

基于模糊动态时间弯曲算法的主动配电网电压运行状态评估

周金辉¹, 颜剑峰², 王子凌¹, 柳伟²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要:主动配电网(ADN)电压运行状态评估能够有效集成运行产生的多源异构数据表征ADN电压运行状态。为了客观反映关键节点的电压控制能力、互联分区的无功互动支撑和配电网全局的无功平衡水平,构建“点-区-网”多颗粒度评估指标体系;提出一种融合模糊识别和动态时间弯曲的模糊动态时间弯曲(FDTW)评估算法,将电压运行状态评估问题转化为模糊序列模式识别问题,并采用最小弯曲距离比较待评估样本与参考样本的相似度。以某ADN为应用实例,验证了所提指标体系和FDTW评估算法的有效性。

关键词:主动配电网;点-区-网;多颗粒度;模糊动态时间弯曲算法;电压运行状态评估

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012002

0 引言

在主动配电网ADN(Active Distribution Network)中,通常通过态势感知技术评价系统的运行状态,利用主动协调控制和需求侧管理等技术解决大规模、高渗透率分布式电源DG(Distributed Generator)并网引发的一系列问题。鉴于ADN电压的强不确定性、时变性等特点,亟需研究电压运行状态评估指标体系和相应的评估方法,为ADN运行调控和态势引导提供直观的数据参考。

AND中包含大量的不确定性因素,导致配电网的不确定性远大于输电网,尤其是电压的随机波动,因此需理解ADN的电压运行状态并采取主动预防措施。文献[1]构造智能配电网态势感知和态势引导技术的总体架构,将态势感知分为态势觉察、态势理解、态势预测和态势呈现4个方面,本文的主要工作即为ADN的电压态势觉察和态势理解。文献[2]构建基于物联网技术的多层次分布式监测系统,融合数据采集与监测系统、能量管理系统、配电管理系统、营销系统等多源信息,为电压评估提供了数据基础。文献[3]通过配电网历史数据建模获取虚拟的量测信息,为配电网调度提供了准确的预测信息。文献[4]采用径向基函数人工神经网络对系统的动态进行估计,以重建因通信故障而无法访问的测量值。上述研究主要致力于数据挖掘和数据融合,对于ADN的电压评估起到不可或缺的作用。在配电网静态电压评估领域,文献[5]考虑母线间脆弱信息的相互影响,利用层次分析法和模糊综合评价实现对母线间脆弱性关联程度的量化。文献[6]提出考虑沿线电压特性的评估指标及相应的电压改善潜力

定量评估方法,能有效对台区电压改善潜力进行预先量化评估。文献[7]基于两点估计法和柯尼斯-费歇尔级数,提出含随机出力DG的配电网静态电压稳定概率评估方法。上述研究致力于稳态电压安全问题,但未充分考虑DG的无功调控能力。ADN中大量DG并网易导致电能无法就地消纳^[8],间接产生电压波动、越限等问题^[9]。为控制关键节点电压,预防出现大规模电压越限情况,必须发挥DG自身的无功支撑能力,并辅以储能装置、电容/电抗器、静止无功补偿器SVC(Static Var Compensator)/静止无功发生器SVG(Static Var Generator)等无功电源的电压调节能力。文献[10]提出基于电压灵敏度矩阵的光伏逆变器电压控制策略。文献[11]通过分布式光伏电路的智能逆变器发挥电压二次控制和无功支撑能力。储能装置不仅可促进可再生能源的消纳^[12],使得分区能以微电网的形式独立运行^[13],而且可向电网输入无功功率^[14],保证配电网无功就地平衡。文献[15]提出储能装置、SVG协同调压的方法,对微电网中的功率波动进行有效控制。文献[16]分析分布式光伏发电对配电网电压的影响,并提出电抗器补偿、安装储能装置等多种解决电压越限的方案。

综上,本文综合考虑上述电压评估影响因素,建立“点-区-网”多颗粒度电压评估指标体系,并根据ADN电压运行状态评估的模糊特性,提出基于模糊动态时间弯曲FDTW(Fuzzy Dynamic Time Warping)算法的电压运行状态评估方法,通过序列模式识别可以确定“点-区-网”各颗粒度的电压运行状态,为关键点电压控制、分区无功互动支撑、全局无功平衡提供数据支撑。

1 电压多颗粒度评估指标体系

评估的颗粒度越小,评估的精细化程度越高。受多时间尺度系统分层控制的启发^[17],为了应对各颗粒度的差异化需求,本文提出“点-区-网”递进

收稿日期:2020-02-06;修回日期:2020-09-27

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS18002Q)
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company(5211DS18002Q)

的多颗粒度电压运行状态评估指标体系,如表 1 所示。

表 1 多颗粒度评估指标体系

Table 1 Assessment index system of multi-particle scale

指标	符号
点	
并网点无功裕度	K_{QM}
并网点功率因数	K_{PF}
并网点电压偏移	$K_{\Delta U}$
区	
分区无功平衡度	P_{QB}
分区互联互动支撑	P_{IC}
电压合格统计率	P_{VA}
功率因数合格统计率	P_{PF}
网	
全局无功平衡度	D_{QB}
电压合格统计率	D_{VA}
功率因数合格统计率	D_{PF}

1.1 关键点电压运行状态评估指标体系

选取具备无功调节能力的并网点作为关键点,分析 DG 并网点无功支撑能力,并综合考虑电容/电抗器、SVC/SVG、储能装置等无功电源并网点的电压调控能力后,建立关键点电压评估指标体系。

(1) DG 在满足有功功率、功率因数、额定容量限制的同时,能发出无功支撑电网电压。功率因数阈值为 $\cos \varphi_{gate}$ 时, DG 功率输出的制衡关系见图 1。

