

# 基于表计配置的配电网可观测性分析

陈得治, 郭志忠

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

## DISTRIBUTION SYSTEM NETWORK OBSERVABILITY ANALYSIS BASED ON METER PLACEMENT

CHEN De-zhi, GUO Zhi-zhong

(Department of Electrical Engineering of Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** The definition of observability of distribution system is proposed. The load variety rule is represented using typical load patterns and each consumer is given a different characteristic index, the network configuration is various as well, based on which, the minimum set of meters with power type can be placed with priority on branches. In addition, solving the measurement equations can obtain the typical load patterns and the node load further more. And the network observability is implemented at the same time. Secondly, an efficient graph partitioning method is proposed to partition the weighted tree of the expected distribution network into a desired number of measurement areas in the performing optimization meter placement. Finally, in conditions of making the measurement equations have solution, the measurement areas with balanced consumer index are obtained. The proposed method has been tested in examples. It makes a compromise with the cost and the operation demand, it also offers an idea in the reconstruction of distribution automation.

**KEY WORDS:** Distribution system; Observability analysis; Meter placement; Graph partitioning

**摘要:** 给出了一种配电网可观测性分析的定义, 即使用典型负荷模式描述负荷变化规律, 且每个负荷用户被赋予不同的表征指标, 在变化的网络结构下, 支路上优先配置最小数目的功率量测表计, 利用量测方程求解典型负荷模式, 从而获得各节点负荷, 配电网可观测; 有效的网络分割方法分割期望网络结构的加权树来优化表计配置, 使得在量测方程可解的前提下, 量测区域用户的指标均衡。算例进行了可观测分析和表计配置的测试。所提出的可观测分析思路能够折衷考虑经济性和运行需要, 而表计配置也为配电网自动化改造提供一个思路。

**关键词:** 配电网; 可观测分析; 表计配置; 网络分割法

## 1 引言

电力系统可观测是指系统的量测集(数量和种类)及分布足够用以求解系统当前的状态。输电网的可观测分析主要沿着数值方法和拓扑方法两条思路来探讨<sup>[1]</sup>, 基于可观测分析的表计配置的研究也有很多成果<sup>[2-4]</sup>。

但配电网面向电力用户、元件众多、分布面积广, 从经济角度来讲, 现阶段要大范围地配置表计来达到传统意义下的可观测性是不符合实际的; 如果网络不具有合理的可观测性, 那么重构、无功优化和DSM(需求侧管理)等功能<sup>[5]</sup>应用效果会大打折扣。所以本文探讨具有配电网特色的可观测分析及表计配置方法, 以达到可观测分析后求解得到的网络状态满足配网运行需要, 同时基于可观测分析的表计配置又能有合适的经济耗费的目标。以往研究中, 围绕量测缺乏的配电网的监控问题做了很多工作<sup>[6-10]</sup>。文[6-7]用典型负荷模式来代表同类型用户负荷变化规律, 并将之保存到特定数据库, 用于运行和规划。文[8-9]利用状态估计思想, 校正缺乏量测的配电网伪量测, 为运行、管理提供信息。文献[10]只是定性地提出了一些用于配电网自动化实时监控的表计配置规则。实际上, 虽然这些研究成果没有明确提出配电网可观测分析及表计配置, 但都是隐含着沿此思路进行研究的, 也可见此问题的重要性。

本文总结已有研究成果, 系统地从规划角度提出了一种配电网可观测分析及表计配置方法。并结合算例论证本方法合理性。

## 2 配电网可观测分析

### 2.1 概述

量测缺乏的配电网可观测分析的首要目标是配置表计获得缺乏的量测量,从而刚好达到可观测的标准,能够求解网络状态;其次,再逐步地配置表计,使得可观测性的健壮性增强,来进一步优化网络状态。一般来说,可供选择的配置表计类型有节点电压幅值量测、支路功率量测和节点功率量测,但同样的测点、同样数量的表计,功率量测类型要比节点电压幅值量测类型对于量测缺乏的配电网可观测分析贡献大,所以本文重点考虑功率量测类型的表计配置。

