

考虑荷储动态特性时序降维的配电网剩余供电能力评估

刘真¹, 赵健¹, 管敏渊², 王小宇¹, 吴刚勇^{2,3}, 吴国强²

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313000;
3. 浙江泰仑电力集团有限责任公司, 浙江 湖州 313000)

摘要:随着储能和分布式能源渗透率的不断提高, 剩余供电能力评估亟需考虑储能调节和分布式能源的动态特性, 为此, 提出一种考虑荷储动态特性时序降维分析的剩余供电能力评估方法。采用模糊C均值聚类技术建立负荷动态时序聚类模型, 并对储能的动态特性进行建模分析; 通过定义工作点时间断面的降维提取方法, 将含荷储时序特性的二维动态配电网转换为以聚类中心负荷峰值时刻的负荷集合表示负荷状态的一维静态剩余供电能力评估问题; 基于现有的剩余供电能力评估模型建立含多工作点时间断面剩余供电能力的安全边界, 进而准确计算配电网的剩余供电能力, 同时考虑新增用户负荷差异化影响, 并以剩余供电能力系数进行修正。算例分析验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词: 剩余供电能力; 负荷聚类; 储能系统; 时序降维; 多工作点时间断面安全边界

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202110020

0 引言

剩余供电能力 RSC (Residue Supply Capability) 是指在现有负荷不减少的前提下配电网可利用的供电潜力, 是指导配电网规划与运行的重要指标^[1]。在配电网规划与运行方面, 由于土地资源紧张, 变电站选址和线路走廊的识别与扩建受到限制^[2], 因此充分利用现有资源、挖掘配电网剩余供电潜力受到了越来越多的关注。此外, 随着现有用户用电需求的不断增大、新增用户的大量涌入以及大规模电池储能系统接入配电网, 网络拓扑结构日趋复杂, 因此, 剩余供电能力的评估需要同步适用于含储能的多类型负荷动态配电网。

对于供电能力评估, 基于不同的需求和场景, 国内外学者已开展了许多关键性的研究工作。文献[3-4]基于配电网高峰负荷时刻主变 $N-1$ 安全准则, 得到配电网供电能力的优化模型和 $N-1$ 安全校验方法。在此基础上, 文献[5]考虑馈线 $N-1$ 安全准则, 抓住配电网负荷转移的主要特点, 使得计算结果可精确到馈线层面。文献[6]基于分时电价, 根据不同需求响应的实施机制, 建立配电网供电可靠性影响分析模型。文献[7-8]为完整描述不同负荷分布下系统的最大供电能力范围, 提出安全边界供电能力

的定义, 为智能配电网规划方案提供了更准确的参考。文献[9]采用传统连续潮流算法, 通过对分布式电源的详细建模进行多场景优化, 提高了供电能力评估的准确性。文献[10]利用优化模型调整分布式能源的运行方式, 以实现供电能力最大。文献[2, 11-12]结合馈线分区的理念, 构建以供电能力最大为目标、供电可靠性为主要约束的数学模型。文献[13]在满足主变和馈线 $N-1$ 安全准则的基础上, 得到剩余供电能力的计算方法。然而对于计及 $N-1$ 安全准则的剩余供电能力评估, 需要在配电网负荷高峰一维时间断面上刚性满足 $N-1$ 安全校验^[2, 12], 因此对具有二维时序特性的储能元件需要进行特殊的处理和转化。此外, 上述研究较少计及负荷时序特征, 忽略了配电网与单元馈线高峰负荷时刻不同步的问题, 在大量同性质的用户负荷集中接入某一馈线时, 会出现在馈线负荷高峰时刻触及安全边界极限^[14]、危及系统运行可靠性的问题。

为此, 本文首先采用模糊C均值(FCM)聚类算法, 根据同行业用电负荷的内在相似性建立负荷时序特性聚类模型, 并分析储能的动态特性; 然后定义工作点时间断面的降维提取方法, 据此将动态配电网转化为多工作点时间断面配电网, 并以每个聚类中心负荷峰值时刻为依据, 降维提取原量测数据中同一时间断面的负荷集合, 建立剩余供电能力安全边界, 以同时满足每个安全边界的负荷增量集合作为剩余供电能力计算结果; 最后, 提出面向不同新增用户的剩余供电能力修正系数计算方法, 并通过算例验证本文方法的可行性与有效性。

1 荷储动态网络的时序降维模型

1.1 负荷动态时序特性聚类模型

本文采用FCM聚类算法对节点有功量测数据

收稿日期: 2020-11-19; 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51907114); 上海市科学技术委员会“扬帆计划”项目(19YF1416900); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”项目(18SG50)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907114), the Sailing Program of Shanghai Science and Technology Commission(19YF1416900) and the Shuangguang Program of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission(18SG50)

按不同行业负荷用电特性进行聚类,将具有相似特征的样本数据划分为同一类型^[15-16],并建立该类型负荷的时序特性聚类模型。

由配电网用电信息采集系统可得到各馈线出口处的日负荷数据,本文将 t 时刻第 n 条馈线出口处的有功量测数据记为 $P_{n,t}^0 (t=1, 2, \dots, T), T=24$ 为总时刻数。首先对有功量测数据 $P_{n,t}^0$ 进行归一化处理,选取馈线日负荷曲线的最大值 P_n^{\max} 作为标准化因子,则有:

$$P_{n,t}^{\text{nor}} = P_{n,t}^0 / P_n^{\max} \quad (1)$$

式中: $P_{n,t}^{\text{nor}}$ 为归一化后的 t 时刻第 n 条馈线的负荷。则第 n 条馈线的负荷 P_n^{nor} 是一个 T 维向量, $P_n^{\text{nor}} = [P_{n,1}^{\text{nor}}, P_{n,2}^{\text{nor}}, \dots, P_{n,T}^{\text{nor}}]$,所有馈线的负荷样本 $P^{\text{nor}} = [P_1^{\text{nor}}, P_2^{\text{nor}}, \dots, P_N^{\text{nor}}]^T, N$ 为馈线总数。

