

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211422

基于数字孪生的光伏高比例配电网过载风险预警方法

杜晓东¹, 赵建利¹, 刘科研², 詹惠瑜²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 中国电力科学研究院有限公司配电技术中心, 北京 100192)

摘要: 在构建以新能源为主体的新型电力系统背景下, 分布式光伏将呈现极高比例并网趋势。高比例光伏出力的随机性会加剧配电网潮流的不确定变化, 给配电设备带来严重的过载风险, 载荷安全问题突出。基于此, 提出一种基于数字孪生的含高比例光伏配电网载荷安全分析和预警方法。论述了孪生配电网过载风险安全预警的实现机理和功能方案。根据相关标准分析设备过载耐受能力, 并建立不确定场景下载荷安全预警等级。基于历史运行数据建立配电网源荷随机行为的马尔科夫模型, 采用吉布斯算法对该模型进行蒙特卡洛随机抽样。根据配电网当前运行状态, 结合孪生配电网超实时计算能力, 对配电网未来随机场景快速仿真并计算过载风险指标, 评判载荷安全性。算例分析验证了所提分析方法的有效性及其合理性。算例结果表明, 该方法能够得出高比例光伏配电网在分析时段的载荷安全态势, 为电力系统调度人员提供了一定的参考依据。

关键词: 配电网; 分布式光伏; 载荷安全; 数字孪生; 马尔科夫链; 吉布斯抽样

Digital twin early warning method study for overload risk of distribution network with a high proportion of photovoltaic access

DU Xiaodong¹, ZHAO Jianli¹, LIU Keyan², ZHAN Huiyu²

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Power Distribution Technology Center, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: With reference to building a new power system with new energy as the main body, distributed photovoltaic (PV) will show a trend of extremely high levels of access. The randomness of PV output given its high proportion will aggravate the uncertain change of power flow in the distribution network. It brings serious overload risks to the distribution equipment, and the problem of load safety is prominent. Based on this, a digital twin based load security analysis and warning method of the distribution network with a high proportion of PV is proposed. The realization mechanism and function scheme of overload risk warning in twin distribution network are presented. The overload tolerance of equipment is analyzed according to relevant standards, and the load safety early warning levels in uncertain scenarios are established. Based on the historical operational data, Markov models of the random behavior of sources and loads in the distribution network are established. The Gibbs sampling algorithm is employed for random Monte Carlo sampling to the Markov models. Based on the current states, by means of the ultra-real-time computing capacity of the digital twins to quickly simulate the afterward random scenes of the distribution network, an overload risk index is calculated and evaluated. Numerical cases verify the effectiveness and rationality of the method. The case study demonstrates that the proposed method can analyze the load security situation of a distribution network with a high proportion of photovoltaic access in the analysis period, providing a certain reference for power system dispatchers.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Hebei Province (No. 21312102D).

Key words: distribution network; distributed photovoltaic; load safety; digital twins; Markov chain; Gibbs sampling

0 引言

“双碳”目标驱动下我国正由以化石能源为主

基金项目: 河北省重点研发计划项目资助(21312102D); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2020-084)

体的传统电力系统向以新能源为主体的新型电力系统过渡。分布式光伏是构建新型配电系统的主流新能源, 新型电力系统的构建必将促使分布式光伏极高比例接入配电网^[1-2]。高比例光伏能否不引起设备过载是配电系统接纳高比例新能源的重要因素^[3-4]。分布式光伏(Distributed Photovoltaic, DPV)、负荷功

率的强随机性使配电网有功潮流波动明显^[5-7], 天气、季节的变化进一步加剧了潮流波动。因而, DPV 极高比例接入下配电网负荷状况受电网形态、负荷水平和天气情况等多方面影响, 具有显著的多样性和难预测性。

关于光伏接入配电网的负荷问题, 文献[8]研究了高比例光伏配电网的不同类型用户负荷需求响应, 分析了馈线峰值负荷变化状况。文献[9]基于 DPV 出力的 Beta 分布概率模型, 建立了配电网负荷安全的概率评估体系。文献[10]考虑负荷指标的时变和分布特性, 建立了长时间尺度负荷安全综合评估模型。对于 DPV 参与配电网调控的研究, 文献[11-12]研究了 DPV 参与过载调控的多时间尺度协同控制。文献[13-14]提出分布式电源参与负荷调控的最优配置方法。文献[15-16]从全网范围提出了配电网及分区负荷调控方法。含高比例光伏配电网运行复杂, 尤其考虑 DPV 主动支撑作用时更加复杂, 很难用确定性方法分析。现有文献主要研究 DPV 高比例配电网在特定历史场景的负荷状况, 没有关注配电网实时运行过程中配电状态的演化趋势并做出预警性判断。

近年来, 数字孪生技术受到广泛重视和应用。数字孪生(Digital Twins, DT)是对物理实体进行全场景在线交互的数字仿真技术^[17], 通过数据的实时交互驱动, 在数字空间实现数字虚体与物理实体的镜像^[18-19]。电力系统高可靠性需求和高建设成本等技术特点及日益复杂的运行状况使其难以通过纯物理手段获得全面实时的认知, 开展电力系统的数字孪生, 运用孪生电网进行辅助分析和决策是必要手段。文献[20]提出能源互联网 DT 系统的总体框架、技术路线及典型应用的关键技术, 从 DT 技术在电力系统的具体应用开展研究。文献[21]提出了数字孪生在线分析系统, 用于电网数字化调度。