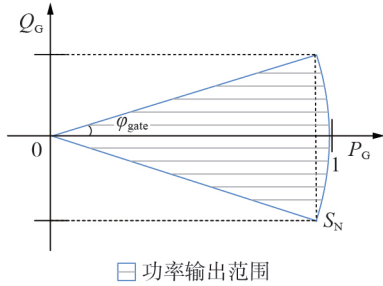


图 1 DG 出力变化范围

Fig.1 Variation range of DG output

DG 并网点无功裕度指标 K_{QM} 为:

$$K_{QM} = \begin{cases} 1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{gate}} & P_G \leq S_N \cos \varphi_{gate} \\ 1 - \frac{Q_G}{\sqrt{S_N^2 - P_G^2}} & P_G > S_N \cos \varphi_{gate} \end{cases} \quad (1)$$

其中, φ 为 DG 的功率因数角; P_G 、 Q_G 分别为 DG 的有功和无功功率; S_N 为 DG 的额定容量。

通过逆变器并网的储能装置和 SVG 的并网点无功裕度指标计算公式同式(1)。

电容/电抗器、SVC 并网点无功裕度指标为:

$$K_{QM} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_N} \quad (2)$$

其中, Q_{out} 为装置输出无功; Q_N 为装置额定无功容量。

(2) 无功电源并网点的功率输出受限于功率因数阈值 $\cos \varphi_{gate}$ 。以接入 10 kV 电压等级的 DG 为例,

通过变流器并网时应满足功率因数不低于 0.95 的要求^[18]。并网点功率因数指标 K_{PF} 为:

$$K_{PF} = 1 - \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_{gate}} \quad (3)$$

(3) 配电网中节点电压需在 $0.9U_N \sim 1.1U_N$ 范围内。并网点电压偏移指标 $K_{\Delta U}$ 为:

$$K_{\Delta U} = \frac{1}{e^{\gamma |U_N - U_{PCC}|}} \quad (4)$$

其中, U_N 为并网点额定电压; U_{PCC} 为并网点电压; γ 为惩罚系数, $\gamma=3$ 。

1.2 分区电压运行状态评估指标体系

ADN 分区控制能够降低配电网的控制难度^[19], 并以孤岛形式满足关键分区的用电需求。分区控制与无功就地平衡的理念相契合, 因此建立分区电压运行状态评估指标体系, 表征分区的无功调控能力和互联分区间的无功互动支撑能力。

(1) DG 能够发出的最大无功功率 Q_{G-max} 为:

$$Q_{G-max} = \begin{cases} P_G \tan \varphi_{gate} & P_G \leq S_N \cos \varphi_{gate} \\ \sqrt{S_N^2 - P_G^2} & P_G > S_N \cos \varphi_{gate} \end{cases} \quad (5)$$

当分区处于孤岛状态且无功功率极度匮乏时, 若 $P_G > S_N \cos \varphi_{gate}$, 甚至可以降低 DG 的有功功率来增发无功功率。对于单个分区而言, 无功功率能够满足无功需求即可认为处于最佳状态。分区无功平衡度指标 P_{QB} 为:

$$P_{QB} = \min \{ e^{\lambda(B_s - 1)}, 1 \} \quad (6)$$

$$B_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{S,G}} Q_{G-max,i} + \sum_{j=1}^{N_{S,ESS}} Q_{ESS,j} + \sum_{k=1}^{N_{S,C}} Q_{C,k}}{\sum_{l=1}^{N_{S,L}} Q_{L,l}} \quad (7)$$

其中, $Q_{G-max,i}$ 为第 i 个 DG 能够输出的最大无功功率; $Q_{ESS,j}$ 为第 j 台储能装置能够输出的无功功率; $Q_{C,k}$ 为第 k 台无功补偿装置能够输出的无功功率; $Q_{L,l}$ 为第 l 个无功负荷; $N_{S,G}$ 、 $N_{S,ESS}$ 、 $N_{S,C}$ 、 $N_{S,L}$ 分别为分区中 DG、储能、无功补偿装置、无功负荷的数量; λ 为惩罚系数, $\lambda=2$ 。

(2) 当各分区互联时, 各分区可以互为备用、互相提供无功支撑, 促进整个 ADN 的经济、安全运行。假设 w 个分区互联, 分区互联互动支撑指标 P_{IC} 为:

$$P_{IC} = \min \{ e^{\lambda(B_{IC} - 1)}, 1 \} \quad (8)$$

$$B_{IC} = \frac{\sum_{h=1}^w \left(\sum_{i=1}^{N_{S,G}^h} Q_{G-max,i}^h + \sum_{j=1}^{N_{S,ESS}^h} Q_{ESS,j}^h + \sum_{k=1}^{N_{S,C}^h} Q_{C,k}^h \right)}{\sum_{h=1}^w \sum_{l=1}^{N_{S,L}^h} Q_{L,l}^h} \quad (9)$$

其中, $Q_{G-max,i}^h$ 为分区 h 中第 i 个 DG 能够输出的最大无功功率; $Q_{ESS,j}^h$ 为分区 h 中第 j 台储能装置能够输出

的无功功率; $Q_{c,k}^h$ 为分区 h 中第 k 台无功补偿装置能够输出的无功功率; $Q_{L,l}^h$ 为分区 h 中第 l 个无功负荷。

(3) 分区电压合格统计率指标 P_{VA} 为:

$$P_{VA} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} E_i}{N_s} \times 100\% \quad (10)$$

$$E_i = \begin{cases} 1 & U_i \in [U_{i,\min}, U_{i,\max}] \\ 0 & U_i \notin [U_{i,\min}, U_{i,\max}] \end{cases} \quad (11)$$

其中, N_s 为分区的节点数量; U_i 为节点 i 的电压; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压上、下限。