将 P^{nor} 分为 $J (2 \leq J \leq N)$ 类,对应的聚类中心 $P^{\text{cen}} = [P_1^{\text{cen}}, P_2^{\text{cen}}, \dots, P_J^{\text{cen}}]^T, P_j^{\text{cen}}$ 为第 $j (j=1, 2, \dots, J)$ 个聚类中心。然后,以数据样本到聚类中心的加权平方距离最小为优化目标^[17-18],经过迭代计算,不断修正非中心及边界样本的隶属度矩阵,直到符合迭代终止条件,最终由样本的隶属度矩阵判定其归属的类别,如式(2)~(5)所示。

$$\min J_w = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J u_{jn}^2 \|P_n^{\text{nor}} - P_j^{\text{cen}}\|^2 \quad (2)$$

$$d_{jn} = \|P_n^{\text{nor}} - P_j^{\text{cen}}\|^2 \quad (3)$$

$$P_j^{\text{cen}} = \left(\sum_{n=1}^N u_{jn}^2 P_n^{\text{nor}} \right) / \sum_{n=1}^N u_{jn}^2 \quad (4)$$

$$u_{jn} = \left(\sum_{k=1}^J \frac{d_{kn}}{d_{jn}} \right)^{-2} \quad (5)$$

式中: J_w 为聚类算法的目标函数; u_{jn} 为第 n 条馈线的负荷样本关于第 j 个聚类中心的隶属度,所有隶属度组成隶属度矩阵; d_{jn} 为第 n 条馈线的负荷状态向量到第 j 个聚类中心 P_j^{cen} 的欧氏距离。

最后,选择隶属度最大的有功量测数据,以聚类中心 P^{cen} 表示负荷动态时序特性聚类模型:

$$P^{\text{cen}} = \begin{bmatrix} P_{1,1}^{\text{cen}} & P_{1,2}^{\text{cen}} & \dots & P_{1,T}^{\text{cen}} \\ P_{2,1}^{\text{cen}} & P_{2,2}^{\text{cen}} & \dots & P_{2,T}^{\text{cen}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{J,1}^{\text{cen}} & P_{J,2}^{\text{cen}} & \dots & P_{J,T}^{\text{cen}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $P_{j,t}^{\text{cen}} (j=1, 2, \dots, J; t=1, 2, \dots, T)$ 为 t 时刻第 j 个聚类中心的样本负荷状态。

1.2 储能动态特性模型

储能系统的剩余容量随时间动态变化,在单位时间 Δt (本文统一以 $\Delta t=1 \text{ h}$ 为基本步长)内的动态变化过程可由式(7)表示。

$$E_{e,t} = E_{e,t-1} + (\eta^c P_{e,t}^c - P_{e,t}^{\text{dc}} / \eta^{\text{dc}}) \Delta t \quad (7)$$

$$P_{e,t} = \eta^c P_{e,t}^c - P_{e,t}^{\text{dc}} / \eta^{\text{dc}} \quad (8)$$

式中: $E_{e,t}$ 为 t 时刻储能系统 e 的剩余容量; η^c, η^{dc} 分别为储能系统的充、放电效率; $P_{e,t}^c, P_{e,t}^{\text{dc}}$ 分别为 t 时刻储能系统 e 的充、放电功率; $P_{e,t}$ 为 t 时刻储能系统 e 的功率变化值,充电时其值为正,放电时其值为负。

t 时刻储能系统 e 的剩余容量应该约束在安全容量裕度之内,如式(9)所示;同理,充、放电功率也应该约束在合理的操作范围之内,如式(10)所示。

$$E_e^{\min} \leq E_{e,t} \leq E_e^{\max} \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{e,t}^c \leq P_e^{\text{c,max}} u_{e,t}^c \\ 0 \leq P_{e,t}^{\text{dc}} \leq P_e^{\text{dc,max}} (1 - u_{e,t}^c) \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_e^{\min}, E_e^{\max} 分别为储能系统 e 的最小、最大安全容量; $P_e^{\text{c,max}}, P_e^{\text{dc,max}}$ 分别为储能系统 e 充、放电功率的最大值; $u_{e,t}^c$ 为一个二进制指示器,用于避免储能系统同时进行充、放电动作,其值为1表示 t 时刻储能系统 e 处于充电状态。

1.3 时序降维模型

通过1.2节对储能系统动态特性的建模可知,储能系统的剩余容量和充、放电功率随时间动态变化,将充、放电功率等效为负荷,并将其累加到原有日负荷数据上作为实时净负荷。为便于表示配电网负荷峰值时刻与各馈线负荷峰值时刻负荷的不同,将各馈线实时净负荷曲线在同一时间断面下的负荷集合称为工作点^[19],将其用于描述配电网在某一时刻所有馈线出口处的负荷水平。