### 2.2 配电管理系统对量测信息的要求

自动化较成熟的配电网,管理系统功能的执行都有个优先级<sup>[10]</sup>。一般以重构优先,而无功优化其次,前者依赖馈线支路量测信息,而后者依赖负荷量测信息,从这个角度讲馈线支路的量测配置优先于负荷量测配置;而DSM功能只需在较重要的用户装设量测表计,大多数用户的负荷变化以典型负荷模式来合理替代<sup>[6-7]</sup>,这种方法在实际应用中满足经济性和运行需要,取得了良好的效果,被广泛采用。

### 2.3 电力用户负荷信息的处理

典型负荷模式是归一化的随机变化的负荷统计指标:均值和方差,也称作典型负荷曲线,它能代表同类型用户负荷变化规律,把它和用户的耗电量、功率因数等信息结合起来,是解决配电网负荷众多而缺乏量测的一个有效的办法<sup>[6-7]</sup>。本文研究中也使用典型负荷模式方法来代表用户负荷变化,而此方法最关键的问题是保证用户正确地分类,使得每个用户群的用电规律相似。在文[6-7]中采用了数理统计中的分层抽样和发放调查表等方法,实例表明负荷分类的结果有效。

本文在分析中认为用户负荷具有如下信息:

(1) 用户分类信息已知,但各类型的典型负荷模式待求;

(2) 用户变压器的额定容量和某段时间内的耗电量,本文中认为耗电量是更有用的信息;

(3) 用户负荷的平均有功功率 $\bar{P}$ ,通过式(1)求得

$$\bar{P} = \frac{W}{D_m \times 24} \quad (1)$$

式中  $W$ 为用户某段时间内的耗电量; $D_m$ 为这段时

间内的天数。

假定某用户的功率因数 $\cos\phi$ 为常数,用户负荷的平均无功功率 $\bar{Q}$ 为

$$\bar{Q} = \bar{P} \times \tan\phi \quad (2)$$

用户的重要性是由运行人员根据其用电性质和用户类型来定性规定。但本文为了简化计算,采用用户负荷的平均有功功率 $\bar{P}$ 的大小次序来表示其重要程度等级, $\bar{P}$ 越大,重要程度等级越高。这在实际中也是可以运行人员所接受的。

### 2.4 变结构网络

网络重构使得配电网的网络结构会有变化。本文是从规划角度来考虑表计配置,采用用户负荷的平均有功功率 $\bar{P}$ 、平均无功功率 $\bar{Q}$ 作为负荷参数,使用文[11]提出的均衡视在精确矩法来得到对应于变结构网络的期望网络结构。期望网络结构是面向时间过程而非时间断面意义下的最有利于配电网运行的网络结构,这个概念的引入能简捷、有效地将变结构网络考虑为期望意义下的固定结构,本文在期望网络结构下分析配电网可观测和表计配置问题。

### 2.5 辐射状网络结构

配电网辐射状网络结构决定配电网正常运行时潮流方向是固定的,由网络的根节点向负荷节点流动,此性质有利于支路表计的配置。本文定义在支路上若干个配置表计之间的区域为量测区域,那么量测区域中的用户负荷功率总和就是形成此量测区域的各个表计读数的代数和。

综合上述的配电管理系统的功能对量测信息要求的优先级、用户信息的处理和配电网网络结构的特点,配电网可观测问题概括如下:将用户划分为 $N$ 类,每类负荷的变化规律用典型负荷模式来表示,且每个用户重要程度等级不一,在变结构网络下,优先配置支路量测,求解量测方程得到 $N$ 类典型负荷模式,从而获得各用户负荷,配电网可观测。

在期望网络结构下配置支路量测,忽略网络损耗,可以有如下量测方程式列出

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{H}\mathbf{X}_t + \mathbf{V}_t \quad (3)$$

式中 $\mathbf{Z}_t$ 是维数为 $M \times 1$ 的向量,元素 $z_{t(m)}$ 为 $t$ 时刻第 $m$ 个量测区域的量测功率; $\mathbf{H}$ 是维数为 $M \times N$ 的常数矩阵,元素 $h_{m \times n}$ 为在第 $m$ 个量测区域中,第 $n$ 类用户负荷的平均功率总和; $\mathbf{X}_t$ 是维数为 $N \times 1$ 的向量,元素 $x_{t(n)}$ 为 $t$ 时刻第 $n$ 类用户规格化的典型负