随着新型配电系统的形成, 配电侧运行不确定性和复杂性日益加大, 开展配电网数字孪生技术应用十分必要。本文提出高比例光伏配电网实现数字孪生的负荷安全性分析和预警方法。首先提出孪生配电网过载安全预警的实现机理和技术方案; 在此基础上应用历史数据建立配电网源荷随机行为的马尔科夫模型, 并提出不确定场景下过载风险评判指标。依据配电网当前状态采用吉布斯(Gibbs sampling)算法对源荷马尔科夫模型进行蒙特卡洛随机抽样, 利用孪生配电网超实时计算能力快速仿真配电网未来随机场景并计算过载风险指标, 评判配电网过载安全性。

1 数字孪生配电网过载安全预警实现机理

1.1 数字孪生配电网

DT 概念于 2003 年提出, 早期应用于航空航天领域, 利用 DT 技术在数字空间建立作业飞行器的虚拟模型, 对飞行器的性能和运行状态进行评估。数字孪生配电网是配电网模型日渐复杂及 DT 技术发展的新兴产物。相比于侧重实体操控的信息物理系统或模型驱动的仿真软件, 数字孪生电网更侧重于数据驱动的实时态势感知和超实时虚拟推演, 通过动态监控和全息模拟, 精准感知物理电网的真实状态, 为电网调控决策提供辅助支持。

数字孪生配电网是数字孪生技术在配电领域的应用, 从物理配电网量测感知各类电气量、状态量, 以配网机理模型为基础, 依托大数据分析平台, 以数据云计算服务形式为配电网运行提供数字载体。配电网数字孪生的基本实现方式如图 1 所示。

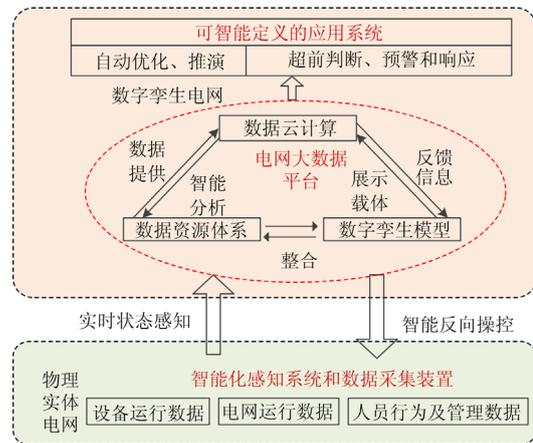


图 1 数字孪生配电网实现方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of digital twin distribution network implementation

1.2 孪生配电网过载安全预警的实现

基于数字孪生技术构建配电网过载安全预警的实现思路如图 2 所示, 主要包括以下环节。

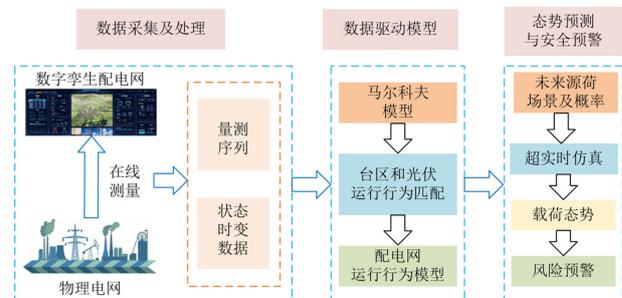


图 2 数字孪生配电网过载安全预警的实现方案

Fig. 2 Realization scheme of voltage safety warning for digital twin distribution network

(1) 配电网源荷运行数据采集与状态获取。建立孪生配电网数据中台，孪生配电网从数据中台获取物理电网数据。数据中台实时采集各台区负荷数据和配电网光伏电站出力数据，形成对物理配电网数据采集的量测序列。孪生配电网对量测值进行量化，以状态量形式表征台区和光伏电站的时变运行数据，为构建运行状态的数据驱动马尔科夫模型提供基础数据。

(2) 建立配电网各台区和光伏运行行为的马尔科夫链模型。运用配电网大量运行监测数据，建立马尔科夫状态转移矩阵，用来反映配电网各台区和光伏的运行行为，得到配电网运行行为模型。

(3) 配电网未来运行态势的预测。基于配电网源荷当前运行状态及其行为的马尔科夫模型，预测未来时段的源荷场景并根据状态转移矩阵确定场景发生概率。将以上概率场景代入孪生配电网进行超实时仿真，并考虑高比例光伏对配电网的负载支撑作用，获得配电网未来时段可能出现的载荷态势，并根据马尔科夫链模型的场景转移概率确定各载荷态势的发生概率。

(4) 过载安全预警机制的生成。根据预测的载荷态势计算过载风险，依据过载风险对载荷态势进行安全预警。

2 孪生配电网源荷行为的马尔科夫链建模

2.1 配电网状态量的马尔科夫链表征原理

台区用电行为和光伏出力的变化具有时序特性。马尔科夫链是一组具有马尔可夫性质的离散随机变量的集合。本文用马尔科夫链表征配电网光伏和台区的功率状态变化，将连续变化的功率量化为离散状态量，利用台区负荷和光伏的历史运行数据为驱动，建立运行状态的关联关系，反映状态的概率性转移关系。

