

第3章

考虑空房用户自适应聚类的相-线-户关系识别

第2章给出了基于知识驱动的LVDN变户关系识别方法,本章在第2章变户关系识别结果的基础上,聚焦LVDN相-线-户关系识别研究,以期贯通LVDN变-相-线-户全拓扑。LVDN相-线-户关系是保证供电可靠性和供电质量的基础。然而,空房用户和电表计量误差增加了已有数据方法识别的难度。

针对该问题,本章提出了一种基于用户聚类、二次规划和概率分布的LVDN相-线-户关系识别方法。该方法既可以识别LVDN的相户关系,也可以识别用户与LVDN一级分支线的连接关系,简称线户关系。首先,为了解决空房用户的识别问题,提出了基于用户电压特性的用户自适应聚类方法。其次,基于节点电流定律,构建了用于相-线-户关系识别的二次规划模型。进一步,为了提升识别算法对电表计量误差的鲁棒性,提出了基于蒙特卡罗的概率分布模型。最后,在广东省某实际LVDN中验证了所提方法的有效性,并与已有基于混合整数模型(mix integer programming, MIP)的识别方法进行了比较分析,探讨了阈值系数对识别准确率的影响。算例表明,在存在空房用户和电表计量误差的场景下,与MIP方法相比,本章方法可达到更高的识别准确率。

3.1 LVDN空房问题描述

图3-1根据实际情况,给出了一个简化的配电网示意图。如图3-1所示,目前中高压配电网的拓扑关系已知,而大部分区域的LVDN拓扑关系仍处于盲区,或者已有的连接关系不准确。作为LVDN拓扑辨识的重要环节,相户关系识别定义为识别每个用户连接的相户关系,线户关系识别定义为识别用户和LVDN一级分支线的连接关系。准确的相-线-户关系有利于故障快速定位,加快故障修复,减少线损的统计误差,完善三相电压不平衡管理。

定义长时间用电量很小甚至为0的用户为空房用户,如图3-1中的黑色用户所示。农村地区存在很多外出务工人员,节假日才返乡。他们外出期间,住宅用电量很低,接近于0,因此农村地区非节假日期间空房率很高。除此之外,由于屋顶光伏等分布式电源就地分担负荷,配备分布式电源的用户消耗LVDN传输的电能减少,他们的用电情况也与空房用户

类似。而在节假日期间的用电高峰期,峰电大部分来源于这部分空房用户。为了满足和管理高峰用电需求,需要明确空房用户的相-线-户关系。因此,在相-线-户关系辨识中计及空房用户是十分必要的。

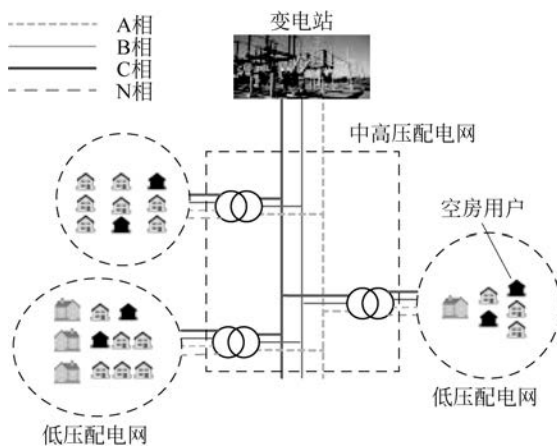


图 3-1 配电网示意图

3.2 应对空房用户的用户自适应聚类模型

由于空房用户的用电特征不明显,用电量甚至接近于 0,现有基于负荷曲线的识别方法难以识别空房用户,将空房用户与用电用户关联起来可以解决这个问题。本节基于电压曲线间的相关性系数(CCVP),提出了一种用户自适应聚类模型,可将电气距离近且连接在相同一级分支线的用户聚成一个类别,进而将空房用户与相同分支线上的用电用户关联起来。具体来讲,首先基于 2.2.1 节电压数据的时空特性,推导分析了用户间的关联特性,为后续研究提供理论基础;其次根据用户间的 CCVP 值对用户进行初步聚类;最后利用用户和三相低压母线间的 CCVP 值对聚类结果进行修正。

3.2.1 用户间的关联特性推导

回顾 2.2.2 节,对于靠近低压母线的节点,其到低压母线的线路距离较短,进而这些节点与低压母线之间的每条线的距离也很短。于是对于低压母线附近的节点,可得到 $\Delta U_u^t \approx \Delta U_0^t$ 。当 LVDN 三相电压不平衡度比较轻微时,三相低压母线的电压曲线差异很小,可能存在 $U_{A0}^t \approx U_{A1}^t \approx U_{B0}^t \approx U_{B1}^t \approx U_{C0}^t \approx U_{C1}^t$,其中 $U_{A0}^t, U_{B0}^t, U_{C0}^t$ 分别为 A、B、C 三相低压母线的电压, $U_{A1}^t, U_{B1}^t, U_{C1}^t$ 分别为临近 A、B、C 三相低压母线的节点电压。换言之,当 LVDN 三相不平衡度低时,靠近低压母线但位于不同相线的用户之间的电压曲线相似性很高。