配电网中的馈线数量较多,考虑每条馈线会加重计算负担,而以聚类中心负荷峰值时刻断面为代表,既可减小计算工作量又可保证计算的准确性。此外,为满足配电网负荷峰值时刻 $N-1$ 安全校验的刚性约束条件,本文将配电网负荷峰值时刻记为 t_0 ,将第 $j (j=1, 2, \dots, J)$ 个聚类中心负荷峰值时刻记为 t_j ,建立负荷工作点时间断面。定义 $G_j(x)$ 表示在二维时序集合 x 中提取 t_j 时刻对应的元素,如式(11)所示。

$$\begin{cases} P'_{n,j} = G_j(P_{\text{NT}} + P_{\text{ET}}) \\ E'_{e,j} = G_j(E_{\text{ET}}) \end{cases} \quad j=0, 1, \dots, J; n=1, 2, \dots, N; e=1, 2, \dots, E \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{\text{NT}} = \{P_{n,1}^0, P_{n,2}^0, \dots, P_{n,T}^0\} & n=1, 2, \dots, N \\ P_{\text{ET}} = \{P_{e,1}, P_{e,2}, \dots, P_{e,T}\} & e=1, 2, \dots, E \\ E_{\text{ET}} = \{E_{e,1}, E_{e,2}, \dots, E_{e,T}\} & e=1, 2, \dots, E \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P'_{n,j}$ 为降维提取后 t_j 时刻对应的第 n 条馈线的负荷; $E'_{e,j}$ 为降维提取后 t_j 时刻对应的储能系统 e 的剩余容量; P_{NT} 为负荷量测数据集合, P_{ET} 为储能系统充、放电功率集合, $P_{\text{NT}} + P_{\text{ET}}$ 为待评估配电网的实时净负荷集合; E_{ET} 为储能系统剩余容量集合; E 为储能系统的总数。经 $J+1$ 次提取操作后,可获得多工作点时间断面负荷集合 P_{NJ} 和储能系统剩余容量集合 E_{EJ} 分别为:

$$\begin{cases} P_{Nj} = \{P'_0, P'_{1j}, \dots, P'_{Nj}\} \\ P'_0 = \{P'_{1,0}, P'_{2,0}, \dots, P'_{N,0}\} \\ P'_j = \{P'_{1,j}, P'_{2,j}, \dots, P'_{N,j}\} \quad j=1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_{Ej} = \{E'_0, E'_{1j}, \dots, E'_{Nj}\} \\ E'_0 = \{E'_{1,0}, E'_{2,0}, \dots, E'_{E,0}\} \\ E'_j = \{E'_{1,j}, E'_{2,j}, \dots, E'_{E,j}\} \quad j=1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (14)$$

式中： P'_0 为各馈线在配电网负荷峰值时刻的负荷集合，记为工作点0； P'_j 为各馈线在第 j 个聚类中心负荷峰值时刻 t_j 的负荷集合，记为工作点 j ； E'_0 为对应工作点0的储能系统剩余容量集合； E'_j 为对应工作点 j 的储能系统剩余容量集合。

2 多工作点时间断面剩余供电能力安全边界模型

本文将配电网能够安全运行的所有负荷增量的集合称为安全边界，所有安全边界的交集决定了剩余供电能力的安全域，剩余供电能力位于安全域边界上。结合上述多工作点时间断面的概念和储能系统对配电网剩余供电能力评估的影响，根据现有剩余供电能力模型，以各馈线负荷增量之和最大为目标函数，得到多工作点时间断面的剩余供电能力安全边界模型如式(15)、(16)所示。

$$F = \max \sum_{n=1}^N \Delta P_{n,j} \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t. } \Delta P_{n,j} \leq \min \left\{ S_{m,j} + \sum_{e \in m} E'_{e,j} - (P'_{m,j} + \Delta P_{m,j}), \right. \\ \quad R_{i,j} + \sum_{e \in T_i} E'_{e,j} - \sum_{r \in T_i} (P'_{r,j} + \Delta P_{r,j}) - \\ \quad \left. \sum_{k \in T_i, k \neq n} (P'_{k,j} + \Delta P_{k,j}) \right\} - P'_{n,j} \\ E'_{e,j} = G_j(E_{e,t}) \\ (P'_{n,j}, P'_{m,j}, P'_{r,j}, P'_{k,j}) = G_j(P_{n,t}, P_{m,t}, P_{r,t}, P_{k,t}) \\ P_{n,t} = P_{n,t}^0 + \sum_{e \in n} P_{e,t}, P_{m,t} = P_{m,t}^0 + \sum_{e \in m} P_{e,t} \\ P_{r,t} = P_{r,t}^0 + \sum_{e \in r} P_{e,t}, P_{k,t} = P_{k,t}^0 + \sum_{e \in k} P_{e,t} \\ \text{式(7)—(10)} \\ \Delta P_{n,j} \geq 0 \quad n=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, J \end{array} \right. \quad (16)$$

式中： F 为待评估配电网的最大剩余供电能力； $\Delta P_{n,j}$ 为第 n 条馈线在工作点 j 的负荷增量； $S_{m,j}$ 为第 m 条馈线在工作点 j 的最大传输容量，第 m 条馈线是与第 n 条馈线有直接联络关系的对侧馈线； $e \in m$ 表示储能系统 e 在第 m 条馈线处接入配电网； $P'_{m,j}$ 为第 m 条馈线在工作点 j 的实时净负荷； $\Delta P_{m,j}$ 为第 m 条馈线在工作点 j 的负荷增量； $R_{i,j}$ 为主变 T_i 在工作点 j 的

额定容量，主变 T_i 为第 m 条馈线所在的主变； $e \in T_i$ 表示储能系统 e 接在主变 T_i 的出线范围内； $P'_{r,j}$ 为第 r 条馈线在工作点 j 的实时净负荷，第 r 条馈线为主变 T_i 上除第 m 条馈线之外的馈线； $\Delta P_{r,j}$ 为第 r 条馈线在工作点 j 的负荷增量； $r \in T_i$ 表示第 r 条馈线接在主变 T_i 的出线范围内； $P'_{k,j}$ 为第 k 条馈线在工作点 j 的实时净负荷，第 k 条馈线为第 n 条馈线所在主变发生故障后可能转带负荷给主变 T_i 的馈线； $\Delta P_{k,j}$ 为第 k 条馈线在工作点 j 的负荷增量； $k \in T_i, k \neq n$ 表示第 k 条馈线接在第 n 条馈线所在主变 T_i 的出线范围内，且第 k 条馈线不是第 n 条馈线。 $S_{m,j} + \sum_{e \in m} E'_{e,j} - (P'_{m,j} + \Delta P_{m,j})$