荷模式；如果进一步解释， $x_t = \mu_t / (\sum_{24} \mu_t / 24)$ ，这里  $\mu_t$  为用户典型负荷模式； $HX_t$  得到维数为  $M \times 1$  的相量，它是量测  $Z_t$  的计算值，从而  $V_t$  就是维数为  $M \times 1$  的残差相量。

方程式(3)有以下三种情况：

(1)  $M < N$ ，量测系统是不可观测的；

(2)  $M = N$ ，而且矩阵  $H$  的秩为  $N$ ，则量测系统是可观的；

(3)  $M > N$ ，则量测系统是可观的；

对于第(2)、(3)种情况，本文采用经典的最小二乘估计方法，求解规格化的典型负荷模式

$$X_t = W_t Z_t \tag{4}$$

这里

$$W_t = (H^T R_t^{-1} H)^{-1} H^T R_t^{-1} \tag{5}$$

式中  $R_t$  是  $t$  时刻维数为  $M \times M$  的量测误差方差对角阵， $R_t^{-1}$  起权重的作用，其它变量意义同上。

第  $i$  个负荷节点各  $t$  时刻负荷求得

$$S_{i(t)} = \sum_{n=1}^{N_i} s_{i,n} \times x_{t(n)} \tag{6}$$

式中  $N_i$ 、 $x$  含义同上；而  $\bar{s}_{i,n}$  为第  $i$  个负荷节点第  $n$  类用户的平均负荷功率，计算公式见式(1)、(2)；式(6)求解节点负荷的含义是节点负荷是节点的所有类型用户的负荷总和，而每一类型用户的负荷可以用该类型的规格化典型负荷模式和类型用户平均负荷功率的乘积近似求得。

并且赋予第  $i$  节点各  $t$  时刻的计算负荷量测意义下的误差方差  $r_{i(t)}$ ，扩展基本潮流方程，可以列出状态估计方程，解得估计意义下的系统状态，系统可观。

### 3 配电网表计优化配置

#### 3.1 表计优化配置问题的形成

根据配电网可观性的分析，配置的支路量测最小表计数目为  $m=n$ （为表示方便将  $m=M, n=N$ ），关键是找到合适的配置位置，达到如下的优化目标：

(1) 式(3)中的  $H$  矩阵秩为  $n$ ，即满秩。

(2) 在各量测区域之间，满足用负荷平均功率大小指标表示的用户重要程度等级的均衡。

(3) 当此规划配置在实际运行中，量测区域之间用户负荷的功率总和也应尽量保持均衡，这样最大程度地保证各区域的量测对负荷的估计精度均衡。所以从规划角度考虑，应满足量测区域之间的用户负荷的平均功率总和均衡。

(2)、(3)其实是一个优化目标，即量测区域之间的用户负荷平均功率总和均衡。

设有  $N$  个负荷节点的辐射状配电网，在  $N-1$  条支路上配置  $n$  个表计使得满足上述优化目标，从数学上来讲，这是一个组合优化问题，即在  $C_{N-1}^n$  个大小的搜索空间中找到最优解。

#### 3.2 表计优化配置算法

本文力图用一种启发式方法来简捷地解决此问题，同时使得求解过程中物理意义明确。以一个 14 节点实际配电网来说明解决思路。图 1 是这个网络正常运行时的期望网络结构，而表 1 为各用户的类型、变压器容量和月耗电量等信息。

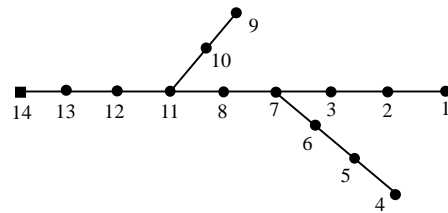


图 1 配电网接线图

Fig.1 The line diagram of a distribution network

表 1 用户信息

Tab.1 The information of consumers

节点号	类型	容量 kVA	电量 MWh	节点号	类型	容量 kVA	电量 MWh
1	c	200	58.6	8	i	315	112
2	i	100	26.4	9	c	100	28.1
3	c	180	43.5	10	r	160	39.6
4	r	200	61.6	11	r	315	82.3
5	c	315	97.8	12	i	630	199
6	i	200	93.7	13	c	100	24.1
7	r	180	38.6				