2.2.2 节的电压时间特性分析中指出,不同相线上的总体负荷特性存在较为明显的差异时,不同相线上节点的电压时间特性大概率存在差异。进一步,由式(2-2)和式(2-3)可得到相邻节点相邻时刻电压差值 ΔU_{u+1}^t :

$$\Delta U_{u+1}^t = U_{u+1}^{t+1} - U_{u+1}^t = (U_u^{t+1} + \Delta G_u^{t+1}) - (U_u^t + \Delta G_u^t) = \Delta U_u^t + \Delta G_u^{t+1} - \Delta G_u^t$$

$$\approx \Delta U_u^t - \frac{R_{u+1} P_{L(u+1)}^{t+1} + X_{u+1} Q_{L(u+1)}^{t+1}}{U_{u+1}^{t+1}} + \frac{R_{u+1} P_{L(u+1)}^t + X_{u+1} Q_{L(u+1)}^t}{U_u^t}, \quad u = 1, 2, \dots, n \quad (3-1)$$

式中, ΔU_u^t 为节点 u 第 t 时刻至第 $(t+1)$ 时刻的电压变化量; U_{u+1}^t 和 U_{u+1}^{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻节点 $u+1$ 的电压; ΔG_u^t 和 ΔG_u^{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻节点 u 与节点 $(u+1)$ 之间的电压幅值变化量; R_{u+1} 和 X_{u+1} 分别为第 $u+1$ 段线路的电阻、电抗; $P_{L(u+1)}^t$ 和 $Q_{L(u+1)}^t$ 分别为 t 时刻第 $u+1$ 段线路的首端传输有功、无功; n 为 LVND 中的节点总数。

当节点 u 和节点 $u+1$ 之间的距离很短时, 节点 u 和节点 $u+1$ 之间的线路电阻与电抗 R_{u+1} 和 X_{u+1} 也会很小, 从而 $R_{u+1} P_{L(u+1)}^{t+1} + X_{u+1} Q_{L(u+1)}^{t+1}$ 和 $R_{u+1} P_{L(u+1)}^t + X_{u+1} Q_{L(u+1)}^t$ 可以忽略, 可得到 $\Delta U_{u+1}^t \approx \Delta U_u^t$ 。因此, 相邻电气距离近的节点间的电压曲线相似性高。

综上所述, 总结用户间的电压曲线相关性如下:

(1) 当 LVND 三相不平衡度低时, 靠近低压母线但位于不同相线的用户之间的电压曲线相似性很高。

(2) 当不同相线上的总体负荷特性存在较为明显差异时, 不同相线上用户之间的电压曲线相似性低。

(3) 相邻电气距离近的用户间的电压曲线相似性高。

接下来, 以一个 9 用户的简单低压网络简要分析上述情况。图 3-2 给出了 9 用户 LVND 的拓扑结构和网络参数, 图 3-3 和图 3-4 分别展示了各用户的负荷曲线和低压三相母线的总负荷曲线。