表示第 n 条馈线在工作点 j 因故障而发生负荷转带时对侧第 m 条馈线的剩余容量； $R_{i,j} + \sum_{e \in T_i} E'_{e,j} -$

$\sum_{r \in T_i} (P'_{r,j} + \Delta P_{r,j}) - \sum_{k \in T_i, k \neq n} (P'_{k,j} + \Delta P_{k,j})$ 表示第 n 条馈线在

工作点 j 因所在主变故障而发生负荷转带时对侧主变 T_i 的剩余容量； $E'_{e,j} = G_j(E_{e,t})$ 表示降维提取储能系统在工作点 j 的剩余容量； $(P'_{n,j}, P'_{m,j}, P'_{r,j}, P'_{k,j}) = G_j(P_{n,t}, P_{m,t}, P_{r,t}, P_{k,t})$ 表示降维提取相应馈线实时净负荷集合在工作点 j 的负荷。

为直观展示所提多工作点时间断面剩余供电能力安全边界模型，本文基于附录A图A1所示的简单配电网对馈线 F_1 进行建模分析，如附录A式(A1)所示。

3 配电网剩余供电能力修正计算

3.1 配电网剩余供电能力

通过剩余供电能力安全边界模型计算不同工作点的安全边界，结果用矩阵 B 表示，如式(17)所示。

$$B = \begin{bmatrix} \Delta P_{1,0} & \Delta P_{1,1} & \dots & \Delta P_{1,J} \\ \Delta P_{2,0} & \Delta P_{2,1} & \dots & \Delta P_{2,J} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta P_{N,0} & \Delta P_{N,1} & \dots & \Delta P_{N,J} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $\Delta P_{n,0}$ ($n=1, 2, \dots, N$)为第 n 条馈线在工作点0的负荷增量。

在上述剩余供电能力模型中，每个工作点对应的负荷增量为一组安全边界，工作点 j 的安全边界可表示为 $B_j = [\Delta P_{1,j}; \Delta P_{2,j}; \dots; \Delta P_{N,j}]$ 。为了在满足 $N-1$ 安全准则的前提下，避免因未考虑用户负荷时序特性而出现过载现象，对所有工作点的安全边界取交集来决定剩余供电能力的安全域。

$$\Delta P_n = \min \{ \Delta P_{n,0}, \Delta P_{n,1}, \dots, \Delta P_{n,j}, \dots, \Delta P_{n,J} \} \quad n=1, 2, \dots, N \quad (18)$$

$$\Delta P = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n, \dots, \Delta P_N] \quad (19)$$

式中： $\{ \Delta P_{n,0}, \Delta P_{n,1}, \dots, \Delta P_{n,j}, \dots, \Delta P_{n,J} \}$ 为第 n 条馈线的安全边界集合； ΔP_n 为第 n 条馈线的剩余供电能力。式(19)表示配电网中各馈线剩余供电能力的安

全域边界,即剩余供电能力。

综上,考虑荷储动态特性时序降维分析的剩余供电能力评估总体流程如图 1 所示。

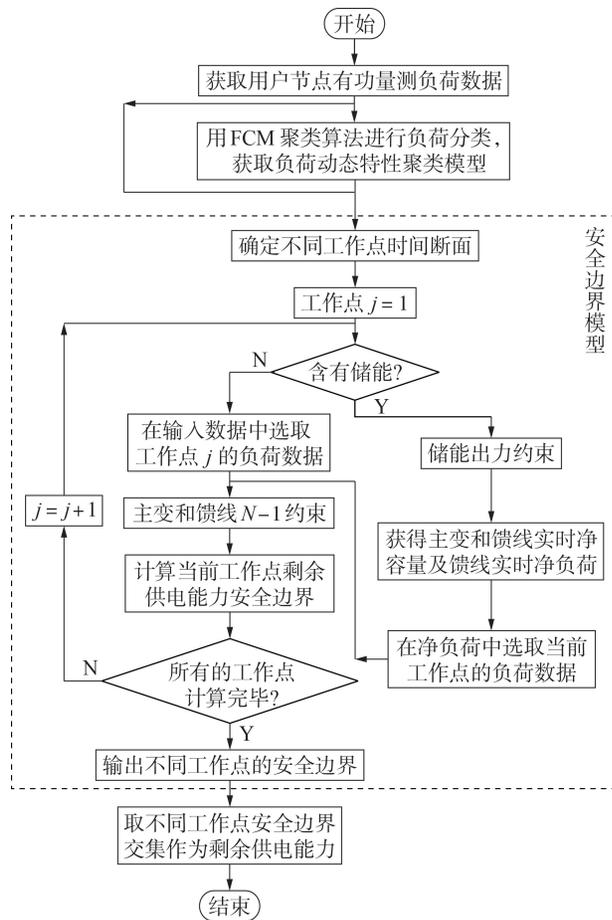


图 1 本文剩余供电能力评估流程

Fig.1 Flowchart of proposed RSC assessment

3.2 剩余供电能力修正系数

当新用户接入时,由于不同类型用户的用电特性存在差异,简单以同一剩余供电能力指导不同类型用户在峰值时刻接入配电网的负荷大小,忽略用户因自身生产生活需求而出现的负荷波动,在大量同性质负荷集中接入同一馈线时会使负荷峰谷差增大,设备利用率降低,新增用户在用电峰值时刻容易触及安全容量边界。为此,本文提出修正系数的概念,以均衡负荷峰值时刻存在差异的问题。

$$\xi_j = P_{j,t_0}^{cen} / P_{j,t_j}^{cen} \quad (20)$$

式中: ξ_j 为 j 类型新增用户的剩余供电能力修正系数; P_{j,t_0}^{cen} 为 j 类型新增用户在配电网峰值时刻 t_0 的负荷; P_{j,t_j}^{cen} 为 j 类型新增用户在 t_j 时刻的负荷。