注：r-居民用户；c-商业用户；i-工业用户。

结合表计优化配置，如从最终解的每个量测区域中取出  $n$  类用户中的一个类型， $n$  个量测区域肯定能有取全  $n$  类用户的方案存在，这是满足优化目标(1)的必要条件，借助这个结论能够确定搜索起点。

在图 1 配电网中，用户类型  $n=3$ ，居民用户类集合 {4,7,10,11} 中元素为 4 个，商业用户类集合 {1,3,5,9,13} 中元素为 5 个，工业用户类集合 {2,6,8,12} 中元素为 4 个。每个用户集合中任取一个节点构成量测区域搜索起点集合，搜索起点集合的空间为  $C_4^1 \times C_5^1 \times C_4^1 = 80$  个，从中任选一组寻找满足优化目标(2)、(3)的表计配置，此问题又进一步转化为网络分割问题，分割为平均负荷功率总和尽可能均衡的子网络，定义均衡指标来衡量其均衡度，同

时检验 $H$ 是否满秩;最终的解空间就是在 80 个分割方案中,选择 $H$ 满秩,均衡指标最大的一组子网络,子网络就是表计配置结果而形成的量测区域。此启发式方法不能保证表计配置的最优解,但能简捷地得到表计配置的有效解。启发式方法的核心算法是网络分割算法<sup>[12-14]</sup>,本文将配电网可观测分析的物理意义赋予到网络分割算法中,对传统贪婪式网络分割算法<sup>[13-14]</sup>进行了改进。首先形成有利于分割算法执行的初始加权树形网络。

(1) 初始加权树形网络

网络中的每个节点  $i$  均被赋以用负荷平均功率表示的权重,记做  $W(i) = w_i = \bar{P}_i$ 。考虑节点权重后,原辐射状网络就变为加权树,如图 2。

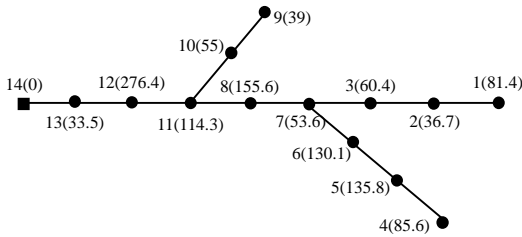


图 2 加权树  
Fig.2 The weighted tree

对于此加权树,定义如下基本术语和概念。

$i=P(j)$ 意味着节点  $i$  是节点  $j$  的母节点,即  $i$  是从  $j$  到根节点的路径中  $j$  的相邻节点,同时  $j$  称作节点  $i$  的子节点;没有子节点的节点称作叶节点;节点  $i$  的长度定义为从  $i$  到根节点的路径的节点数目(不包括根节点)。令  $T[i]$ 表示以节点  $i$  为根节点的子树,子树总权重定义为

$$W(T[i]) = \sum_{j \in T[i]} W(j) \quad (7)$$

图 2 所示加权树可用  $T[14]$ 表示,其中节点 1, 4, 9 是叶节点,对应母节点分别是 2, 5, 10。对于叶节点 9,它到根节点 14 的路径由节点 9, 10, 11, 12, 13 组成,所以节点 9 的长度为 5。

根据满足优化目标(1)的必要条件而确定的搜索起点策略,假设已经从 80 组搜索起点集合空间中选定一组,如居民负荷选定 10 节点,商业负荷选定 3 节点,工业负荷选定 12 节点,即 3 个量测区域中至少分别包括 10、3 和 12 节点。

如果以某搜索起点为根节点的子树不包括其它搜索起点,那么就可以“剪化”图 2 的原加权树形成若干个虚拟叶节点  $i'$ ,而  $W(i')=W(T[i])$ ,如图 3 中的  $10'$ 和  $3'$ ,虚拟叶节点不是真正的叶节点,可以还原原来子树,即  $T[i']=T[i]$ 。这样就形成更便于