(4) 功率因数合格统计率指标 P_{PF} 为:

$$P_{PF} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} F_i}{N_s} \times 100\% \quad (12)$$

$$F_i = \begin{cases} 1 & \cos \varphi_i \geq \cos \varphi_{i,\text{gate}} \\ 0 & \cos \varphi_i < \cos \varphi_{i,\text{gate}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\cos \varphi_i$ 为节点 i 的功率因数; $\cos \varphi_{i,\text{gate}}$ 为节点 i 功率因数阈值。

1.3 配电网全局电压运行状态评估指标体系

构建配电网全局电压运行状态评估指标体系,从而反映全网的电压运行特性。指标 D_{QB} 、 D_{VA} 、 D_{PF} 与分区评估指标 P_{QB} 、 P_{VA} 、 P_{PF} 的计算公式类似,不再赘述。

2 电压运行状态评估方法

2.1 基于模式识别的电压运行状态评估

ADN 中电压运行状态的优劣属于模糊概念,可以使用模糊序列加以表征,并且将上述问题转化为模糊序列的模式识别问题。受到动态时间弯曲 (DTW) 算法在模式识别领域应用的启发^[20],根据样本间的距离和序列形状的相似度,可以将关键点、分区、配电网全局的电压运行状态分别归类到预定义的参考样本类别。

DTW 算法作为一种模式识别方法,最早运用于语音识别领域,目前在电力领域已得到初步的应用,如电能质量评估、继电保护算法、同调机一致性识别。该算法不仅能够度量序列中样本的距离相似度,而且能够比较序列的形状相似度,对少量训练数据进行有效的分类或聚类^[13]。本文提出的 FDTW 算法既考虑了电压评估的模糊属性,又降低了传统 DTW 算法固有的病态弯曲现象^[21]发生的概率。电压评估具体实施流程如图 2 所示。

2.2 FDTW 算法

基于 FDTW 算法的电压评估方法实施流程如下。

(1) 电压运行状态评估矩阵。

分别建立关键点、分区、配电网全局的电压运行状态评估矩阵。以下详细介绍关键点电压评估矩阵

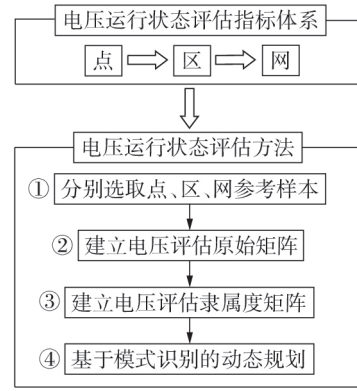


图2 电压评估流程图

Fig.2 Flowchart of voltage assessment

$X_{KP} = (x_{i,j})_{(m+n) \times q}$ 的建立过程,分区、配电网全局的电压评估矩阵 X_{PA} 、 X_{DN} 的建立过程同理。矩阵 X_{KP} 定义为:

$$X_{KP} = \begin{bmatrix} M' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'_1 \\ \vdots \\ M'_m \\ N'_1 \\ \vdots \\ N'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,q} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & x_{m,q} \\ x_{m+1,1} & \cdots & x_{m+1,q} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m+n,1} & \cdots & x_{m+n,q} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, M' 、 N' 分别为原始参考序列、原始待评估序列; m 、 n 分别为参考、待评估序列的数量; q 为序列中样本的数量; 样本 $x_{i,j}$ 的获取方法参照 1.1 节。

(2) 样本序列模糊化。

ADN 电压运行状态属于模糊概念,模糊子集之间存在中间过渡的模糊性。在论域 [ADN 电压运行状态] 上定义 4 个模糊子集 E 、 G 、 C 、 B , 分别表示优、良、中、差。隶属度函数的取值在 $[0, 1]$ 之间, 函数值愈趋近于 1, 从属于该模糊子集的程度越高。鉴于对每个指标进行模糊化处理较为繁杂, 建立统一的高斯型隶属函数, 表达式如下:

$$\begin{cases} \mu_E(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-h_1)^2}{2\sigma^2}} & 0 \leq x < h_1 \\ 1 & h_1 \leq x \leq 1 \end{cases} \\ \mu_G(x) = e^{-\frac{(x-h_2)^2}{2\sigma^2}} & 0 \leq x \leq 1 \\ \mu_C(x) = e^{-\frac{(x-h_3)^2}{2\sigma^2}} & 0 \leq x \leq 1 \\ \mu_B(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < h_4 \\ e^{-\frac{(x-h_4)^2}{2\sigma^2}} & h_4 \leq x \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

其中, h_1 — h_4 为均值; σ 为标准差。

在本文具体实施中, 所有指标在论域 [ADN 电压运行状态] 上均定义 4 个模糊子集, 各指标的模糊子集只需改变参数 h_1 — h_4 。

对矩阵 X_{KP} 中的样本进行模糊化处理, 可以得到关键点电压评估隶属度矩阵 $Y_{KP} = (y_{i,j})_{(m+n) \times (4q)}$ 如下:

$$Y_{KP} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} = [\mathbf{M}_1 \cdots \mathbf{M}_m \mid \mathbf{N}_1 \cdots \mathbf{N}_n]^T$$

$$\begin{bmatrix} \mu_E(x_{1,1}) & \mu_G(x_{1,1}) & \mu_C(x_{1,1}) & \mu_B(x_{1,1}) & \cdots & \mu_E(x_{1,q}) & \mu_G(x_{1,q}) & \mu_C(x_{1,q}) & \mu_B(x_{1,q}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_E(x_{m,1}) & \mu_G(x_{m,1}) & \mu_C(x_{m,1}) & \mu_B(x_{m,1}) & \cdots & \mu_E(x_{m,q}) & \mu_G(x_{m,q}) & \mu_C(x_{m,q}) & \mu_B(x_{m,q}) \\ \mu_E(x_{m+1,1}) & \mu_G(x_{m+1,1}) & \mu_C(x_{m+1,1}) & \mu_B(x_{m+1,1}) & \cdots & \mu_E(x_{m+1,q}) & \mu_G(x_{m+1,q}) & \mu_C(x_{m+1,q}) & \mu_B(x_{m+1,q}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_E(x_{m+n,1}) & \mu_G(x_{m+n,1}) & \mu_C(x_{m+n,1}) & \mu_B(x_{m+n,1}) & \cdots & \mu_E(x_{m+n,q}) & \mu_G(x_{m+n,q}) & \mu_C(x_{m+n,q}) & \mu_B(x_{m+n,q}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{N}$ 分别为模糊化处理后的参考序列、待评估序列。