假设配电网某状态量在 t 时刻处于状态 i_s ，到下一时刻状态转移到 j_s ，则转移的条件概率记为 $p_{i_s, j_s}^1(t) = p_{i_s, j_s}(t)$ ，称为马尔科夫转移概率。将台区用电时间和光伏出力时间分别划分为 t_{ti} 和 t_{pvti} 个时间段，统计各时间段状态转移情况，建立系统状态转移概率矩阵为

$$P(t) = P_c(t) = \begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & \cdots & p_{1N_s}(t) \\ p_{21}(t) & p_{22}(t) & \cdots & p_{2N_s}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{N_s1}(t) & p_{N_s2}(t) & \cdots & p_{N_sN_s}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： N_s 为系统状态总数，台区用电行为状态为

$N_s = K$ ，影响光伏的云层状态为 $N_s = L_{lr}$ 。

若已知当前状态或某时刻状态的概率分布，且已知转移矩阵 $P(t)$ ，则下一时刻系统所处状态概率分布如式(2)所示。

$$P_s(t+1) = P_s(t)P(t) = \{p_{s,1}(t+1), \cdots, p_{s,N_s}(t+1)\} \quad (2)$$

式中： $P_s(t) = \{p_{s,1}(t), p_{s,2}(t), \cdots, p_{s,N_s}(t)\}$ ，其中 $p_{s,i_s}(t)$ 为 t 时刻系统处于状态 i_s 的概率， $i_s = 1, 2, \cdots, N_s$ 。对于当前或过去已发生的状态， $p_{s,i_s}(t) = 1$ 或 0 ，表示初始状态已是确定性事件。

令状态 $i_s = f_s(p_{s,i_s})$ ， $f_s(x)$ 为状态映射函数，则可以通过状态概率根据式(3)获得下一时刻的随机状态。

$$i_s(t+1) = f_s(p_{s,i_s}(t+1)) \quad (3)$$

$$0 \leq i_s \leq N_s$$

2.2 台区及光伏电站运行状态的量化

马尔科夫链是描述离散状态随机过程的模型，而台区负荷和光伏的功率是连续状态，需对连续状态量进行量化，转化为状态量。为保证状态量划分的有效性，本文通过对历史数据进行统计，按数据出现频次相等的原则划分状态。在本文中光伏出力以功率的负数形式表征，台区负荷用电以功率的正数形式表征。对于台区内的分布式光伏计算，则将台区内光伏出力和负荷用电功率“正负”叠加，得到最终的台区整体用电情况。采集数据时只需统计台区出口数据即可，此数据为台区内负荷和分布式光伏出力叠加后的结果。对于台区来说，将配电网各台区用电历史统计数据进行大小排序，如图3所示。设台区用电划分为 M 种状态，按统计数据数量相等原则将用电数据划分为 M 个区间。每个区间即为一个用电状态，该状态的区间即为区间内用电数据下限值和上限值。上述划分方法可以兼顾各种

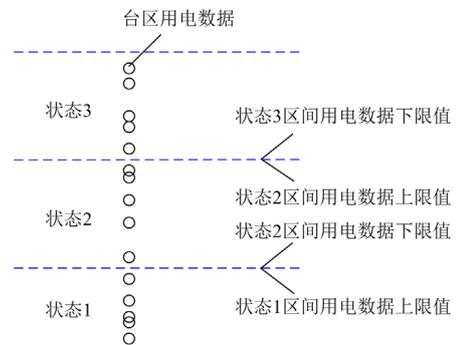


图3 状态划分方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of state division method

台区用电状态, 避免状态划分的随意性。各状态区间用电数据的概率密度服从正态分布, 通过统计每个状态区间数据可获得该状态对应的正态分布参数, 从而可得到该状态的用电情况。

对于光伏电站出力的状态划分, 光伏电站出力取决于太阳辐射值, 而太阳辐射值受云层覆盖率影响, 云层覆盖率的随机变化造成光伏出力变化。因此, 本文用云层覆盖率对光伏出力状态进行统一划分, 可保证光伏状态转移的一致性, 避免对各个光伏逐一描述。引入云层覆盖水平(Cloud Coverage Level, CCL)指标表示云层状态变化, 如式(4)所示。

$$f_{\text{CCL}}(t) = 1 - \frac{S_{\text{ir},t}}{S_{\text{irref},t}} \quad (4)$$

式中: $f_{\text{CCL}}(t)$ 为一天中 t 时刻云层覆盖水平; $S_{\text{ir},t}$ 为 t 时刻辐照度; $S_{\text{irref},t}$ 为 t 时刻晴天基准辐照度, 可根据不同季节进行修正。

根据不同云层状态, 结合辐照度服从的 Beta 分布特性建立其概率密度函数如式(5)所示。

$$f_{\text{pv}}(S_{\text{ir},t}) = \frac{\Gamma(\alpha_{\text{tr}} + \beta_{\text{tr}})}{\Gamma(\alpha_{\text{tr}})\Gamma(\beta_{\text{tr}})} (x_s)^{\alpha_{\text{tr}}-1} (1-x_s)^{\beta_{\text{tr}}-1} \quad (5)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; $x_s = S_{\text{ir},t} / S_{\text{irref},t}$; α_{tr} 和 β_{tr} 参数可以利用光照历史数据与晴天基准辐照度比值的平均值 μ_{tr} 和标准差 σ_{tr} 进行计算, 其中 $\alpha_{\text{tr}} = \mu_{\text{tr}}[\mu_{\text{tr}}(1-\mu_{\text{tr}})/\sigma_{\text{tr}}^2 - 1]$, $\beta_{\text{tr}} = \alpha_{\text{tr}}(1-\mu_{\text{tr}})/\mu_{\text{tr}}$ 。