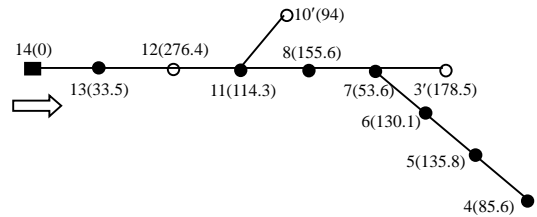


图 3 “剪化”加权树  
Fig.3 The pruning of the weighted tree

继续执行分割的加权树。

(2) 网络分割算法

基于图 3 加权树  $T[14]$ ,执行网络分割算法,用  $n$  表示期望得到的子网络数,那么各子网络的权重尽可能接近  $W(T[14])/n$ 。此算法将沿着加权树从虚拟叶节点到根节点的路径搜索,确定满足分割条件的分割点。

网络分割算法结合表计配置问题的物理意义须满足如下约束:

1) 在网络分割过程中,所有分割形成的子网络  $T[j]$ 不能包含一个以上的搜索起点,即本文指定的每个搜索起点只能在不同的量测区域内。

2) 当网络已经分割形成了  $n-1$  个子网络,那么分割中止,因为从配电网运行需求角度考虑,馈线首端支路上一般都会配置量测表计,如图 2(b)中的 13-14 支路。

该算法具体的计算流程为:

1) 令  $S$ 表示加权树的  $N$ 个节点集合,  $C_l$ 表示第  $l$  个子网络的节点集合,其中  $l=1,2,\dots,n$ ,  $C_w$ 是算法中用到的临时工作集合。算法的初始条件设置为  $S=\{1,2,\dots,N\}$ ,  $C_1=\phi$ ,  $C_w=\phi$ 及  $l=1$ 。

2) 选择距离根节点长度最大的虚拟叶节点作为具体算法中真正的第一个搜索起点,并将其添加到临时集合  $C_w$ 中。此外,假设虚拟叶节点的最大长度为  $k$ ,并将其用作循环控制指针。

3) 修改循环控制指针  $k=k-1$ 。

4) 找出  $C_w$ 中所有节点的母节点,并对各个不同的母节点(记做节点  $p$ )依次做下述操作。寻找母节点  $p$  的所有虚拟叶节点  $\{j|p=P(j)\}$ ,随后对这些节点依次进行判断,如果有  $T[j]$ 满足如下等式存在  $|W(T[p]) - W(T[N])/n| > |W(T[j]) - W(T[N])/n|$  (8)

选择  $|W(T[j]) - W(T[N])/n|$  值最小的节点  $j$ ,那么子树  $T[j]$ 就构成一个子网络,即  $C_l=T[j]$ ,并修正  $l=l+1$ ,同时将节点  $j$ 和节点集合  $T[j]$ 分别从  $C_w$ 和  $S$ 中删除,再返回步骤 4) 执行。如所有  $C_w$ 节点都不满足式(8),首先判断母节点  $p$  的虚拟叶节点个数是否多于 1 个,如多于 1 个,为了满足约束 1),则选

择 $|W(T[j])-W(T[N])/n|$ 值最小的节点 $j$ ，那么子树 $T[j]$ 就构成一个子网络，即 $C_l=T[j]$ ，并修正 $l=l+1$ ，同时将节点 $j$ 和节点集合 $T[j]$ 分别从 $C_w$ 和 $S$ 中删除，再返回步骤 4) 执行。如果等于 1，则节点 $j$ 从 $C_w$ 中删除，并将其母节点 $p$ 化为虚拟叶节点 $p'$ 后添加到 $C_w$ 中，当所有不同的母线节点测试完毕后进入步骤 5)。

5) 再重新“剪化”加权树，然后搜索长度为 $k$ 的所有虚拟叶节点，并把它们添加到临时集合 $C_w$ 中，随后转到步骤 3)，重复执行步骤 3)到步骤 5)，直到 $k=0$ ，即 $s=\phi$ ，所有节点均被系统地搜索过，算法终止；或 $l=n-1$ ，算法终止，这满足约束条件 2)。

以图 1 实际配电网络为例来说明表计配置方法的完整算法流程：

1) 将此电力网络分为 3 个子网络，计算网络总权重 $W(T[14])$ 是 1257.4，且 $n=3$ ，所以子网络预期的权重为 $W(T[14])/3=419.13$ ， $G$ 为临时记录分割后的最优子网络集， $M$ 为与之对应的平衡指标，初始条件设置为 $G=\phi$ ， $M=0$ ，而其余符号含义同上述步骤 1) ~ 5) 中的定义。