(3) 动态路径规划 DPP (Dynamic Path Planning)。

将 DTW 算法引入 ADN 电压运行状态评估时, 只需根据动态规划理论规划出最优弯曲路径, 得到反映相似度的最小弯曲距离 MBD (Minimum Bending Distance), 比较待评估序列 $\mathbf{N}$ 和参考序列 $\mathbf{M}_1$ 、 $\mathbf{M}_2$ 、 $\cdots$ 、 $\mathbf{M}_m$ 的 MBD, 则可以评价序列 $\mathbf{N}$ 与各参考序列的相似度, 确定序列 $\mathbf{N}$ 所属的电压运行状态等级。

DTW 算法比较序列相似度的步骤如下。

首先定义长度分别为 s 和 t 的序列 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{U} = [u_1, u_2, \cdots, u_i, \cdots, u_s] \\ \mathbf{V} = [v_1, v_2, \cdots, v_j, \cdots, v_t] \end{cases} \quad (17)$$

构造距离矩阵 $\Delta_{s \times t}$, 其中矩阵的第 i 行第 j 列元素以 p 范数的形式获得。

$$\Delta = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1j} & \cdots & d_{1t} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & \cdots & d_{ij} & \cdots & d_{it} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{s1} & \cdots & d_{sj} & \cdots & d_{st} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$d_{ij} = \|u_i - v_j\|_p \quad (19)$$

基于 DPP, 压缩或扩展样本的对应关系, 从而获得反映序列相似度的最优弯曲路径。有效的弯曲路径受限于 3 个基本约束, 分别是边界性、连续性和单调性^[21]。显然, 满足上述条件的有效路径数呈指数增长。最优弯曲路径对应的 MBD 值 $D_{(U,V)}$ 计算公式如式 (20) 所示。

$$D_{(U,V)} = \sqrt[p]{D(u_s, v_t)} \quad (20)$$

初始边界条件为:

$$\begin{cases} D(u_i, v_1) = d_{i1} & i = 1, 2, \cdots, s \\ D(u_1, v_j) = d_{1j} & j = 1, 2, \cdots, t \end{cases} \quad (21)$$

$D(u_i, v_j)$ 的递推公式为:

$$D(u_i, v_j) = \min \left\{ \rho_d d_{ij} + D(u_{i-1}, v_{j-1}), \right. \\ \left. \rho_v d_{ij} + D(u_i, v_{j-1}), \rho_h d_{ij} + D(u_{i-1}, v_j) \right\} \quad (22)$$

其中, ρ_d 、 ρ_v 、 ρ_h 为权重因子, 分别用于惩罚或支持对角、垂直、水平方向的转变, 本文中, $\rho_d = \rho_v = \rho_h = 1$ 表明所有方向具有相同的可能性。

序列 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 的最优弯曲路径和对应关系如图 3 所示。MBD 越小, 相似度越高。

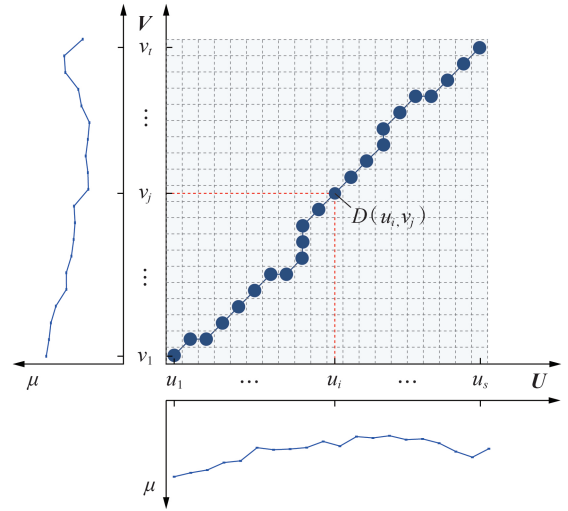


图 3 最优弯曲路径动态规划

Fig.3 Dynamic programming of optimal warping path

3 案例研究

3.1 评估案例

为验证基于 FDTW 算法的 ADN 多颗粒度电压运行状态评估方案的适用性和有效性, 选取东部沿海某辐射型 ADN 作为评估对象, 其拓扑结构如附录中图 A1 所示。该 ADN 由 21 个节点、4 个分区组成, 其中节点 1 安装 SVC, 节点 21 安装电池储能装置, 节点 3、5、8、10、12、14、16、17、19、21 接入 DG, 节点 9、13、16 安装可投切并联电容器。DG、储能装置和可投切电容器组的部分参数如附录中表 A1—A3 所示。各指标的参考样本值见附录中表 A4, 参考样本 1—4 分别对应优、良、中、差 4 种运行状态等级。通过表 A4 即可确定参数 h_1 — h_4 。