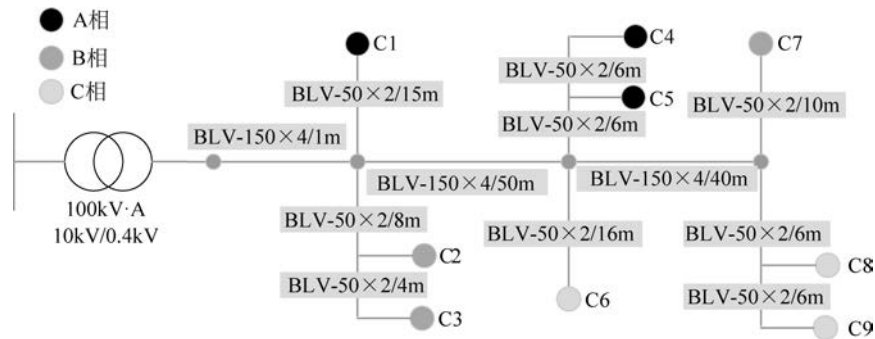


图 3-2 9 用户 LVND 的拓扑结构和网络参数

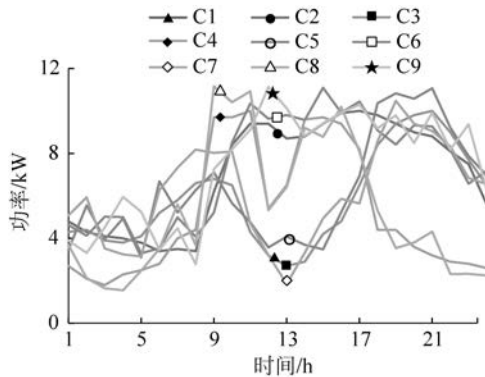


图 3-3 用户的负荷曲线

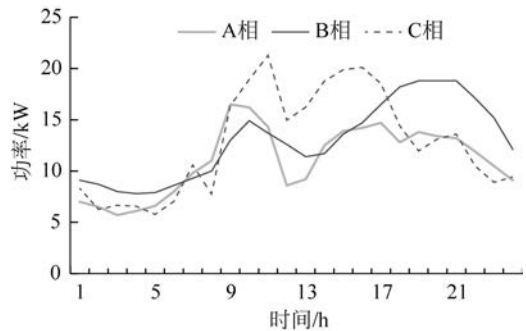


图 3-4 低压三相母线的负荷曲线

采用文献[2]中的三相四线潮流方法计算该 LVDN 的潮流,图 3-5 给出了 9 用户的电压曲线。

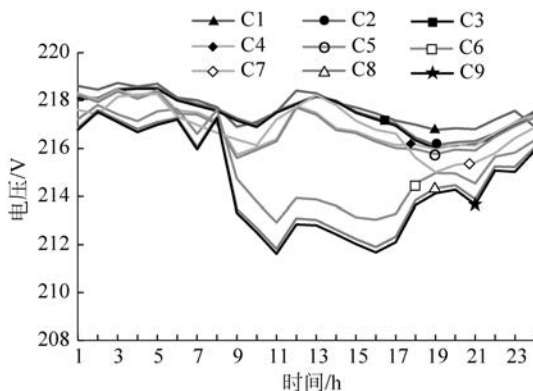


图 3-5 9 用户的电压曲线

综合图 3-2 中的拓扑结构关系和图 3-5 中的用户电压曲线结果可知,当 LVDN 三相不平衡度低时,靠近配电变压器但位于不同相线的用户电压曲线相似性高,例如用户 C1 和 C2 在 1~11h 时段电压曲线相似性高。当不同相线上的总体负荷特性存在较为明显差异时,不同相线上用户之间的电压曲线相似性低,例如用户 C6 和 C7 在 9~19h 时段电压曲线相似性低。而相邻电气距离近的用户间的电压曲线相似性很高,例如用户 C2 和 C3、用户 C4 和 C5 以及用户 C8 和 C9 的电压曲线。仿真结果与上述理论推导一致。

进一步引入 Person 相关性系数量化电表间的电压时序曲线相似性 Person 相关性系数越大,电表间的电压曲线相似性越高^[3]。因此,根据上述推导的 3 点用户间电压相关特性可知,用户间的 CCVP 值越高,越大概率属于以下两种情况之一:①相户连接关系一致;②相户关系不一致,但邻近配电变压器。

3.2.2 关联空房用户的自适应聚类模型

3.2.1 节指出,用户间的电气距离越近,他们的电压曲线相似度越高。而电压曲线越相似,他们之间的 CCVP 值越大。因此电气距离近的用户,他们之间的 CCVP 值很大。在不同相线上且远离配变首端的用户,他们之间的电压曲线相似性较低,因此他们之间的 CCVP 值相对较小。根据上述特性,对各用户进行自适应聚类分析,聚类原则为同类电表两两之间的 CCVP 值大于等于相关性阈值系数,异类电表两两之间的 CCVP 值小于相关性阈值系数,即

$$\begin{cases} \tau_{mv} \geq \tau_0^y, & m, v \in \Omega_{\text{cla}}(y) \\ \tau_{mw} < \tau_0^y, & m \in \Omega_{\text{cla}}(y) \text{ 且 } w \notin \Omega_{\text{cla}}(y) \end{cases}, \quad m, v, w \in \Theta \quad (3-2)$$

$$\tau_{mv} = \tau_{vm} = \frac{\sum_{t=1}^T u_{v,t} u_{m,t} - \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^T u_{m,t} \sum_{t=1}^T u_{v,t} \right)}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^T u_{v,t}^2 - \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^T u_{v,t} \right)^2 \right] \left[\sum_{t=1}^T u_{m,t}^2 - \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^T u_{m,t} \right)^2 \right]}} \quad (3-3)$$

式中, τ_{mv} 和 τ_{mw} 分别为用户 m 与用户 v 和用户 w 的 CCVP 值; τ_0^y 为第 y 个聚类的相关性

阈值系数； $\Omega_{\text{cla}}(y)$ 表示第 y 个聚类的用户集合； Θ 为待识别用户集合； $u_{m,t}$ 和 $u_{v,t}$ 分别为电表 m 、 v 在时刻 t 的电压值， $t=1,2,\dots,T$ ； T 为总计量时间断面数。