2) 在 80 组搜索起点集合空间中依次选择一组，以 $\{3,10,12\}$ 为例，从而形成图 2(b)所示的加权树，虚拟叶节点 3'具有最大长度 $k=6$ ，所以它是分割算法的第一个搜索起点，将它添加到 $C_w$ 中， $C_w=\{3'\}$ ， $S=\{1,2,\dots,14\}$ 。令循环控制指针 $k=k-1=5$ ， $C_w$ 中的节点 3'母节点 $p=\{7\}$ ，其虚拟叶节点也就只有 3'。对于此节点计算 $|W(T[3'])-419.13|=240.63$ ，而 $|W(T[7])-419.13|=92.47<240.63$ ，不满足式(8)，同时母线节点 7 的虚拟叶节点也只有 3'一个，这样就满足上文提到的网络分割算法约束 1)，而且意味着母节点比子节点更接近预期的子网络权重。所以将虚拟叶节点 3'从 $C_w$ 中删除，同时将母节点 7 化为虚拟叶节点 7'添加到 $C_w$ 中，再重新“剪化”加权树，长度 $k=5$ 的虚拟叶节点只有 7'，故 $C_w=\{7'\}$ ， $p=\{8\}$ ，推得 $|W(T[8])-419.13|=248.07>|W(T[7'])-419.13|=92.47$ 即式(8)成立，这意味着 $T[7']$ 适于构成一个子网络。因此， $C_1=\{3'(1,2,3),4,5,6,7\}$ ，同时 $k=4$ ， $C_w=\{10'\}$ 和 $S=\{8,10'(9,10),11,12,13,14\}$ 作为搜索下一个子网络的初始条件，直到终止条件满足，本组搜索起点集合的分割算法终止。得到 3 个子网络 $C_1\{3'(1,2,3),4,5,6,7\}$ ， $C_2\{8,10'(9,10),11\}$ 和 $C_3\{12,13,14\}$ 。即 3 个量测区域得到，在 7-8 支路，11-12 支路，13-14 支路上分别配置量测表计，从而能够得到 $H$ 阵

$$H = \begin{bmatrix} 139.2 & 277.6 & 166.8 \\ 169.3 & 39 & 155.6 \\ 0 & 33.5 & 276.4 \end{bmatrix}$$

并判断其是否满秩，如不满秩，返回步骤(2)重复执行；如满秩，则计算此次网络分割的平衡指标 $m$

$$m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n |W(C_i) - W(T[N])/n|} \quad (9)$$

并同 $M$ 比较，如 $m>M$ 则将 $m$ 赋给 $M$ ，同时 $G=\{C_1,C_2,C_3\}$ 。否则 $M$ 和 $G$ 不变。

(3) 80 组搜索空间搜索完毕，最终 $G$ 中的子网络为最优配置量测区域，本文恰好得到在 7-8 支路，11-12 支路，13-14 支路上分别配置量测表计最优。

### 3.3 追加表计配置

追加表计配置的目的就是在刚好达到可观性的表计配置基础上，配置表计使得状态估计的性能得到更大程度的改善，本文对此作了如下简单探讨。网络分割法配置支路量测的策略使得配电网满足可观性条件，这样可以根据配置表计的量测，由式(4)和(6)来求解各节点的负荷功率。累计各节点负荷功率，统计求出节点 $i$ 在 $t$ 时刻负荷功率的均值和方差

$$\mu_{i(t)} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n S_{i,d(t)} \quad (10)$$

$$\delta_{i(t)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{d=1}^n (S_{i,d(t)} - \mu_{i(t)})^2} \quad (11)$$

式中 $\mu_{i(t)}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻负荷功率的均值； $\delta_{i(t)}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻负荷功率的方差； $S_{i,d(t)}$ 为节点 $i$ 在第 $d$ 天 $t$ 时刻的负荷功率； $n$ 为总天数。

节点 $i$ 的平均方差可简单计算为

$$\delta_i = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \delta_{i(t)} \quad (12)$$