3.2 电压运行状态评估结果分析

以下分别从“点-区-网”不同颗粒度分析配电网的电压运行状态。

(1) 关键点电压运行状态评估。

采集关键节点运行数据, 并根据 1.1 节公式分别计算配电网 12 个关键节点的待评估样本值, 如附录中图 A2 所示。经模糊化处理后, 关键节点的参考样

本和待评估样本的模糊隶属度如附录中图 A3 所示。附录中图 A4 为各节点样本与参考样本动态规划的最优弯曲路径。基于弯曲路径偏离对角线的程度即可初步判断待评估样本的电压运行状态等级,然而基于 DTW 评估电压运行状态的等级不仅要考虑序列的形状相似度,也要兼顾序列中元素间的差异。因此,计算并比较待评估样本与 4 个参考样本的 MBD,即可确定节点所属的电压运行状态,如表 2 所示。由表 2 中可知:由于安装了 SVC,节点 1 的无功支撑能力最强,该节点对于电压调控起到重要作用,其运行状态为优;节点 8 并入了大量的 DG,且该并网点未安装其他无功补偿装置,当 DG 有功功率输出大于额定容量和功率因数阈值的乘积时,无功出力受到限制,节点的运行状态为中;节点 21 虽然安装了储能装置,但由于其并网点同时也接入了大量的分布式光伏,为了促进光伏的就地消纳,储能装置必须最大限度发挥电压调节能力,其电压调节裕度不足,节点的运行状态为良。

表 2 节点待评估样本和参考样本的 MBD

Table 2 MBD between unevaluated and reference samples of nodes

分区	节点	MBD			
		参考样本 1	参考样本 2	参考样本 3	参考样本 4
1	1	0.4976	1.7012	3.7560	4.4239
	3	0.9114	1.8491	3.8312	4.5685
	16	1.4903	0.3177	2.4074	4.1928
2	5	3.6636	2.9125	0.7148	2.4620
	8	3.6913	2.5065	0.5456	2.4112
	9	1.4160	0.3448	2.5000	4.3983
3	10	1.5525	0.3997	2.2954	4.2976
	12	3.5888	3.1149	1.2667	2.4955
	13	3.6699	2.6099	0.7809	2.4777
4	17	0.5578	1.8078	3.7283	4.2955
	19	1.7606	0.7215	2.8914	4.3019
	21	1.6925	0.4886	2.5957	4.4097

(2) 分区电压运行状态评估。

采集各分区运行数据,并根据 1.2 节公式分别计算配电网 4 个分区的待评估样本值,如附录中图 A5 所示。经模糊化处理后,分区的参考样本和待评估样本的模糊隶属度如附录中图 A6 所示。附录中图 A7 为各分区样本与参考样本动态规划的最优弯曲路径。计算并比较待评估样本与 4 个参考样本的 MBD,即可确定分区所属的电压运行状态,如表 3 所示。由表 3 可知:分区 1、4 的运行状态均为优,由待评估原始样本可知,分区 1 的样本普遍优于分区 4 的样本,但由于分区 1 与其他 3 个分区均互联,且分区 2、3 的无功调控能力较差,拉低了分区 1 的无功调控能力,使得分区 1 的 MBD 大于分区 4 的 MBD,分区 1 的无功调控能力较分区 4 略有不足;由于分区无功平衡度较差且出现了功率因数不合格节点,分区 3

的运行状态为中。

表 3 分区待评估样本和参考样本的 MBD

Table 3 MBD between unevaluated and reference samples of partitions

分区	MBD			
	参考样本 1	参考样本 2	参考样本 3	参考样本 4
1	0.7612	1.1301	2.7593	3.3014
2	2.1344	1.1566	1.6920	3.2954
3	3.4436	2.6829	2.4443	2.8932
4	0.5142	1.4738	2.8691	3.6205

(3) 配电网全局电压运行状态评估。

采集 ADN 运行数据,并根据 1.3 节公式计算配电网全局的待评估样本值,如附录中表 A5 所示。经模糊化处理后,配电网的参考样本和待评估样本的模糊隶属度如附录中图 A8 所示。附录中图 A9 为配电网待评估样本与参考样本动态规划的最优弯曲路径。计算并比较待评估样本与 4 个参考样本的 MBD,即可确定 ADN 所属的电压运行状态,如表 4 所示。根据表 4 可知,该 ADN 的电压运行状态为良。结合待评估样本可知,其无功平衡度和节点电压合格统计率均较高,但由于出现了功率因数不合格节点,配电网整体电压运行状态下降。

表 4 配电网待评估样本和参考样本的 MBD

Table 4 MBD between unevaluated and reference samples of ADN

参考样本	MBD	参考样本	MBD
1	0.9678	3	1.1405
2	0.2782	4	2.8515

图 4 为 ADN 电压状态评估全局展示。图中直观地展示了“点-区-网”不同颗粒度的电压运行状态,为节点靶向控制、分区互动支撑、系统调度提高提供了有效的数据支撑。