根据式(4)对不同云层划分并统计该云层状态下辐照度数据, 联合式(5)计算各云层状态下参数, 根据光伏电站安装容量以及所受辐照度得到不同时刻光伏出力, 如式(6)所示。

$$P_{\text{pv,sim}}(t) = \text{Beta}(\alpha_{L_{\text{tr}}}, \beta_{L_{\text{tr}}}) \cdot \frac{S_{\text{irref},t} P_{\text{pv,N}}}{S_{\text{irref}}} \quad (6)$$

式中: $\text{Beta}(\cdot)$ 为 Beta 分布函数; $\alpha_{L_{\text{tr}}}$ 和 $\beta_{L_{\text{tr}}}$ 均为 L_{tr} 云层状态下 Beta 分布参数; $P_{\text{pv,N}}$ 为光伏额定功率; S_{irref} 为标准辐照度, 本文取 1000 W/m^2 。

2.3 基于运行数据的状态转移矩阵生成

中压配电网各台区负荷用电行为具有显著差异性。基于历史数据用式(7)统计台区负荷 t 时刻用电状态的转移概率。

$$p_{i_s, j_s}(t) = \frac{q_{i_s, j_s}(t)}{\sum_{j_s=1}^K q_{i_s, j_s}(t)} \quad (7)$$

式中, $q_{i_s, j_s}(t)$ 为台区负荷在 t 时刻由状态 i_s 转移到状态 j_s 的样本。

对历史光照数据应用式(5)、式(6)进行处理, 按

照云层状态以时间 t_{cd} 为间隔, 按式(8)计算任意时刻 t 云层状态的转移概率 $P_c(t)$ 。

$$p_{c, i_s, j_s}(t) = \frac{q_{c, i_s, j_s}(t)}{\sum_{j_s=1}^{L_{\text{tr}}} q_{c, i_s, j_s}(t)} \quad (8)$$

式中, $q_{c, i_s, j_s}(t)$ 为光伏在 t 时刻由云层状态 i_{cs} 转移到云层状态 j_{cs} 的样本。

上述基于数据的概率统计中, 只要样本数足够多, 则式(7)、式(8)的统计样本数趋于概率分布, 就可以近似用历史样本的统计表示转移概率, 从而得到配电网光伏电站和台区的用电状态转移矩阵。

3 孪生配电网载荷安全预警方法

3.1 高渗透光伏配电网过载风险态势表征

由于光伏输出和负荷功率实时变化, 含光伏配电网的运行场景具有多样性和时变性。因此, 配电变压器或各支路载荷水平随运行场景的变化而变化。本文根据配电网过载状态的预测值判断配电变压器、线路的运行状态, 从而对配电网运行情况预警, 根据其发生概率与严重程度建立风险指标^[22]对配电网运行态势进行表征。

定义负载率为变压器或支路实际运行容量与额定容量比值, 支路负载率为从馈线流向支路方向线路承载的实际容量与最大输送容量比值。设某主网有 m 条线路, 预测时间采样 n 个时刻点, 则可构建主网的线路负载率时序矩阵为构建主网的支路负载率时序特征矩阵为

$$\mathbf{L}_{m \times n} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{j1} & L_{j2} & L_{j3} & \cdots & L_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & L_{m3} & \cdots & L_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{L}_{m \times n}$ 为 m 行 n 列矩阵; L_{j1} 和 L_{jn} 分别为第 j 条支路在第 1 个时刻和第 n 个时刻负载率。

配电网中保护装置能够根据线路或变压器的运行性能进行控制保护, 使其不受损坏^[23-25]。基于保护装置的反时限保护特性, 定义线路载荷指标和变压器指标的状态预警等级, 对配电网线路及变压器过载态势进行表征。本文假设线路及变压器过载程度不超过额定值时可以长时间运行, 超过额定值再结合保护装置的控制特性进行预警等级划分。

定义变压器状态指标及预警等级如表 1 所示, 其中变压器状态在过载状态以下保持原状态 2 h 及以上会发出预警。

线路载荷状态指标和配变状态指标类似，定义线路载荷率在达到 1 之前持续时长和预警等级均和配变状态指标相同。但在负载率大于 1 时有所不同，具体和反时限过电流保护有关，反时限过电流保护动作特性如式(10)所示^[26-27]。

$$t_b = \frac{0.14 \times T_p}{(I_b / I_p)^{0.02} - 1} \quad (10)$$

式中： T_p 为保护设备的时间正定系数； I_b 为线路的流过电流； I_p 为保护设备的启动电流。

表 1 变压器状态指标

Table 1 Index of transformer status

负载率	持续时长/h	状态	预警等级
[0.0, 0.3)	—	轻载	安全
[0.3, 0.8)	—	中载	安全
[0.8, 1.0)	—	重载	蓝色预警
[1.0, 1.2]	≤3.0	过载	橙色预警
[1.2, 1.3]	≤2.5		
[1.3, 1.6]	≤2.0		
[1.6, ∞]	≤0.75		
[1.0, 1.2]	>3.0	严重过载	红色预警
[1.2, 1.3)	>2.5		
[1.3, 1.6)	>2.0		
[1.6, ∞)	>0.75		

