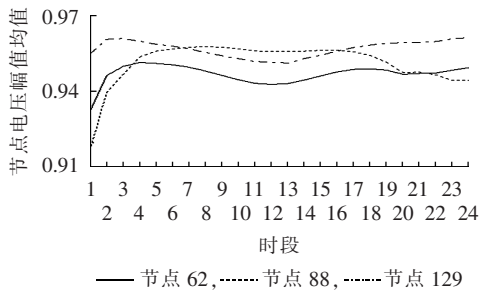


图 7 8 月 1 日 24 h 一些节点电压均值
Fig.7 Average of a few bus voltages for 24 hours on Aug.1

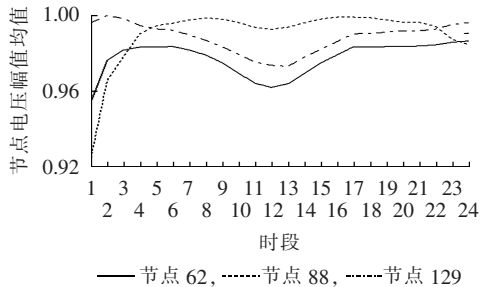


图 8 11 月 21 日 24 h 一些节点电压均值
Fig.8 Average of a few bus voltages for 24 hours on Nov.21

整体电压水平偏低。

4 结语

在可再生能源发电和电动汽车快速发展的背景

下,本文发展了含有风光混合发电和电动汽车充电站的电力系统概率潮流计算模型。考虑了风力发电和光伏发电输出功率以及电动汽车充/放电功率的随机特性;导出了风力发电和光伏发电出力的概率密度函数,在此过程中采用气象数据比较真实地模拟了风速与光照强度;导出了电动汽车充/放电的概率密度函数。之后,采用三点估计法求解概率潮流。最后,以 140 节点配电系统为例对所发展的概率潮流模型和采用的求解方法进行了验证,仿真结果表明所提出的方法得到的结果与采用大量蒙特卡洛仿真所得到的结果相仿,但计算速度比后者快很多。

参考文献:

[1] BORKOWSKA B. Probabilistic load flow[J]. IEEE Trans on Power

- Apparatus and Systems,1974,93(3):752-759.
- [2] DIKINSON W C,CHEREMISINOFF P N. Solar energy technology handbook[M]. London,UK:Butterworth,1980:863-903.
- [3] BURTON T,SHARPE D,JENKINS N,et al. Wind energy handbook [M]. Chichester,UK:John Wiley & Sons Ltd.,2001:12-39.
- [4] BILLINTON R,GAO Y,RAJESH K. Composite system adequacy assessment incorporating large-scale wind energy conversion systems considering wind speed correlation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2009,24(3):1375-1382.
- [5] RAJESH K,BILLINTON R. Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2001,16(4):368-373.
- [6] BERNAL-AUSTIN J L,DUFO-LOPEZA R. Multi-objective design and control of hybrid systems minimizing costs and unmet load [J]. Electric Power Systems Research,2009,79(1):170-180.
- [7] YANG H X,WEI Z,LOU C Z. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system [J]. Applied Energy,2009,86(2):163-169.
- [8] KEMPTON W,LETENDRE S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment,1997,2(3):157-175.
- [9] KEMPTON W,TOMIC J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources,2005,144(1):280-294.
- [10] VLACHOGIANNIS J G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles [J]. IEEE Trans on Power Systems,2009,24(4):1808-1817.
- [11] VILLANUEVA D,PAZOS J L,FEIJOO A. Probabilistic load flow including wind power generation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,2(1):12-20.
- [12] CONTI S,RAITI S. Probabilistic load flow using Monte Carlo techniques for distribution networks with photovoltaic generators [J]. Solar Energy,2007,81(12):1473-1481.
- [13] SU C L. Probabilistic load-flow computation using point estimate method[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(4):1843-1851.
- [14] MORALES J M,RUIZ J P. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(4):1594-1601.
- [15] HOLLANDS K G T,HUGET R G. Probability density function for the clearness index with applications[J]. Solar Energy,1982,30(3):195-209.
- [16] JAIN P C. Comparison of techniques for the estimation of daily global irradiation and a new technique for the estimation of hourly global irradiation[J]. Solar and Wind Technology,1984,1(2):123-134.
- [17] AXSEN J,BURKE A,KURANI K. Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs):goals and the state of technology Circa 2008[R]. [S.l.]:University of California,2008.
- [18] QIAN K,ZHOU C,ALLAN M,et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(2):802-810.
- [19] STUART A,ORD K. Kendall's advanced theory of statistics:volume 1 distribution theory[M]. New York,USA:John Wiley & Sons,1994:145-277.
- [20] HAHN G J,SHAPIRO S S. Statistical models in engineering[M]. [S.l.]:Wiley Classics Library,1994:228-280.
- [21] 潘炜,刘文颖,杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):28-33.
PAN Wei,LIU Wenying,YANG Yihan. Point estimate method for probabilistically optimal power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):28-33.
- [22] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 清华大学出版社,2002:19-22.

作者简介:

吴晨曦(1978-),女,河北唐山人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与计算、新能源发电、随机方法在电力系统中的应用(E-mail:wuchenxi@hdu.edu.cn);

文福拴(1965-),男,河南林州人,特聘教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场(E-mail:fushuan.wen@gmail.com);

陈勇(1978-),男,浙江余杭人,主要从事中低压配电网规划、设计、日常运行管理、工程管理(E-mail:cy940515@163.com)。

Probabilistic load flow of power system with WFs,PVs and PEVs

WU Chenxi^{1,2},WEN Fushuan¹,CHEN Yong³,XIN Jianbo⁴

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

3. Yuhang Power Supply Bureau of Hangzhou, Hangzhou 311100, China;

4. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: A probabilistic load flow model is developed for the power system containing WFs(Wind Farms), PVs(PhotoVoltaic Generations) and PEVs(Plug-in Electric Vehicles). The wind speeds and solar radiations are simulated based on the historical meteorological data for different season and weather conditions and the uncertainties of WF,PV,PEV and load are considered,based on which,3PEM(3-Point Estimation Method) is adopted to calculate the probabilistic load flow of power system for different daily periods and different seasons. Its statistical characteristics are thus obtained. The simulative results of a 140-bus distribution system show the correctness of the proposed model and method.

Key words: wind power; photovoltaic generation; plug-in electric vehicle; probabilistic load flow; point estimation method; electric power systems; electric vehicles