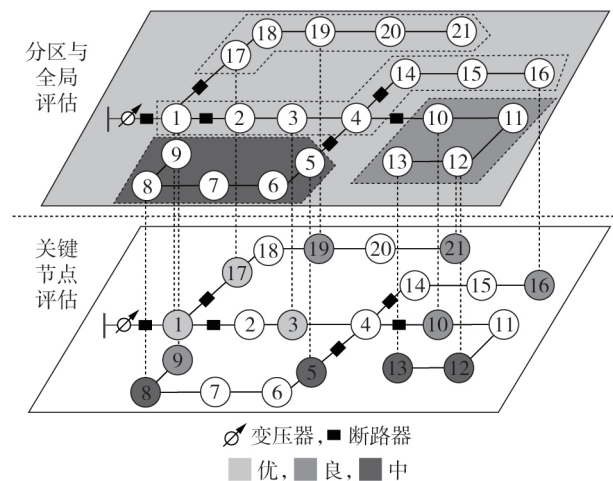


图 4 ADN 电压状态评估全局展示

Fig.4 Global display for voltage state assessment of ADN

4 结论

本文分析了DG等无功电源的无功支撑能力,从“点-区-网”不同颗粒度构建电压运行状态评估指标体系,并提出了基于FDTW算法的ADN电压运行状态评估方法,在传统的DTW算法的基础上引入模糊理念,基于模式识别理论确定“点-区-网”不同颗粒度的电压运行状态等级。多颗粒度评估结果能够准确反映关键节点的电压调节能力、分区的无功就地平衡能力和配电网全局的无功平衡水平,以及潜在的运行风险,为态势利导提供指导。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王守相,梁栋,葛磊蛟. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):2-8.
WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12):2-8.
- [2] 李晓露,高鸣燕,丁振华,等. 构件技术与开放的SCADA/EMS/DMS系统[J]. 电力自动化设备,2001,21(6):10-13.
LI Xiaolu, GAO Mingyan, DING Zhenhua, et al. Component technology and open architecture of SCADA/EMS/DMS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6):10-13.
- [3] 黄曼云,卫志农,孙国强,等. 基于历史数据挖掘的配电网态势感知方法[J]. 电网技术,2017,41(4):1139-1145.
HUANG Manyun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A novel situation awareness approach based on historical data-mining model in distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1139-1145.
- [4] BAI Feifei, WANG Xiaoru, LIU Yilu, et al. Measurement-based frequency dynamic response estimation using geometric template matching and recurrent artificial neural network[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(3):10-18.
- [5] 孟祥萍,片兆宇,张龙斌,等. 基于母线间脆弱信息协调的配电网低电压风险评估[J]. 电网技术,2012,36(7):219-223.
MENG Xiangping, PIAN Zhaoxu, ZHANG Longbin, et al. Low voltage risk assessment of distribution network based on information coordination of vulnerability among buses[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):219-223.
- [6] 欧阳森,耿红杰,杨家豪. 低压配电网台区电压改善潜力评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):123-128.
OUYANG Sen, GENG Hongjie, YANG Jiahao. Evaluation of regional voltage improvement potential for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1):123-128.
- [7] 胡丽娟,刘科研,盛万兴,等. 含随机出力分布式电源的配电网静态电压稳定快速概率评估方法[J]. 电网技术,2014,38(10):2766-2771.
HU Lijuan, LIU Keyan, SHENG Wanxing, et al. Fast probabilistic evaluation of static voltage stability in active distribution network considering random output from distributed generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2766-2771.
- [8] 邢海军,程浩忠,曾平良,等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):74-80.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. IDG accommodation based on second-order cone programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):74-80.
- [9] 王秀丽,张择策,侯雨伸. 基于拟蒙特卡罗模拟法的主动配电网随机潮流计算[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):7-12.
WANG Xiuli, ZHANG Zece, HOU Yushen. Stochastic load flow calculation based on quasi-Monte Carlo method for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):7-12.
- [10] 姚宏民,杜欣慧,李廷钧,等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术,2019,43(2):462-469.
YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):462-469.
- [11] BELL F, NGUYEN A, MCCARTY M, et al. Secondary voltage and reactive power support via smart inverters on a high-penetration distributed photovoltaic circuit[C]//2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2016:1-6.
- [12] CASTILLO-CAGIGAL M, CAAMAÑO-MARTÍN E, MATALLANAS E, et al. PV self-consumption optimization with storage and active DSM for the residential sector[J]. Solar Energy, 2011, 85(9):2338-2348.
- [13] XIE W, ZHANG Y, GU W, et al. Minimum bending distance based evaluation method for subarea independent power supply capability of smart distribution network[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China: IEEE, 2018:1177-1182.
- [14] 李彦林,王明彦,郑载满. 基于谐振控制的微电网储能变流器多目标控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):22-27.
LI Yanlin, WANG Mingyan, ZHENG Zaiman. Multi-objective control based on resonant control for microgrid energy storage converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):22-27.
- [15] 魏承志,陈晶,涂春鸣,等. 基于储能装置与静止无功发生器协同控制策略的微电网电压波动抑制方法[J]. 电网技术,2012,36(11):18-24.
WEI Chengzhi, CHEN Jing, TU Chunming, et al. An approach to suppress voltage fluctuation in microgrid by cooperative control by energy storage device and static var generator[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):18-24.
- [16] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术,2010,34(10):140-146.
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10):140-146.
- [17] SCATTOLINI R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control—a review[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(5):723-731.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 分布式电源并网运行控制规范:GB/T 33592—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [19] 宋越,程浩忠,张健,等. 基于多目标模块度的多层次电压控制分区方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):153-158,164.
SONG Yue, CHENG Haozhong, ZHANG Jian, et al. Multi-level voltage control partitioning based on multi-objective modularity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):153-158,164.

- [20] GALBALLY J, GALBALLY D. A pattern recognition approach based on DTW for automatic transient identification in nuclear power plants[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 81: 287-300.
- [21] JEONG Y S, JEONG M K, OMITAOMU O A. Weighted dynamic time warping for time series classification[J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(9): 2231-2240.

作者简介:

周金辉(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,博



周金辉

士,主要研究方向为分布式电源并网、微电网和主动配电网等(E-mail: zhoujinhui_hz@163.com);

柳伟(1985—),男,江苏南京人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为配电网无功电压评估预测、分布式协同控制、复杂配电网实时仿真、人工智能在电力系统中的应用等(E-mail: wliu@njjust.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Voltage operating state assessment of active distribution network based on fuzzy dynamic time warping algorithm

ZHOU Jinhui¹, YAN Jianfeng², WANG Ziling¹, LIU Wei²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The voltage operating state assessment of ADN (Active Distribution Network) can effectively integrate multi-source heterogeneous data generated by operation and characterize voltage operating state of ADN. In order to objectively reflect the voltage control ability of critical nodes, reactive power interaction supporting of interconnected partitions and reactive power balance level of the global distribution network, a multi-particle scale evaluation index system of “node-partition-network” is constructed. The FDTW (Fuzzy Dynamic Time Warping) evaluation algorithm based on fuzzy recognition and dynamic time warping is proposed to transform the voltage operating state assessment problem into the fuzzy sequence pattern recognition problem, and the minimum bending distance is used to compare the similarity between the unevaluated and reference samples. The effectiveness of the proposed index system and FDTW evaluation method is verified by an actual example of ADN.