本文从能量的角度对线路载荷状态进行预警，假设电压不变，以电流为例对预警信息进行表征。根据式(10)中反时限过电流保护动作特性可知，给定参数 T_p 和 I_p 可确定时间 t_b 和线路流过电流 I_b 关系，能够获得线路流过的电流和时间阈值的一种对应关系，即当该电流超过额定值时，流过的时间超过某阈值，则保护设备动作，否则不动作。因此，当线路载荷量超过额定值，但不超过对应的时间阈值时，预警等级为橙色；当线路载荷量超过额定值且超过对应的时间阈值时，预警等级为红色。

配电状态发生的概率根据马尔科夫链描述的状态转移概率预测确定，见本文 3.2 节阐述。根据非安全预警等级下负载率的平均值与其概率乘积，建立变压器过载风险指标为

$$I_t = \sum_{k_i=1}^{K_t} \rho_{k_i} \frac{t_{o,k_i}}{K_t T_s} \quad (11)$$

式中： K_t 为 t 时刻非安全预警等级的场景总数； k_i 为 t 时刻第 k 个非安全预警等级的运行场景； ρ_{k_i} 为孪生配电变压器 t 时刻第 k 个非安全预警等级场景的负载率； t_{o,k_i} 为第 k 个场景中非安全预警等级下变压器状态在 t 时刻保持原状态的时间； T_s 为配电网运行分析时长。

3.2 马尔科夫过程的随机模拟

如上所述，马尔科夫模型是描述配电网负荷和光伏行为状态转移关系的随机过程模型，孪生配电网基于马尔科夫模型根据当前状态对未来状态进行预测，形成未来多场景概率分布，并按场景概率通过抽样技术实现场景随机事件。然后对场景进行计算，得到支路及变压器负载率状况。再根据场景概率计算过载风险。因此，如何对概率状态之间相互依存的马尔科夫模型进行抽样是问题的关键。

抽样就是按一定的概率分布完成概率事件的一次实现。吉布斯抽样(Gibbs sampling)是统计学中马尔科夫蒙特卡洛(Markov chains Monte Carlo, MCMC)用来获取一系列近似等于指定多维概率分布观察样本的算法，在难以直接采样时从某一多变量概率分布中近似抽取样本序列。根据马尔科夫链和概率转移矩阵的性质，可以证明吉布斯抽样的分布最终收敛于联合分布。本文将马尔科夫链与蒙特卡洛仿真相结合，用蒙特卡洛模拟法对马尔科夫链进行模拟，采用 Gibbs 抽样技术对台区负荷和中压配电网光伏出力时间序列抽样。

Gibbs 抽样首先将状态向量按组分割，通过反复抽样使各组变量轮流更新。设 k 维状态向量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ ，当 X_i 更新时，Gibbs 转移核为除 X_i 的其他变量 (X_{-i}) 给定时 X_i 条件分布 $\pi(X_i | X_{-i})$ ，称作完全条件分布。完全条件分布反映变量 X_i 的转移情况。令初始状态 $\mathbf{X}^{(0)} = (X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_k^{(0)})$ ，模拟序列长度为 l ，马尔科夫链迭代次数 m ，则总迭代次数为 $n = m + l$ 。Gibbs 抽样过程为，分别从完全条件分布 $\pi(X_1 | X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)})$ 中抽取 $X_1^{(i+1)}$ 、 $\pi(X_2 | X_1^{(i+1)}, \dots, X_k^{(i)})$ 中抽取 $X_2^{(i+1)}$ 、 $\pi(X_k | X_1^{(i+1)}, \dots, X_{k-1}^{(i+1)})$ 中抽取 $X_k^{(i+1)}$ 。重复上述过程直至 $i = n$ 。

3.3 孪生配电网载荷态势预警分析步骤

基于数字孪生技术的含高比例光伏配电网过载预警分析步骤包括：

1) 基于数据驱动建立配电网源荷随机行为的马尔科夫模型。孪生配电网基于数据中台获取配电网台区和光伏历史数据，包括天气数据。对数据进行量化形成运行状态量。按本文 2.1 节的方法建立源荷马尔科夫模型。

2) 基于马尔科夫模型对未来时段的场景进行抽样。孪生配电网基于当前物理电网状态和源荷的马尔科夫模型，利用吉布斯抽样抽取未来时刻的一组样本场景。

3) 蒙特卡洛抽样场景的超实时随机模拟。孪生

配电网根据吉布斯抽样的场景, 结合光伏主动负载支撑策略进行蒙特卡洛概率潮流的超实时随机模拟。

4) 未来场景的载荷安全态势分析。根据概率潮流分析结果, 计算支路及变压器负过载风险指标。

5) 输出未来特定时段高渗透光伏配电网配电指标, 依据预警等级风险程度做出安全预警信息。

4 算例分析

采用 IEEE 33 节点配电网为例, 配电台区额定容量均为 400 kVA, 各支路最大输送容量均为 6 MVA, 主变额定容量为 5 MVA, 其结构图如图 4 所示。选取某地区 2009 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日共 2 190 天的负荷数据, 每小时一个采样点, 一天 24 点。抽取若干组日负荷作为各台区典型负荷曲线进行分析。其中参数 T_p 取 0.4 s, I_p 取线路载额定值 1 p.u.。