4 算例分析

4.1 算例基本情况

图 2 为配电网算例示意图,共包含 6 台主变、11 条馈线出线以及 14 条馈线或馈线段(分别记为馈线

$F_1 \sim F_{14}$),馈线允许传输容量均为 $11.3 \text{ MV}\cdot\text{A}$,主变额定容量均为 $40 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。接入配电网的储能系统主要参数如表 1 所示,储能初始状态和容量的选择影响剩余供电能力的评估结果,基于用户侧储能的实际工程,将储能容量 S_{ess} 设为 $2 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 。合理的初始状态能最大化利用储能的削峰填谷作用,为有效提高负荷曲线平滑度,保证系统可靠运行,将储能的初始状态 E_0 设为总容量的 40%。为验证本文方法的有效性,对 3 种方案的计算结果进行对比分析:方案 1,以本文方法计算剩余供电能力,仅考虑负荷时序特性;方案 2,以本文方法计算剩余供电能力,同时考虑荷储时序特性;方案 3,以传统方法计算剩余供电能力。

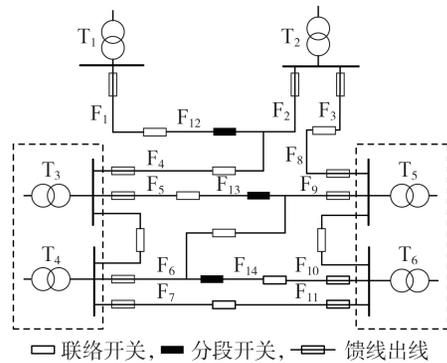


图 2 配电网算例示意图

Fig.2 Schematic diagram of distribution network case

表 1 储能系统相关参数

Table 1 Related parameters of energy storage system

参数	取值	参数	取值
S_{ess}	$2 \text{ MW}\cdot\text{h}$	η^{dc}	90%
$P_e^{\text{c,max}}$	700 kW	E_0	$0.4S_{\text{ess}}$
$P_e^{\text{dc,max}}$	500 kW	E_e^{min}	$0.2S_{\text{ess}}$
η^{c}	90%	E_e^{max}	$0.8S_{\text{ess}}$

4.2 剩余供电能力计算与分析

4.2.1 负荷动态特性聚类建模结果

将图 2 算例中的有功量测数据进行归类整理,对负荷数据进行归一化处理,使用 FCM 聚类算法按负荷相似性对负荷进行分类,结果如表 2 所示。以聚类中心作为负荷的动态特性聚类模型,以标么值表示的时序特征参数如图 3 所示。

由表 2 可知,通过 FCM 聚类算法将配电网负荷数据分为 3 类,即 $J=3$,因此在算例计算时需考虑 3 个聚类中心负荷峰值时刻的时间断面和 1 个配电网

表 2 负荷分类结果

Table 2 Load classification results

负荷类型	馈线
1	$F_1, F_2, F_6, F_7, F_{11}, F_{12}$
2	F_3, F_4, F_{10}, F_{13}
3	F_5, F_8, F_9, F_{14}

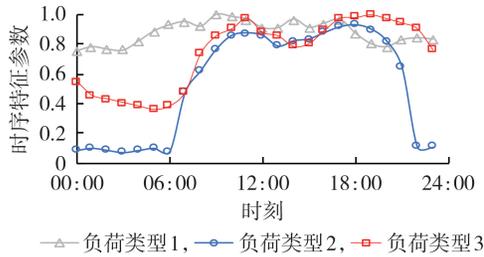


图3 聚类中心负荷动态特性曲线

Fig.3 Dynamic characteristic curves of clustering center load

负荷峰值时刻的时间断面共4个工作点的时间断面。根据有功量测负荷数据和聚类中心负荷动态特性 P^{cen} , 可确定工作点0的时间断面 $t_0=18:00$, 工作点1的时间断面 $t_1=10:00$, 工作点2的时间断面 $t_2=19:00$, 工作点3的时间断面 $t_3=20:00$ 。在原始负荷量测数据中降维提取4个工作点时间断面的负荷集合, 构成多工作点时间断面集合。

4.2.2 方案1和方案2的计算结果对比分析

对于方案2中含储能系统接入的剩余供电能力计算, 本文研究在3种不同类型馈线 F_3 、 F_5 、 F_6 上分别接入储能系统。首先, 对于含储能系统的馈线负荷, 需在馈线原有负荷的基础上累加储能随时间变化的充、放电功率, 将其作为馈线实时净负荷, 同时累加储能的实时剩余容量作为实时净容量。然后, 根据负荷动态特性聚类模型, 通过 $G_j(x)$ 经多次降维提取获得计及储能系统的多工作点时间断面负荷矩阵, 由剩余供电能力安全边界模型计算不同工作点的安全边界, 并由式(19)取不同工作点安全边界的共同交集作为剩余供电能力安全域, 将安全域边界记为配电网剩余供电能力。2种方案下的安全域示意图及剩余供电能力计算结果分别如图4和表3所示。