式中 $\delta_i$ 为节点 $i$ 的平均方差。

所有节点的平均方差计算后，按照由大到小的顺序排列，平均方差大的节点优先追加表计配置。

## 4 算例

本文用IEEE33 节点配电网系统作测试系统。原始网络结构、支路参数和节点负荷功率见文[15]。假设节点负荷功率为平均负荷功率，那么利用视在精确矩法<sup>[11]</sup>得到如图 4 的期望网络结构，并将平均有功功率作为网络节点的权重，网络中的负荷节点编号和原算例相同。假定用户类型的信息见表

2。

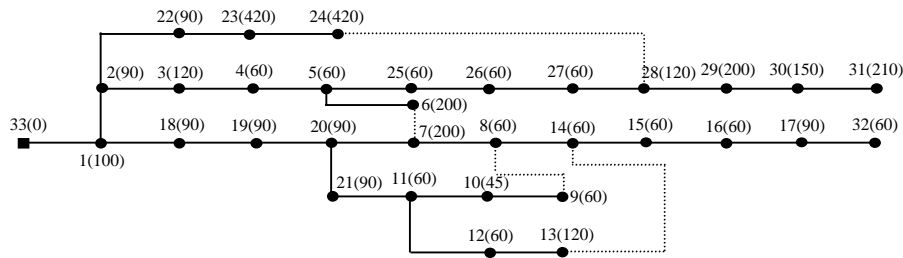


图 4 IEEE33 节点配电网期望结构的加权树

Fig.4 The weighted tree of the expected configuration of the IEEE33 network

表 2 节点用户类型信息

Tab.2 The class information of node loads

类型种类	节点号
1	23,27,6,25,26,21,22
2	31,28,5,11,9,10
3	24,29,4,32,20,12,13
4	7,30,3,14,15,16,19
5	1,17,2,8,18

图 4 的网络总权重为 3715,划分的量测区域等于用户类型数 5,且其权重都应该接近于  $3715/5=743$ 。表 3 为执行分割算法后的最优表计配置结果,量测区域内的节点号中的黑体节点编号为此次最优配置的各个量测区域搜索起点编号,且平衡指标计算为 0.0157,大于其它配置的平衡指标,且  $H$  满秩,满足表计配置最优条件。

表 3 表计配置结果

Tab.3 The results of meter placement

量测区域号	表计配置位置	量测区域内的节点号	权重
1	22-23	<b>23,24</b>	840
2	1-2	2,3,4, <b>5</b> ,6,22,25,26	740
3	26-27	27,28, <b>29</b> ,30,31	740
4	7-20	7,8, <b>14</b> ,15,16,17,32	590
5	1-33	<b>1,18,19,20,21,11,9,10,12,13</b>	805

本表计配置方法在实际应用中有一些问题需要考虑:

(1) 配电网的馈线支路上已经配置自动化开关,自动化开关不但具有控制功能,而且也具有量测功能,那么应该解决开关量测配置和表计配置的协调问题。其实它们的优化目标具有部分一致性,如都考虑到负荷的分布、变化规律等特性,这样使得它们的配置位置有一定的相似性。从经济性和运行需要角度来协调,开关量测配置可以替代一部分可观测的表计配置,也可以把开关量测配置作为可观测的表计配置的冗余,来增加典型负荷模式和节点负荷估计的最优性。

(2) 实际中存在表计故障的几率,这可能使

得网络处于不可观测的状态,但可以统计分析负荷历史记录来得到伪量测作为故障表计量测的补充,从而保持网络可观测。从经济性和运行需要的协调来考虑,这是个有效的解决方法。

(3) 以故障隔离和降损为主要目的的开关重构操作,使网络结构改变。用期望网络结构来解决可观测分析和表计配置问题,这从规划角度来讲,是一个简单、有效的解决办法,而且对于我国多数自动化不完善的配电网,频繁的开关操作是不可能的,多数是面向时间过程(月或季)来操作得到期望网络结构,期望网络结构的可观测性的研究符合实际需求。实际运行中,以故障隔离为目的的重构操作,使网络结构的变化是随机的,按期望网络结构的表计配置不一定总能使网络可观测。在期望网络结构的联络开关处配置量测,如图 4 网络中的 6-7、8-9、13-14、24-28,虽然此量测在期望网络结构下对网络的可观测不起作用,但可以降低网络结构变化时的不可观测的几率;或可以用同(2)的方法,补充伪量测来解决此问题。