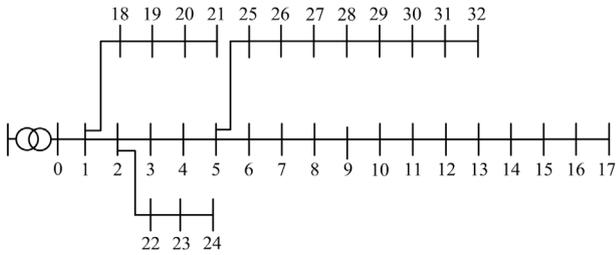


图 4 IEEE33 配电网结构图

Fig. 4 Diagram of IEEE33 distribution network structure

4.1 马尔科夫状态转移运用

根据台区配电负荷以及该地区光照强度历史数据, 划分源荷随机状态区间, 建立其随机行为的马尔科夫模型。本文假设该配网区域内光伏电站所接受辐射水平相同。以 09:00 到 12:00 的光伏建模为例, 辐照度的马尔科夫状态转移概率矩阵分别如式 (12) 一式 (14) 所示。

$$P_{pv,9_{-}10} = \begin{bmatrix} 0.6042 & 0.3055 & 0.0903 & 0.0000 \\ 0.0499 & 0.8252 & 0.1235 & 0.0014 \\ 0.0482 & 0.1930 & 0.7281 & 0.0307 \\ 0.0000 & 0.0526 & 0.2106 & 0.7368 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_{pv,10_{-}11} = \begin{bmatrix} 0.5726 & 0.3479 & 0.0795 & 0.0000 \\ 0.0744 & 0.8544 & 0.0712 & 0.0000 \\ 0.2000 & 0.3000 & 0.4857 & 0.0143 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1333 & 0.8667 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P_{pv,11_{-}12} = \begin{bmatrix} 0.7596 & 0.2019 & 0.0385 & 0.0000 \\ 0.1873 & 0.6889 & 0.1238 & 0.0000 \\ 0.2500 & 0.2292 & 0.5000 & 0.0208 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0769 & 0.9231 \end{bmatrix} \quad (14)$$

光伏出力和辐照度呈线性关系, 根据辐照度即可确定光伏出力状态, 光伏出力状态参数如表 2 所示。状态转移概率矩阵以概率形式描述未来源荷随机行为状态。

表 2 光伏出力状态参数

状态类别	α	β	云层覆盖水平
1	12.97	1.86	[0, 0.15]
2	19.06	12.37	(0.15, 0.45]
3	8.34	18.78	(0.45, 0.75]
4	2.23	29.05	(0.75, 1)

以 09:00 到 12:00 态势预测为例, 通过孪生电网态势感知物理电网 09:00 点时刻光伏出力状态, 通过马尔科夫转移矩阵预测之后 3 h 光伏出力状态, 通过吉布斯抽样的一种场景如图 5 所示。红线表示光伏在不同时刻出力状态; “*” 表示采样时刻点光伏出力状态类别; 蓝线表示光伏出力结果; 绿线表示在各采样时刻点之间对光伏出力进行样条插值, 使预测结果平滑。

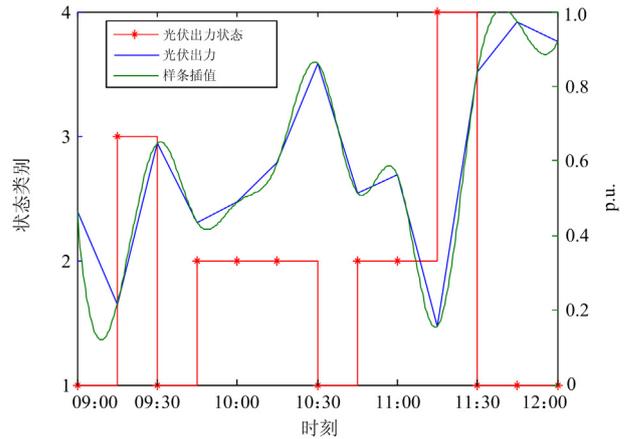


图 5 光伏出力状态转移

Fig. 5 Photovoltaic output state transfer

同理, 配电网部分节点负荷状态转移过程如图 6 所示。此部分与光伏建模原理相同, 不再赘述。

4.2 高渗透光伏接入配电网配电状态及风险态势分析

本文利用历史大数据构建概率模型对配电网运行态势进行预测, 方法基于配电网历史运行数据建立用马尔科夫链表征的状态转移关系。在建立配电网运行状态的马尔科夫链模型后, 将当前状态代入模型可预测未来时刻的状态。马尔科夫链理论上可以预测未来任意时刻的状态, 但基于有限历史数据和数据质量统计的马尔科夫模型存在误差, 且配电网实际运行中不断产生历史数据, 使得当前时刻的状态转移矩阵也在随着时间运行而不断修正。为保