图4中不同工作点安全边界交集的阴影部分表示配电网中各馈线或馈线段的剩余供电能力安全域。随着储能系统的接入, 方案2安全域的面积相较于不含储能系统的方案1明显增大, 验证了储能系统能够提高配电网剩余供电能力。从表3可看出, 方案2下, 在安装了储能系统的馈线 F_3 、 F_5 、 F_6 上, 剩余供电能力有明显提高, 同时馈线 F_8 — F_{10} 、 F_{13} 、 F_{14} 的剩余供电能力也有不同程度的提高。结合图2可知: 馈线 F_3 与馈线 F_8 , 馈线 F_5 与馈线 F_9 、馈线 F_{13} , 馈线 F_6 与馈线 F_{10} 、馈线 F_{14} 均是具有直接关联的馈线或馈线段, 因此储能系统的接入不仅会影响其所在馈线, 同时也会提高与其所在馈线有直接关联的馈线或馈线段的剩余供电能力。

4.2.3 方案2和方案3计算结果对比分析

分别在方案2与方案3下计算配电网算例的剩余供电能力, 结果见表4。在此基础上, 在不改变原有负荷的基础上, 计算不同类型新增用户在配电网负

荷峰值时刻的负荷增量, 由式(21)可得本文方法对于不同新增用户的剩余供电能力修正系数 $\xi_1=0.967$ 、 $\xi_2=0.985$ 、 $\xi_3=0.976$ 。此外, 根据新增用户所属负荷类型的时序特性, 计算该用户在一天中其他时刻的用电负荷, 以馈线 F_8 为例比较2种方案下新增用户接入后的负荷越限情况, 结果见附录A图A2。

由表4可以看出, 方案2的剩余供电能力计算结果相较于方案3大多偏小, 但由于方案3单纯以配电网负荷峰值时刻全网 $N-1$ 安全为准则, 并未区别考

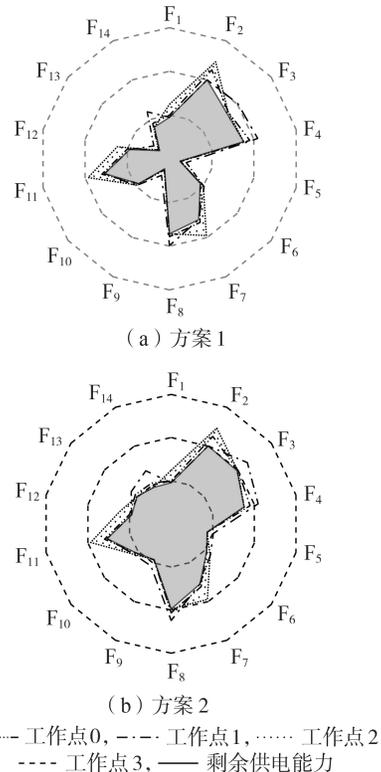


图4 方案1与方案2的安全域示意图

Fig.4 Schematic diagram of security domain for Case 1 and Case 2

表3 方案1与方案2的剩余供电能力结果对比

Table 3 Comparison of RSC results between Case 1 and Case 2

馈线	剩余供电能力 / (MV·A)		方案2较方案1剩余供电能力变化情况
	方案1	方案2	
F ₁	0.950	0.950	不变
F ₂	2.006	2.006	不变
F ₃	1.687	1.977	增大
F ₄	1.755	1.755	不变
F ₅	0.247	0.861	增大
F ₆	0.908	1.062	增大
F ₇	1.551	1.551	不变
F ₈	1.718	1.977	增大
F ₉	0.263	0.920	增大
F ₁₀	0.916	1.072	增大
F ₁₁	1.538	1.538	不变
F ₁₂	0.947	0.947	不变
F ₁₃	0.293	1.022	增大
F ₁₄	0.805	0.940	增大

表 4 方案 1 与方案 3 的剩余供电能力结果对比
Table 4 Comparison of RSC results between Case 1 and Case 3

馈线	剩余供电能力 / (MV·A)	
	方案 2	方案 3
F ₁	0.950	0.999
F ₂	2.006	2.254
F ₃	1.687	1.723
F ₄	1.755	1.898
F ₅	0.247	0.267
F ₆	0.908	0.908
F ₇	1.551	1.617
F ₈	1.718	1.782
F ₉	0.263	0.286
F ₁₀	0.916	0.916
F ₁₁	1.538	1.604
F ₁₂	0.947	0.996
F ₁₃	0.293	0.330
F ₁₄	0.805	0.899

虑不同类型接入用户的负荷时序特性,在新增负荷峰值时刻会出现超出馈线安全容量边界的现象,如附录 A 图 A2(a)所示,3 种不同类型负荷接入时均会出现不同程度的越限,而方案 2 经修正后则不会出现负荷越限。

5 结论

1) 本文合理考虑负荷和储能系统的时序特性,引入工作点时间断面的概念,并将其融入模型约束条件中,以馈线负荷增量最大为目标,储能充、放电功率为变量,在满足主变和馈线 $N-1$ 安全约束的条件下,建立计及荷储时序特性降维分析的多工作点时间断面安全边界模型。

2) 采用 FCM 聚类算法从归一化后的负荷数据中获取负荷动态时序聚类模型,并基于此确定多工作点时间断面负荷集合中工作点的数量和相应时间断面的取值。

3) 考虑新增负荷的时序特性,介绍以本文计算的剩余供电能力指导不同类型新接入用户的修正系数的计算方法。

算例验证了本文所述时序降维分析的剩余供电能力评估方法的可行性和有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 郭焱林,刘俊勇,魏震波,等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):33-43.
GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 33-43.

[2] 刘洪,李吉峰,张家安,等. 考虑可靠性的中压配电系统供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):154-160.
LIU Hong, LI Jifeng, ZHANG Jiaan, et al. Power supply capability evaluation of medium voltage distribution system con-

dering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):154-160.