值得注意的是，本节所提的相关性阈值系数是通过迭代计算得到的，不同类别的相关性阈值系数不同。以 τ_0^y 为例简要说明确定相关性阈值系数的迭代过程，步骤如下：

(1) 设定阈值系数初值 τ_0^y 和迭代步长 $\Delta\tau$ 。

(2) CCVP 值大于等于 τ_0^y 的用户纳入类别 y 中。

(3) 如果类别 y 内所有用户间的 CCVP 值均不小于 τ_0^y ，且他们与类别 y 外所有用户间的 CCVP 值均小于 τ_0^y ，迭代结束，输出 τ_0^y ，否则执行下一步。

(4) 如果 $\tau_0^y=1$ ，迭代结束，输出 τ_0^y ，否则 $\tau_0^y=\tau_0^y+\Delta\tau$ ，返回步骤(2)。

在迭代过程中，阈值系数的上限值为 1。当某电表聚类阈值系数迭代增加至 1 时，结束该表的聚类迭代，将其单独聚成一类，并开始下一块表的聚类迭代，直至所有电表完成聚类。因此，本章所提的迭代过程不会陷入死循环。

3.2.3 用户聚类结果修正策略

3.2.1 节指出，靠近配变低压母线首端但在不同出线的电表，由于距离母线电气距离近，因此它们的电压时序曲线相似性很高，在 3.2.2 节中的聚类过程中，容易被聚成一类。然而用户聚类的目标是将电气距离近且连接在相同一级分支线的用户聚成一个类别，3.2.2 节初步聚类结果无法满足这个目标。为避免该问题，本节通过分析用户和配变低压三相母线间的 CCVP 值，识别靠近配变低压侧母线的用户，并将其单独聚成一个类别。同时，对 Ω_{cla} 初始聚类结果中的单用户类别作进一步聚类。步骤如下：

(1) 对于 Ω_{cla} 中的单用户类别，将其聚类至与其 CCVP 值最大的用户所在的类别，聚类集合 Ω_{cla} 更新为 $\Omega_{\text{cla}1}$ 。

(2) 计算各用户与配变低压三相母线的 CCVP 值，得到 3 个向量 Γ_A^{line} 、 Γ_B^{line} 和 Γ_C^{line} ，即

$$\Gamma_{\varphi}^{\text{line}} = [\tau_{\varphi,1}^{\text{line}}, \dots, \tau_{\varphi,v}^{\text{line}}, \dots, \tau_{\varphi,M}^{\text{line}}], \quad \forall \varphi \in L, \forall v \in \Theta \quad (3-4)$$

式中， $\tau_{\varphi,v}^{\text{line}}$ 为 φ 相母线和用户 v 的 CCVP 值， $\varphi \in L = \{A, B, C\}$ 。

(3) 将 Γ_A^{line} 、 Γ_B^{line} 和 Γ_C^{line} 中的数值按从大到小的顺序排序，得到 3 个向量 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{S}_B 和 \mathbf{S}_C ， $\mathbf{S}_{\varphi} = [s_{\varphi,1}, \dots, s_{\varphi,x}, \dots, s_{\varphi,M}]$ ， $x \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

(4) 对步骤(3)得到的 3 个向量，由式(3-5)计算每个向量中第一个元素 $s_{\varphi,1}$ 与其他元素之间的变化率，然后得到 3 个 CCVP 变化率向量 \mathbf{S}_A^d 、 \mathbf{S}_B^d 和 \mathbf{S}_C^d ， $\mathbf{S}_{\varphi}^d = [\xi_{\varphi,1}, \dots, \xi_{\varphi,x-1}, \dots, \xi_{\varphi,M-1}]$ 。

$$\xi_{\varphi,x-1} = \frac{[(1-s_{\varphi,1}) - (1-s_{\varphi,x})]}{1-s_{\varphi,1}} \times 100\%, \quad \forall x = 2, \dots, M \quad (3-5)$$

式中， $\xi_{\varphi,x-1}$ 为 $s_{\varphi,1}$ 和 $s_{\varphi,x}$ 之间的 CCVP 变化率。

(5) 设定相关系数变化率指标，若 $\xi_{\varphi,x-1}$ 不大于 ξ_0 ，则 $s_{\varphi,x}$ 对应的用户视为靠近配变首端的用户。

(6) 从结果 $\Omega_{\text{cla}1}$ 中将步骤(5)所得到的靠近配变首端的用户提取出来，单独作为一个类别，此时聚类结果由 $\Omega_{\text{cla}1}$ 更新为 $\Omega_{\text{cla}2}$ ，聚类结束。