Key words: active distribution network; node-partition-network; multi-particle scale; fuzzy dynamic time warping algorithm; voltage operating state assessment

(上接第40页 continued from page 40)

Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic

ZHU Gelan¹, LI Songyi¹, LAN Jinchen¹, ZENG Dehui¹, LIU Yinliang²

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510063, China)

Abstract: The existing fault section location methods of distribution network have been found with poor adaptability to different grounding faults, low sensitivity and other problems, aiming at which, the characteristics of zero-sequence current and zero-sequence voltage transient components at upstream and downstream of the fault point under different transition resistances when a grounding fault occurs in the resonance grounding distribution network are analyzed. It is concluded that the ratio between the integral of the zero-sequence current within a power frequency period and the zero-sequence voltage, i.e. the zero-sequence characteristic, at the upstream of the fault point is significantly different from that at the downstream of the fault point. Based on this conclusion, a fault section location method that can be used in resonance grounding distribution network is proposed. The simulative results show that the proposed fault section location method is feasible for high-resistance grounding fault, low-resistance grounding fault and nonlinear arc grounding fault.

Key words: distribution network; fault section location; resonant grounding; zero-sequence characteristic; distribution automation

附录:

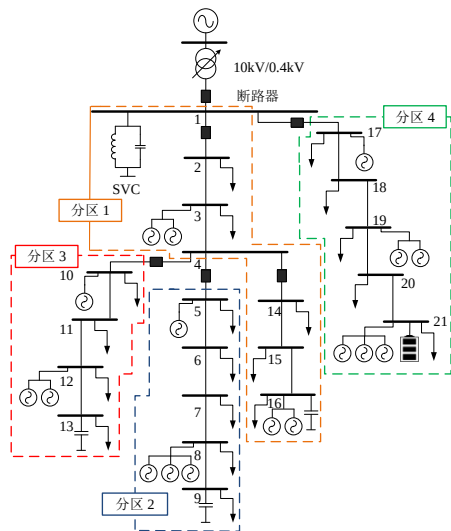


图 A1 主动配电网拓扑结构
Fig.A1 Topology of ADN

表 A1 分布式电源安装容量 Table A1 Installed capacity of distributed generators			
节点	光伏安装容量/kW	节点	光伏安装容量/kW
3	20.25	12	18.25
5	12.75	17	11.50
8	33.50	19	21.00
10	10.75	21	27.75

表 A2 储能装置相关参数 Table A2 Related parameters of energy storage device	
参数	参数值
额定容量/ (kW h)	50
荷电状态/%	5~95
功率因数	≥0.95
能量转化效率/%	95
最小充电功率/%	12.5
最大充电功率/%	80
最小放电功率/%	0
最大放电功率/%	100

表 A3 电容器组相关参数 Table A3 Related parameters of capacitor bank				
节点	额定容量/kvar	分组容量比	投入阈值	切除阈值
9	45	1:2:4:8	0.4	0.8
13	20	1:1:1:1	0.4	0.8
16	30	1:2:4:8	0.4	0.8

注：投入阈值、切除阈值为标么值。

表 A4 指标的参考样本

Table A4 Reference samples of indicators

指标		参考样本 1	参考样本 2	参考样本 3	参考样本 4
点	K_{QM}	0.900 0	0.800 0	0.500 0	0
	K_{PF}	1	0.7459	0.4935	0.2443
	K_{AU}	0.8607	0.7408	0.6376	0
区	P_{QB}	1	0.8187	0.6703	0.1353
	P_{IC}	1	0.8187	0.6703	0.1353
	P_{VA}	1	0.950 0	0.930 0	0.900 0
	P_{PF}	1	0.950 0	0.900 0	0.850 0
网	D_{QB}	1	0.8187	0.6703	0.1353
	D_{VA}	1	0.950 0	0.930 0	0.900 0
	D_{PF}	1	0.950 0	0.900 0	0.850 0