- [3] 王成山,罗凤章,肖峻,等. 基于主变互联系数的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):86-91.
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [4] 肖峻,贡晓旭,王成山. 配电网最大供电能力与 $N-1$ 安全校验的对比验证[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):86-91.
XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Comparative research between total supply capability and $N-1$ security verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-91.
- [5] 肖峻,谷文卓,贡晓旭,等. 基于馈线互联系数的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):72-77.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [6] 赵洪山,赵航宇,侯杰群,等. 需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):8-14.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu, HOU Jiequn, et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 8-14.
- [7] 孙东雪,王主丁,田园,等. 基于分区分压的配电网供电能力计算实用方法[J]. 电网技术,2020,44(8):3081-3091.
SUN Dongxue, WANG Zhuding, TIAN Yuan, et al. A practical method for calculating power supply capacity of distribution network based on power supply subareas and sub-networks of different voltages[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3081-3091.
- [8] 肖峻,张苗苗,司超然,等. 配电网的供电能力分布[J]. 电网技术,2017,41(10):3326-3335.
XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, SI Chaoran, et al. Supply capability distribution of distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3326-3335.
- [9] 吴万禄,周江昕,余浩斌,等. 含充放储一体化电站的电网供电能力评估[J]. 电网技术,2018,42(4):1266-1273.
WU Wanlu, ZHOU Jiangxin, YU Haobin, et al. Power supply capability evaluation of power grid containing integrated charging-discharging-storage station[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1266-1273.
- [10] 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):9-16.
LIAO Huaqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy generations and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [11] 葛少云,曹雨晨,刘洪,等. 考虑可靠性约束的综合能源微网供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2020,44(7):31-37.
GE Shaoyun, CAO Yuchen, LIU Hong, et al. Evaluation of energy supply capability for multi-energy microgrid considering reliability constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 31-37.
- [12] 葛少云,孙昊,刘洪,等. 考虑可靠性与故障后负荷响应的主动配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):77-84,91.
GE Shaoyun, SUN Hao, LIU Hong, et al. Power supply capability evaluation of active distribution network considering reliability and post-fault load response[J]. Automation of Elec-

- tric Power Systems, 2019, 43(6): 77-84, 91.
- [13] 甄国栋, 高新智, 于树刚, 等. 配电网的剩余供电能力实用模型[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3420-3432.
ZHEN Guodong, GAO Xinzhi, YU Shugang, et al. The practical residue supply capability model of distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3420-3432.
- [14] 骆柏锋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 基于负荷特征库的大用户供电接入决策方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 66-72.
LUO Bofeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Decision method of power supply access for large consumers based on load feature library[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 66-72.
- [15] 王淳, 高元海. 采用最优模糊C均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1682-1691.
WANG Chun, GAO Yuanhai. Dynamic reconfiguration of distribution network based on optimal fuzzy C-means clustering and improved chemical reaction optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1682-1691.
- [16] 董志辉, 林凌雪. 基于改进模糊C均值聚类时段划分的配电网动态重构[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2299-2305.
DONG Zhihui, LIN Lingxue. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved fuzzy C-means clustering of time division[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2299-2305.
- [17] 李国庆, 陆为华, 李赫, 等. 基于模糊C-均值聚类的时序概率潮流快速计算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 116-122.
LI Guoqing, LU Weihua, LI He, et al. Fast calculation method of time sequence probabilistic power flow based on fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 116-122.
- [18] 石亮缘, 周任军, 张武军, 等. 采用深度学习和多维模糊C均值聚类的负荷分类方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7): 43-50.
SHI Liangyuan, ZHOU Renjun, ZHANG Wujun, et al. Load classification method using deep learning and multi-dimensional fuzzy C-means clustering[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7): 43-50.
- [19] 肖峻, 苏步芸, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联系数的配电网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 36-44.
XIAO Jun, SU Buyun, GONG Xiaoxu, et al. Model of distribution system security region based on interconnections of feeders[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 36-44.

作者简介:



刘真

刘真(1996—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划及储能优化(E-mail:liuzhenn@163.com);

赵健(1990—),男,上海人,副教授,博士,主要研究方向为配电网运行与规划、电动汽车接入、人工智能在电网中的应用(E-mail:zhaojianee@foxmail.com);

管敏渊(1985—),男,浙江湖州人,高级工程师,博士,研究方向为模块化多电平换流器和柔性直流输电技术、电力设备试验检修、新能源并网和储能技术(E-mail:hanren@zju.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Residue supply capability assessment of distribution network with time series dimension reduction considering dynamic characteristic of load and energy storage

LIU Zhen¹, ZHAO Jian¹, GUAN Minyuan², WANG Xiaoyu¹, WU Gangyong^{2,3}, WU Guoqiang²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China;

2. Huzhou Power Supply Company of Start Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Huzhou 313000, China;

3. Zhejiang Talent Electric Group Company Limited, Huzhou 313000, China)

Abstract: Along with continuous increasing penetration rate of energy storage and distributed energy, it is urgent to consider the dynamic characteristics of energy storage regulation and distributed energy in residue supply capability assessment, for which, a residue supply capability assessment method with time series dimension reduction analysis considering dynamic characteristic of load and energy storage is proposed. The fuzzy C-means clustering technology is adopted to build a dynamic time series clustering model of load, and the dynamic characteristics of energy storage is modeled and analyzed. By defining the dimension reduction extraction method of working point time section, the two-dimensional dynamic distribution network with time series characteristic of load and energy storage is transformed into a one-dimensional static residue supply capability assessment problem with load status expressed by load set at peak time of clustering center load. A safety boundary with residue supply capability of multi-working point time section is built based on current model of residue supply capability assessment, further the residue supply capability of distribution network is accurately calculated, meanwhile the impact of load difference of new-added users is considered and corrected by residue supply capability coefficient. Case analysis verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: residue supply capability; load clustering; energy storage system; time series dimension reduction; multi-working point time section safety boundary