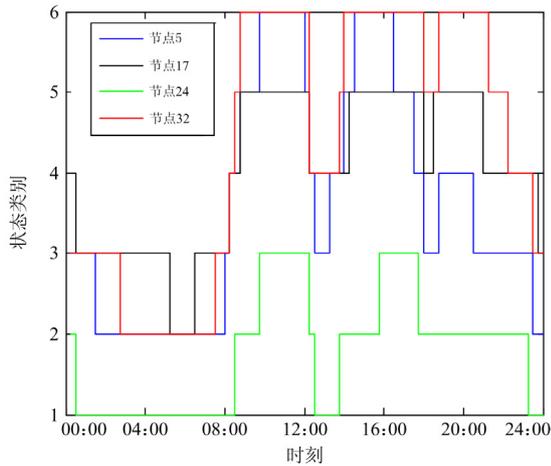


图 6 配电网部分节点负荷状态转移图

Fig. 6 Load state transfer of partial nodes in distribution network

证配电网态势预测的准确性，本文可预警的提前时间为 24 h 内。

为研究高渗透光伏对配电变压器过载影响，根据多次抽样计算变压器各时刻平均负载率，图 7 给出了接入光伏之前配电变压器和各支路负载率变化情况，其中支路标号的“0”代表变压器负载率，其他标号对应节点前各段支路。图 7 中绿色线、蓝色线、橙色线、红色线分别代表安全、蓝色预警、橙色预警以及红色预警。图 7 中可以看出各支路负载率变化范围较小，峰谷差小，另外越靠近馈线处越容易出现危险预警。接入不同渗透率光伏后变压器负载率变化情况如图 8 所示，其中分布式光伏的接入位置分别为 6、9、12、13、16、19、22、25、28、31，光伏渗透率按 50%~80%进行模拟。图 8 中可以看出随着光伏渗透率提高，变压器各时刻过载预警处于安全级别的时刻变多，但是负载峰谷差逐渐变大。图 9 给出了 70%渗透率光伏接入配电网风险指标，与无光伏配电网情况对比，可以看出接入光伏后配电变压器过载风险大幅度降低。

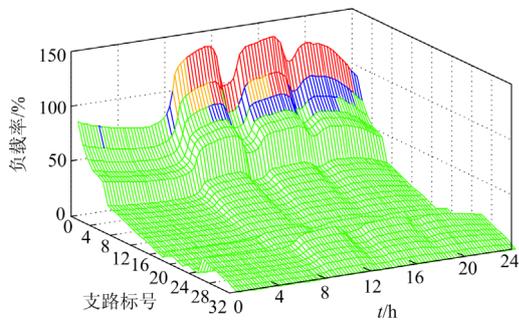


图 7 无光伏的配电网负载率

Fig. 7 Load ratio of distribution network without photovoltaic

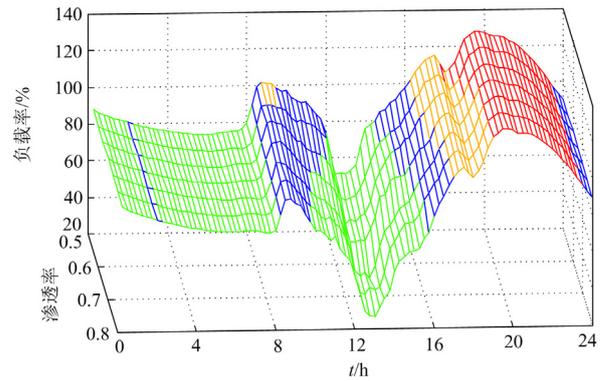


图 8 含高比例光伏的配电变压器负载率

Fig. 8 Load ratio of distribution network transformer with high proportion photovoltaic access

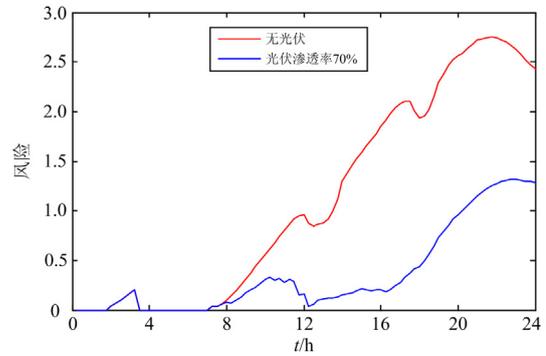


图 9 含高比例光伏的配电变压器过载风险

Fig. 9 Overload risk of distribution transformer with a high proportion of photovoltaic access

5 结论

在光伏出力不确定影响下高比例光伏配电网载荷问题复杂，研究配电网运行过程中载荷状态的实时演化并做出预判预警对保障新型配电系统的安全可靠运行具有现实意义。运用数字孪生超实时仿真功能实现高比例光伏配电网过载安全分析和预警是一种可行的手段。本文应用马尔科夫链基于历史数据建立了配电网源荷行为模型，能够准确描述源荷运行状态变迁的规律性。吉布斯抽样算法适合从马尔科夫链近似抽取样本序列，基于当前运行状态和建立的马尔科夫链，用吉布斯抽样抽取分析时段的预测场景是可行的。根据预测场景进行配电网蒙特卡洛随机模拟，可以正确得出高比例光伏配电网在分析时段的载荷安全态势。基于所提过载风险预警方法，如何具体细化变压器和线路过载状态指标将是后续的研究内容。