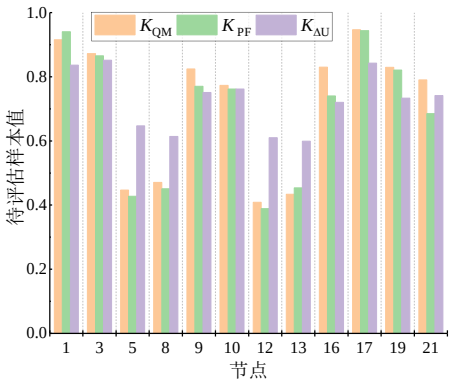


图 A2 节点的待评估样本

Fig.A2 Unevaluated samples of nodes

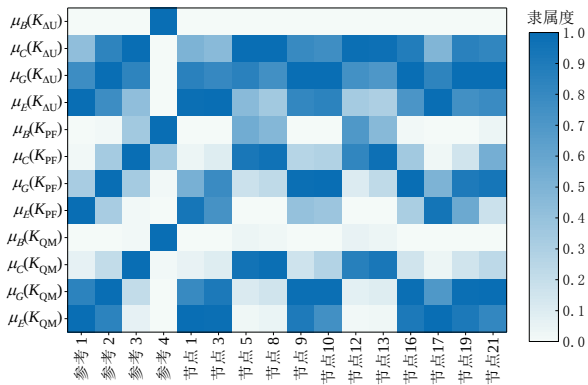


图 A3 节点样本的模糊隶属度

Fig.A3 Fuzzy membership of node samples

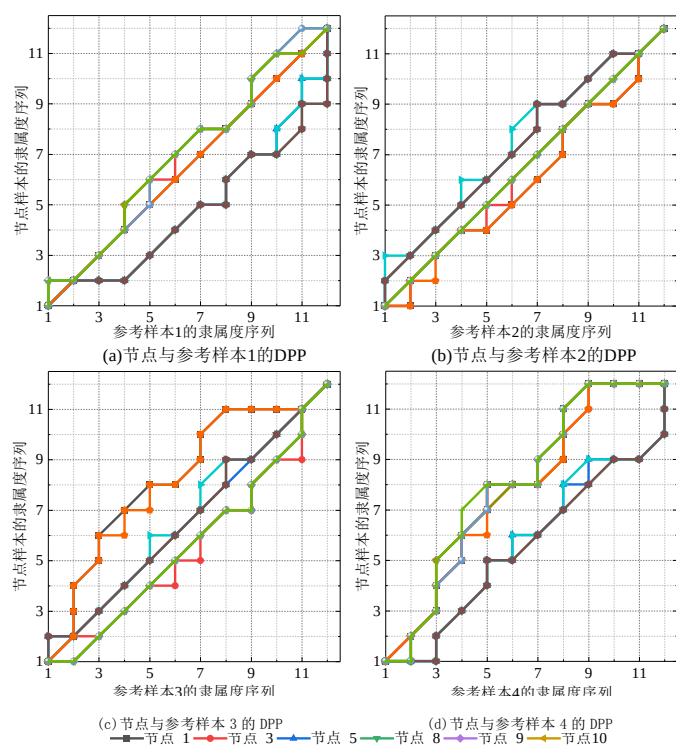


Fig.A4 DPP of samples for nodes

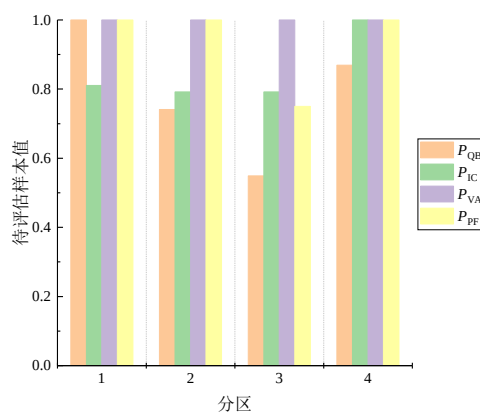


Fig.A5 Value of unevaluated samples for partitions

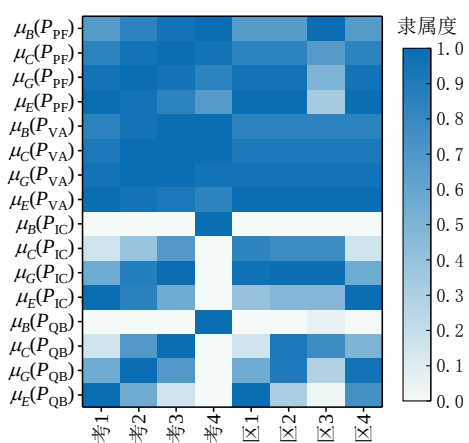


图 A6 分区样本的模糊隶属度
Fig.A6 Fuzzy membership of partitions

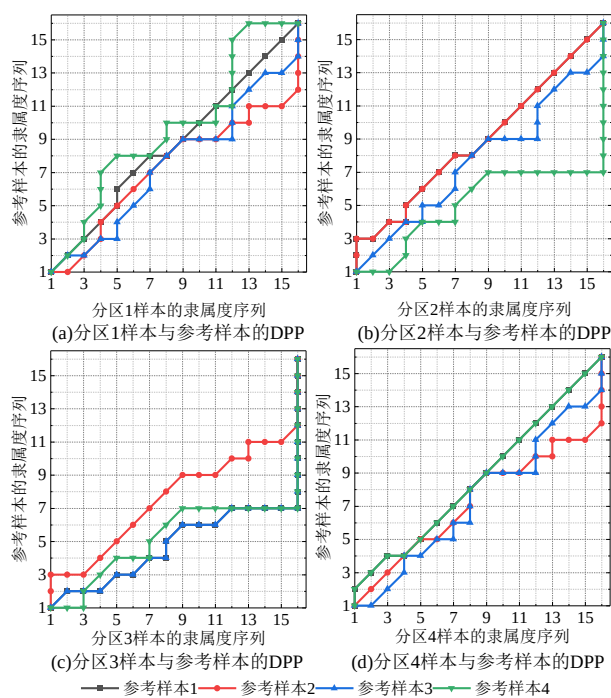


图 A7 分区样本动态路径规划
Fig.A7 DPP of samples for partitions

表 A5 配电网待评估样本
Table A5 Value of unevaluated samples for ADN

指标	D_{QB}	D_{VA}	D_{PF}
待评估样本值	0.8106	1	0.9524

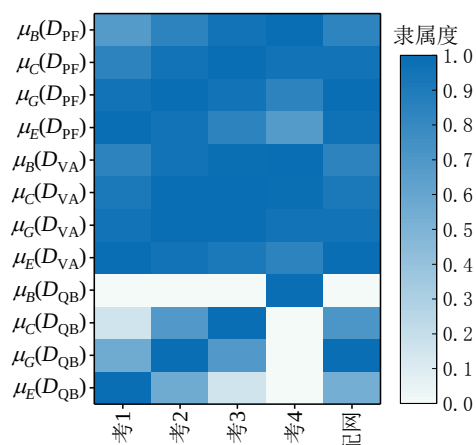


图 A8 配电网样本模糊隶属度

Fig.A8 Fuzzy membership of ADN samples

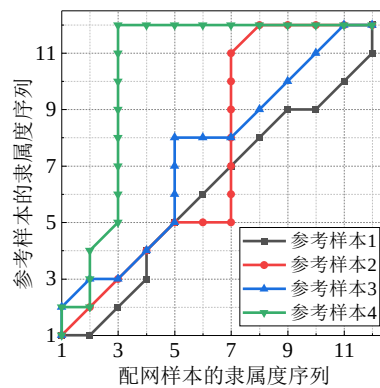


图 A9 配电网样本动态路径规划

Fig.A9 DPP of samples for ADN