附录 A:

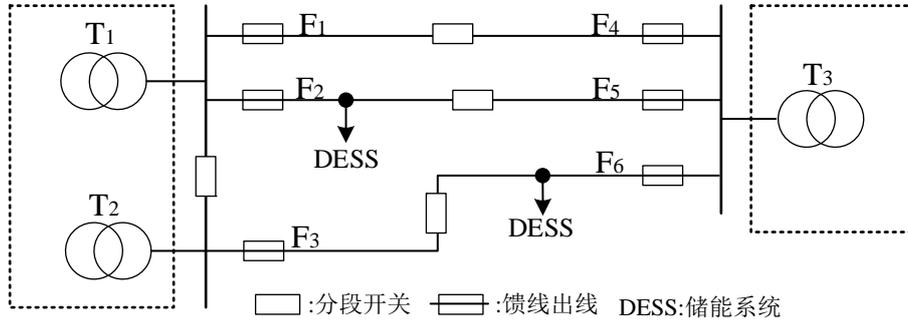


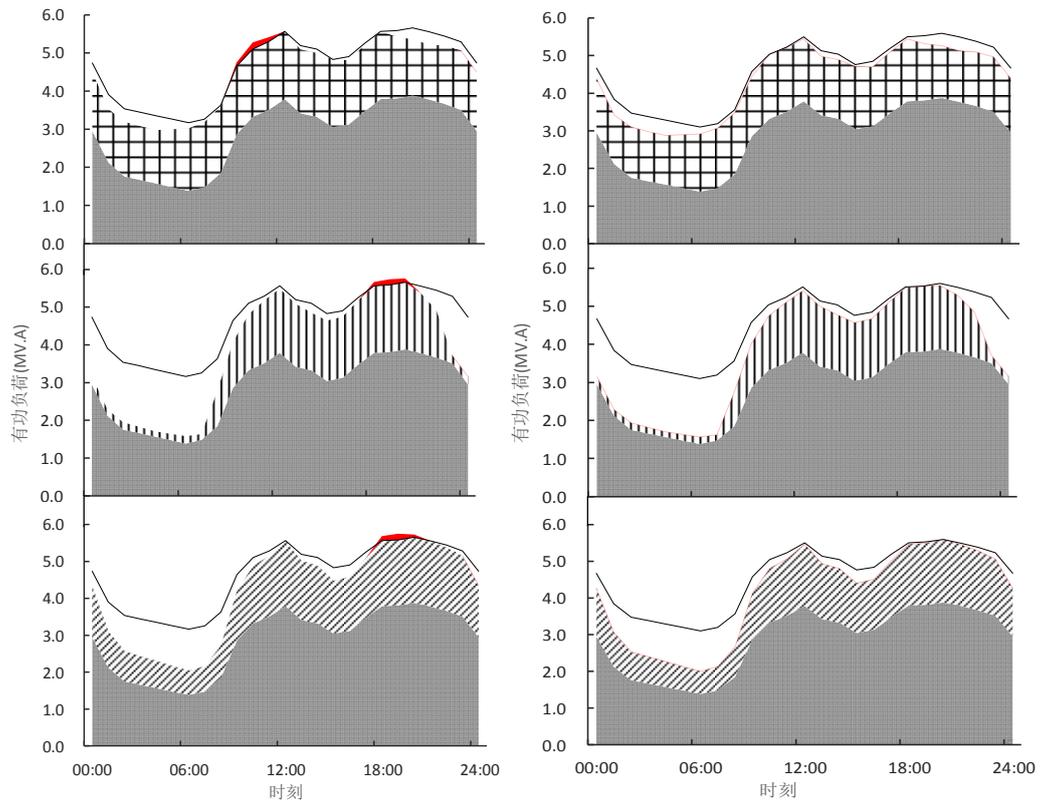
图 A1 简单配电网结构示意图

Fig.A1 Schematic diagram of simple distribution network structure

$$\begin{cases} \Delta P_{1,j} \leq \min [S_{4,j} - (P_{4,j} + \Delta P_{4,j}), R_{3,j} + E_{2,j} - (P_{4,j} + \Delta P_{4,j}) - \\ \quad (P_{5,j} + \Delta P_{5,j}) - (P_{6,j} + \Delta P_{6,j}) - (P_{2,j} + \Delta P_{2,j})] - P_{1,j} \\ P_{2,j} = G_j (P_{2,t} + P_{el,t}) \\ \vdots \\ P_{6,j} = G_j (P_{6,t} + P_{e2,t}) \end{cases} \quad j=0,1,\dots, J$$

(A1)

式中： $S_{4,j} - (P_{4,j} + \Delta P_{4,j})$ 为馈线 $N-1$ 约束，表示当馈线 F_1 在工作点 j 因故障而转带时，对侧馈线 F_4 的剩余容量； $R_{3,j} + E_{2,j} - (P_{4,j} + \Delta P_{4,j}) - (P_{5,j} + \Delta P_{5,j}) - (P_{6,j} + \Delta P_{6,j}) - (P_{2,j} + \Delta P_{2,j})$ 为主变 $N-1$ 约束，表示当馈线 F_1 所在主变 T_1 发生故障进行负荷转带时，对侧主变 T_3 的剩余容量。



(a) 方案3

(b) 方案2

■ 超限 ▨ 新增类型1负荷 ■ 馈线F₀原始负荷 ▨ 新增类型2负荷 ▨ 新增类型3负荷

图 A2 新增负荷超限情况对比

Fig.A2 Comparison of new-added load overrun