进一步，为削减后续相-线-户关系识别模型中的变量数目，对聚在同一类别的电表的电

流值求和,并将该值作为此类别的电流值,即

$$I_g = \sum_{a \in \Omega_E(g)} I(a), \quad \forall g = 1, 2, \dots, E \quad (3-6)$$

式中, I_g 为第 g 个类别所有电表的电流值之和; $I(a)$ 为类别 g 中电表 a 的电流值; E 为聚类集合 $\Omega_E(g)$ 中电表聚类类别总数。

3.3 基于二次规划和概率分布的相-线-户关系识别建模

图 3-6 给出了所提相-线-户关系识别模型的流程图。如图 3-6 所示,所提方法共包含两个部分:第一部分即 3.2 节给出的用户聚类方法,实现部分同相同线用户的聚合,以减少 LVVDN 电表变量规模和空房用户、计量误差等因素对识别结果准确性的影响。第二部分即本节研究内容,包括用于相-线-户关系识别的二次规划优化模型和提升模型对数据误差鲁棒性的概率分布模型。本节依托节点电流定律和概率分布模型,以各聚类的连接关系作为变量,建立电流分类优化模型,通过求解模型,实现台区变户、相户与线户关系的准确识别,具体如下。

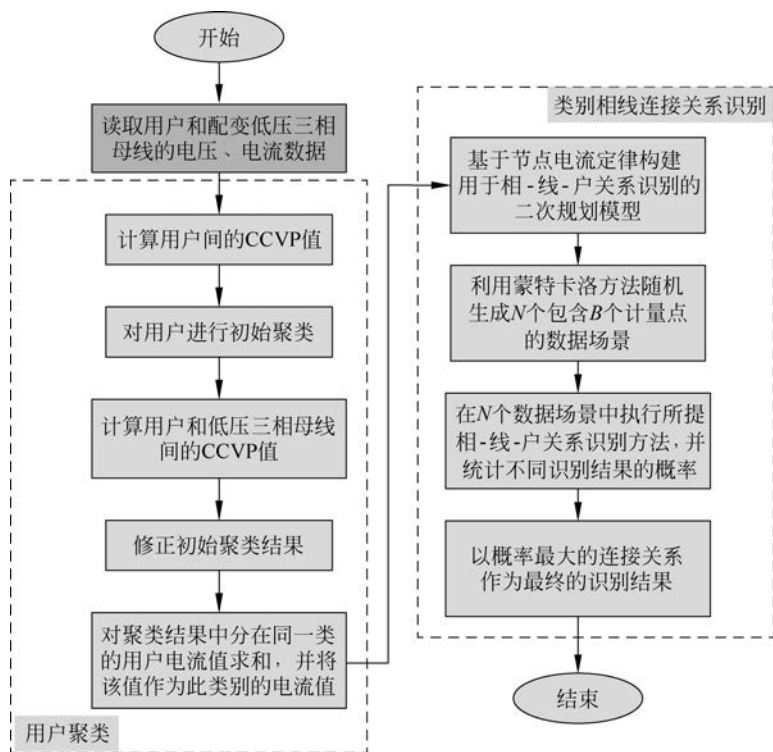


图 3-6 所提相-线-户关系识别模型的流程图

3.3.1 基于节点电流定律的相-线-户关系识别二次规划模型

本节基于节点电流定律将相-线-户关系识别转换为二次规划问题求解。节点电流定律指出,电路中任一个节点上,在任一时刻流入节点的电流之和恒等于流出节点的电流之

和^[1]。因此,在LVND中,任一时刻,某相低压母线或一级分支线上的注入电流恒等于流入连接于该相(一级分支线)所有用户的电流之和。在不考虑窃电的情况下,支路传输电流损耗非常小。由于损耗微小,聚合用户的电流相比文献[4]中用的功率更能接近配变低压母线上记录的数值。

因此,在LVND中,任一时刻,某相出线首端节点流出的有功电流值总等于该相线上所有电表的流入有功电流值之和,即

$$I_{\rho}^t = \sum_{b \in \Psi_{\rho}} I_b^t, \quad \forall \rho \in L, t \in \beta \quad (3-7)$$

式中, I_{ρ}^t 为 t 时刻配变低压相线 ρ 首端流出的有功电流值。 $\beta = \{1, 2, \dots, T\}$, 为采集时刻集合。 Ψ_{ρ} 为配变低压侧出线 ρ 上所有的用户集合。 I_b^t 为配变低压侧出线 ρ 上第 b 个用户在 t 时刻的有功电流值。 L 为低压侧各相出线集合, 若需要辨识的拓扑结构为相户关系, 则 L 表示相户集合, $L = \{A, B, C\}$; 若需要辨识的为线户关系, 则 L 表示一级分支线集合, $L = \{A_1, A_2, \dots, A_e; B_1, B_2, \dots, B_e; C_1, C_2, \dots, C_e\}$, e 为一级分支线数目。