参考文献

- [1] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 37-54.
- [2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 李晓明, 刘翔宇, 李安昌, 等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(12): 124-131.
LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(12): 124-131.
- [4] 钟璐, 熊俊, 张茜, 等. 基于光伏减载的电力系统紧急降风险控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 157-167.
ZHONG Lu, XIONG Jun, ZHANG Xi, et al. A risk-reduction emergency control method of a power system based on photovoltaic power reserve[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 157-167.
- [5] 宋开胜, 王华芳, 马宏忠, 等. 10 kV 配电变压器自动调压的研究以及试验分析[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(4): 30-35, 62.
SONG Kaisheng, WANG Huafang, MA Hongzhong, et al. Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(4): 30-35, 62.
- [6] 王艺, 王宾, 刘阳, 等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 164-172.
WANG Yi, WANG Bin, LIU Yang, et al. Optimization strategy for distribution network reconfiguration considering the dynamic behavior of DGs[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 164-172.
- [7] 黄伟, 刘斯亮, 王武, 等. 长时间尺度下计及光伏不确定性的配电网无功优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(5): 154-162.
HUANG Wei, LIU Siliang, WANG Wu, et al. Optimal reactive power dispatch with long-time scale in distribution network considering uncertainty of photovoltaic[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 154-162.
- [8] STECANELLA P A J, VIEIRA D, VASCONCELOS M V L, et al. Statistical analysis of photovoltaic distributed generation penetration impacts on a utility containing hundreds of feeders[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 175009-175019.
- [9] 葛维春, 蔡亦浓, 李江, 等. 基于多分支电流混合量测的配电网三相状态估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 1-10.
GE Weichun, CAI Yinong, LI Jiang, et al. Three-phase state estimation of a distribution network based on multi-branch current mixing measurement[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 1-10.
- [10] 林才华, 张逸, 邵振国, 等. 基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1751-1761.
LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Comprehensive evaluation of power quality on long-time scale based on fuzzy DEA[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1751-1761.
- [11] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(增刊 1): 203-213.
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1): 203-213.
- [12] 颜湘武, 徐韵. 考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(20): 4358-4372.
YAN Xiangwu, XU Yun. Multiple time and space scale reactive power optimization for distribution network with multi-heterogeneous RDG participating in regulation and considering network dynamic reconfiguration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(20): 4358-4372.
- [13] 李建芳, 张璐, 宋晓辉, 等. 含高渗透率分布式电源的配电网多目标无功分区及主导节点选择方法[J]. *可再生能源*, 2017, 35(11): 1664-1671.
LI Jianfang, ZHANG Lu, SONG Xiaohui, et al. Multi-objective reactive power partitioning and pilot node selection of distribution network with high penetration of DG[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(11): 1664-1671.

- [14] ABRI R A, EL-SAADANY E F, ATWA Y M. Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 326-334.
- [15] LI Y, WANG T, DENG Z. Reactive power optimization based on data-driven load curve segmentation[C] // IEEE International Conference on Power Data Science (ICPDS), November 22-24, 2019, Taizhou, China: 143-146.
- [16] MENG T, XU M, ZOU G, et al. Voltage regulation based on hierarchical and district-dividing control for active distribution network[C] // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), November 15-18, 2015, Brisbane, QLD, Australia: 1-5.
- [17] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin—the simulation aspect[J]. Mechatronic Futures, 2016: 59-74.
- [18] GOPAL C, MANJU K, MOHAMED E. Digital twin technology[M]. CRC Press, 2021.
- [19] 杜晓东, 王立斌, 赵建利, 等. 配电网台区数字孪生技术的实现与应用研究[J]. 河北电力技术, 2021, 40(3): 19-23, 40.
DU Xiaodong, WANG Libin, ZHAO Jianli, et al. Research on technical realization and application of digital twin in distribution station area[J]. Hebei Electric Power, 2021, 40(3): 19-23, 40.
- [20] DEEPU T S, RAVI V. Exploring critical success factors influencing adoption of digital twin and physical internet in electronics industry using grey-DEMATEL approach[J]. Digital Business, 2021, 1(2): 1-15.
- [21] ZHOU M, YAN J, FENG D. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 391-398.
- [22] 张璞, 张波, 王建, 等. 计及主设备时变状态的变电站短时风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 73-81.
ZHANG Pu, ZHANG Bo, WANG Jian, et al. Short-term risk assessment for a power substation considering the time-varying operation conditions of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 73-81.
- [23] 陈璟, 熊小伏, 胡剑, 等. 有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 19-29.
CHEN Jing, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 19-29.
- [24] 毛思杰, 贾燕冰, 张琪. 计及过载线路发热严重程度的紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 34-42.
MAO Sijie, JIA Yanbing, ZHANG Qi. Research on emergency control method considering severity of overheating of overload line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 34-42.
- [25] 何文林, 孙翔, 蒋跃军. 浙江电网 220 kV 变压器过载能力计算分析[J]. 浙江电力, 2008, 27(5): 20-23.
HE Wenlin, SUN Xiang, JIANG Yuejun. Analysis on overload capability calculation of 220 kV transformers in Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 27(5): 20-23.
- [26] 杨克杰, 黄纯. 配电网反时限过电流保护优化整定方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 163-168.
YANG Kejie, HUANG Chun. Optimal setting method of inverse time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 163-168.
- [27] 朱重阳, 张华. 基于网络同步的方向过流保护采样值计算[J]. 华电技术, 2016, 38(12): 37-38.
ZHU Chongyang, ZHANG Hua. Calculation of directional over-current protection sampling value based on network synchronization[J]. Huadian Technology, 2016, 38(12): 37-38.

收稿日期: 2021-10-24; 修回日期: 2021-12-08

作者简介:

杜晓东(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统仿真、数字孪生、线损分析; E-mail: sjzduxd@163.com

赵建利(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为能源互联网、电力物联网应用技术; E-mail: sjzhaolj@sina.com

刘科研(1978—), 男, 博士, 教授级高工, 硕士生导师, 主要研究方向为配电网运行分析、智能有源配电网故障诊断、配电网大数据分析、配电网仿真。E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)