利用本文提出的可观测分析及表计配置量测,可以获得某类型用户的典型负荷模式,这个典型负荷模式代表平均意义下的某类用户负荷的变化规律,从而求出节点负荷,使网络可观测。但获得的典型负荷模式合理与否同用户的分类是否正确是紧密相关的,用户分类这项工作是具有挑战性的,本文在研究问题时假定分类正确;而即使是同类型的用户,由于配电网负荷的变化规律缺乏统计性,针对于类型中的具体用户,典型负荷模式来代表其变化规律会产生多大的误差,如何校正以便更合理地满足运行需求,这都是配电网负荷研究具有一定难度的体现。本文的研究侧重于配电网的可观测性和表计配置,只是定性地说明了负荷估计的效果。

## 5 结论

基于电力系统可观测定义,结合配电网的具体特点,提出配电网可观测分析问题的进一步含义,并用启发式的网络分割方法来简单、有效地解决可观测意义下的最优表计配置,在 14 节点实际配电网网络和 IEEE33 节点标准配电网中作了测试计算。本文所提出的可观测分析思路能够折衷考虑经济性和运行需要,而支路表计配置、负荷信息的分析等也为配电网自动化改造提供一个思路,量测信息的综合集成分析是防止出现自动化孤岛的有效手段。

## 参考文献

- [1] Monticelli A, Wu F F. Network observability: theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(5): 1042-1048.
- [2] 阎欣, 单渊达. 基矢量抽取法及可观测性分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 18-22.  
Yan Xin, Shan Yuanda. Base-vector extraction method and its application in observability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 18-22.
- [3] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.  
Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUS[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33.
- [4] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 基于潮流定解条件的电力系统状态估计可观测性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 54-58.  
Zhang Haibo, Zhang Bomeng, Sun Hongbin *et al.* Observability analysis of power system state estimation based on the solvability condition of power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 54-58.
- [5] 于尔铿, 刘广一, 王明俊. 配电系统自动化及其发展(一)——配电管理系统、配电自动化与需方用电管理[J]. 电网技术, 1996, 20(10): 55-58.  
Yu Erkeng, Liu Guangyi, Wang Mingjun. Distribution automation and developing — distribution management system、distribution automation and DSM[J]. Power System Technology, 1996, 20(10): 55-58.
- [6] Chen C S, Hwang J C, Huang C W. Application of load survey systems to proper tariff design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1746-1751.
- [7] Jardini J A, Tahan C M V, Gouvea M R *et al.* Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 375-380.
- [8] Ghosh A K, Lubkeman D L, Jones R H. Load modeling for distribution circuit state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 999-1005.
- [9] Liu Haijun, Yu D, Chiang Hsiao-Dong. A heuristic meter placement method for load estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 913-917.
- [10] Baran M E, Zhu Jinxiang, Kelley A W. Meter placement for real-time monitoring of distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 332-337.
- [11] 蔡中勤, 郭志忠, 陈学允. 配电网重构的均衡视在精确矩法[J]. 继电器, 2000, 28(12): 8-12.  
Cai Zhongqin, Guo Zhizhong, Chen Xueyun. Poised apparent accurate moment method for network reconfiguration in distribution systems[J]. Relay, 2000, 28(12): 8-12.
- [12] Donnett J G, Starkey M, Skillicorn D B. Effective algorithms for partitioning distributed programs[C]. Conference Proceedings of Seventh Annual International Phoenix Conference on Computers And Communications, USA, 1988: 363-368.
- [13] 毕天姝, 焦连伟, 严正, 等. 用于分布式故障诊断系统的新型网络分割法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 16-21.  
Bi Tianshu, Jiao Lianwei, Yan Zheng *et al.* Graph partitioning method for distributed fault section estimation system in power networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 16-21.
- [14] Battiti R, Bertossi A. Greedy, prohibition, and reactive heuristics for graph partitioning[J]. IEEE Transactions on Computers, 1999, 48(4): 361-385.
- [15] Goswami S K, Basu S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.

收稿日期: 2004-12-05.

作者简介:

陈得治(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网负荷模式及运行管理分析;

郭志忠(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 现任许继电力科学研究院院长, 研究方向为电力系统分析与控制、电力市场、光电互感器、数字化电力系统等。