在实际的配电网中, 考虑到电表的测量误差和电流传输过程中的漏电流等问题, 式(3-7)并不会严格成立。此时, 某一出线首端电流与该相线上所有电表的流入电流值的关系为

$$I_{\rho}^t = \sum_{b \in \Psi_{\rho}} I_b^t + \xi_{\rho}^t, \quad \forall \rho \in L, t \in \beta \quad (3-8)$$

式中, ξ_{ρ}^t 为 t 时刻LVND出线 ρ 上电表的测量误差和电流传输过程中的漏电流导致的误差总和。

电表聚类集合 Ω_{clu2} 中在同一类别的电表属于相同相线, 因此, 以由式(3-6)计算得到的类别电流 $I_g(t)$ 代替单个用户电流。进一步, 为识别LVND线户关系, 引入0-1变量 x 表征各个类别的相线连接关系: 若类别 g 属于待识别LVND出线 ρ , 则 $x_{g,\rho} = 1$, 反之则 $x_{g,\rho} = 0$ 。结合电表聚类结果, 式(3-8)转换为

$$I_{\rho}^t = \sum_{g=1}^E x_{g,\rho} I_{g,\text{clu}}(t) + \xi_{\rho}^t, \quad \forall \rho \in L, t \in \beta \quad (3-9)$$

式中, $I_g(t)$ 为 t 时刻第 g 个类别电表的电流值, $x_{g,\rho}$ 为表征第 g 类别与出线 ρ 连接关系的0-1变量。

令 $\mathbf{X}_{\rho} = [x_{1,\rho}, x_{2,\rho}, \dots, x_{E,\rho}]^T$, $\mathbf{P} = [I_{\rho}^t]_{T \times E}$, $\boldsymbol{\xi}_{\rho} = [\xi_{\rho}^1, \xi_{\rho}^2, \dots, \xi_{\rho}^T]^T$, $\mathbf{I}_{\rho} = [I_{\rho}^1, I_{\rho}^2, \dots, I_{\rho}^T]^T$, 定义矩阵 \mathbf{Q} 、 \mathbf{X} 、 $\boldsymbol{\xi}$ 、 \mathbf{I} 如下:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{P} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{A_1} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{C_e} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_{A_1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\xi}_{C_e} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A_1} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{C_e} \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

式(3-9)的矩阵形式表达如下:

$$\begin{cases} \mathbf{QX} + \boldsymbol{\xi} = \mathbf{I} \\ \text{s. t. } x_{g,\rho} \in \{0, 1\}, \quad \forall g = 1, 2, \dots, E, \forall \rho \in L \end{cases} \quad (3-11)$$

式中, $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{P}, \mathbf{P}, \dots, \mathbf{P})$, 是一个以 \mathbf{P} 为对角线元素的 $3e \times 3e$ 维的对角矩阵; \mathbf{I} 表示低压各相母线首端流出的电流值矩阵; $\boldsymbol{\xi}$ 为低压各相出线上电流误差矩阵; \mathbf{X} 为表征类别连接相线关系的矩阵。

此时LVND线户关系识别问题转化为0-1变量求解问题。为求解 \mathbf{X} , 构建如下优化

模型:

$$\begin{cases} \min f = \| \mathbf{I} - \mathbf{QX} \|_2^2 \\ \text{s. t. } \sum_{\rho \in L} x_{g,\rho} \leq 1, \quad \forall g = 1, 2, \dots, E \\ x_{g,\rho} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (3-12)$$

该式是一个 0-1 整数二次规划问题,属于 NP 问题,可用分支定界等算法求解,但是随着变量的增加,求解需要的时间将呈指数增长。为提升求解速度、增加可解性,将式(3-12)中的整数变量松弛为连续变量,即 $x_{g,\rho} \in \{0, 1\}$ 改为 $x_{g,\rho} \in [0, 1]$ ^[4],由此转换为二次规划问题。在该模型中,基于二次规划问题计算得到的 \mathbf{X} 矩阵元素包含小数,而采集数据时刻 T 越多,小数值将越接近 0 或 1,识别结果越准确^[5]。为明确连接关系,需要将 \mathbf{X} 矩阵中的小数值转化成 0-1 值,即

$$x_{g,\rho}^{\text{INT}} = \begin{cases} 1, & |x_{g,\rho} - 1| \leq |x_{g,\rho}| \\ 0, & |x_{g,\rho} - 1| > |x_{g,\rho}| \end{cases} \quad (3-13)$$

式中, $x_{g,\rho}^{\text{INT}}$ 为 $x_{g,\rho}$ 的 0-1 形式。

由上可得到各个类别的相-线-户连接关系,而同一类别下的电表属于相同相线,因此可根据各个类别的相-线-户连接关系确定 LVDN 所有用户的相-线-户连接关系。

3.3.2 提升算法鲁棒性的蒙特卡罗概率分布模型

文献[4]指出,如果低压母线和用户之间的功率或电流差值不随着计量周期的增加而增加,上述二次规划的解将随着计量周期的增大而逐渐趋于真实的用户相户连接关系。但如果低压母线和用户之间的功率或电流差值较大,上述混合整数规划可能产生目标函数值低于真实的用户相户连接关系的最优解。这意味着所提二次规划模型对相-线-户关系的识别准确率受数据误差的显著影响。而数据计量误差存在一定的随机性,不同时刻误差值大小可能不同,为了避免部分时刻误差较大对识别结果的影响,本节提出了一种基于概率分布的改进方法,具体如下:

(1) 在数据库中,利用蒙特卡罗方法随机抽取 N 个包含 B 个计量点的数据场景, B 取与 3.2 节用户聚类后的类别总数。

(2) 在 N 个数据场景中执行 3.3.1 节所提相-线-户关系识别方法,并统计不同识别结果的概率分布,即

$$\vartheta_o = \frac{\chi_o}{N}, \quad o = 1, 2, \dots, O \quad (3-14)$$

式中, ϑ_o 为第 o 种识别结果的概率, O 为 N 个场景中识别结果总数; χ_o 为第 o 种识别结果在 N 个场景中出现的次数。

(3) 概率最大的第 r_{\max} 个识别结果视为最终的识别结果, r_{\max} 由下式获得:

$$r_{\max} = \operatorname{argmax}\{\vartheta_o\}, \quad o = 1, 2, \dots, O \quad (3-15)$$

当存在分布式能源如屋顶光伏从用户侧并网时,分布式电源就地分担用户的负荷,用户消耗由电网供给的电能减少。此时,用户消耗由电网供给的电能可能大于 0、接近 0 或为负值,这取决于分布式电源的发电容量。当用户需要电网供应的电能为负值时,LVDN 中出现反向潮流,这将改变 3.2.1 节推导的用户电压特性。考虑到所提出的相户识别算法是基

于 3.2.1 节中的电压特性,所以它仅适用于用户的分布式电源没有功率倒送的场景。

3.4 算例分析

3.3 节构建的模型可以识别 LVDN 中的相户关系和线户关系,本节以相户关系识别为例阐述本章所提方法的仿真验证结果。算例分析共包含 3 个部分:①描述识别过程,详细说明所提方法如何识别相户关系;②在 5 种场景下,对比分析所提方法和现有方法的性能表现,以说明所提方法的优越性;③研究分析阈值系数 ξ_0 对识别准确率的影响。

3.4.1 算例参数描述

以广东省某地区包含 120 个用户的 LVDN 作为研究对象,其中单相用户 110 户,三相用户 10 户,该 LVDN 共有 9 条一级分支线。三相用户配备的三相电表,可以分别记录三相的功率、电压和电流数据。考虑到 LVDN 中的三相用户不需要明确各相关系,本节算例中只识别 110 个单相用户的相户连接关系。

算法验证需要的数据包括:①智能电表以 15min/点采集的用户电压、电流数据;②配变终端以 15min/点采集的三相低压母线的电压、电流数据。用户电压数据和三相低压母线的电压数据计量时刻相同,即数据是同步的。实际上,电表根据它的内部时钟记录读数,这个时钟可能与标准时钟存在偏差,电表间难以实现精准的同步。在部分地区,智能电表会定期与集中器校准时间,保证了智能电表之间的计量同步性不会偏离太多,因此实际 LVDN 中采集的数据基本能满足所提方法的要求。为了评价所提相位识别算法的准确性,还需要准确的 LVDN 拓扑结构,这由人工现场勘查获得,如图 3-7 所示。

进一步,定义 Δ 为计量周期内三相电流不平衡度的平均值,用来反映 LVDN 中三相负荷不平衡水平,如式(3-16)所示。定义空房率为 LVDN 中空房用户数和所有用户数目的比值。

$$\Delta = \left[\sum_{t=1}^T \frac{I_D^{\max}(t) - I_D^{\min}(t)}{I_D^{\max}(t)} \times 100\% \right] / T \quad (3-16)$$

式中, $I_D^{\max}(t)$ 为时刻 t 低压母线电流的最大值; $I_D^{\min}(t)$ 为时刻 t 低压母线电流的最小值。

3.4.2 方法识别过程

本节从数据库中提取长度为一天包含 96 个计量时刻的用户和低压三相母线的的数据。在这个数据场景中, Δ 为 20%,空房率为 13.3%。空房用户分别为 S3、S4、S18、S23、S24、S26、S27、S28、S38、S48、S51、S57、S59、S67、S81 和 S93。阈值 ξ_0 设定为 20%。

由 3.2 节所提应对空房用户的聚类方法,得到初始用户聚类结果和修正后的用户聚类结果,分别如表 3-1 和表 3-2 所示。将表 3-1 中的聚类结果与拓扑结构图 3-7 比较可知,3.2.1 节提出的用户聚类方法将靠近配变首端但位于不同相线的用户聚成了同一类,即 {S1, S2, S32, S33}。此外,由于 3.2.1 节聚类方法中对用户间的 CCVP 值要求较高,初始聚类结果表 3-1 中存在大量的单用户类别。由表 3-2 可知,经过 3.2.2 节的聚类修正,靠近首端的电表 S1、S2、S32、S33 和 S34 被辨识出来,并单独分类,避免了不同相线的用户聚成一类。同时,通过将单用户类别聚类至与其 CCVP 值最大的用户所在的类别,总聚类数目明显



彩图 3-7

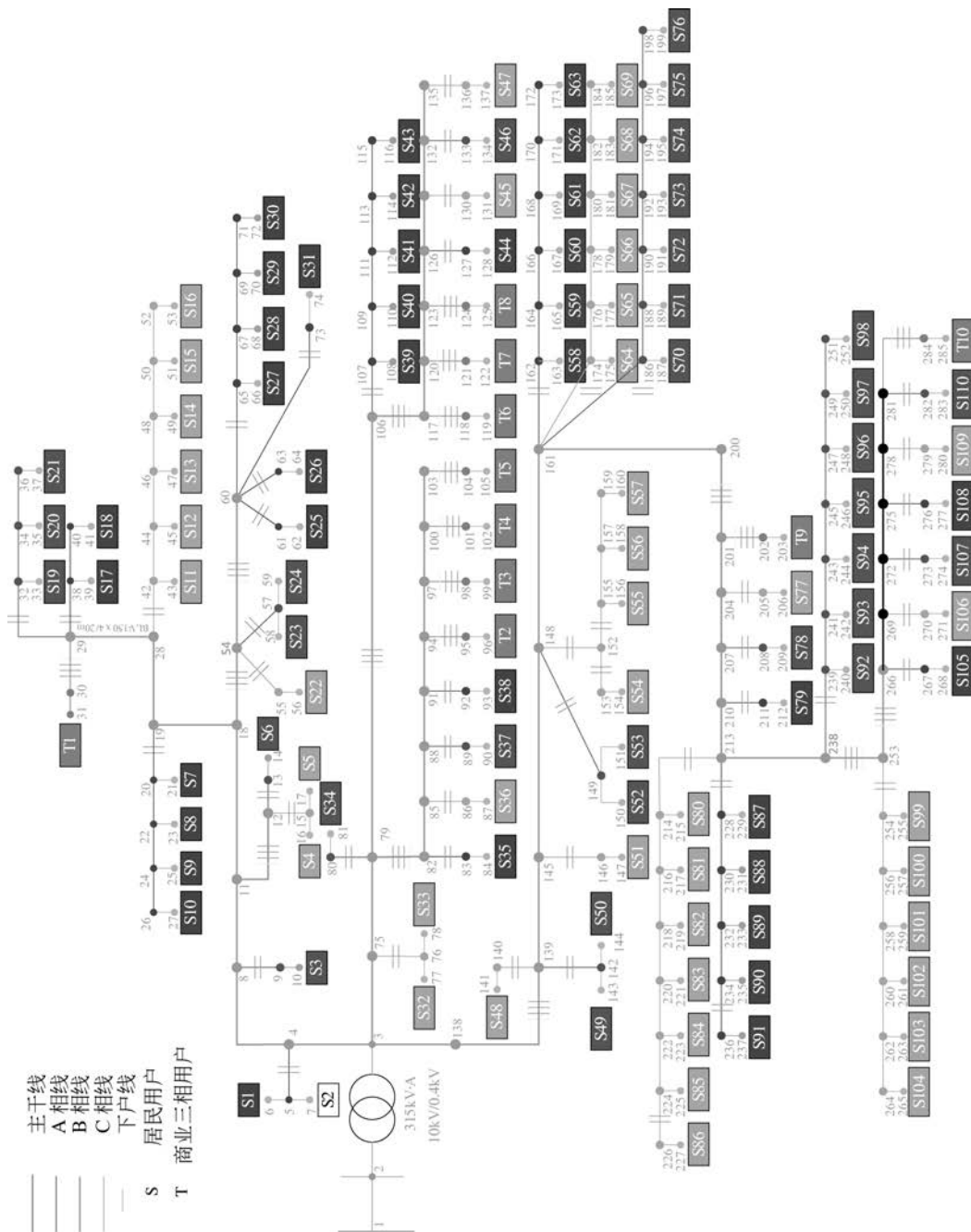


图 3-7 广东省某 LVDN 拓扑结构示意图