

DOI: 10.7667/PSPC152089

有源配电网 FTU 优化布置研究

戴桂木, 吴在军, 徐俊俊, 窦晓波

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了加强对有源配电网的运行监测和管理, 提出了一种分布式电源接入情形下的有源配电网馈线终端单元 (FTU) 的优化布置算法。首先, 结合有源配电网的特征, 从状态估计方法的角度分析了有源配电网的可观测性原理。将节点负荷功率作为伪量测值, 通过优化 FTU 布置可以提高网络的可观测性, 达到有源配电网完全可观测性要求, 并且在优化布置时考虑了 FTU 分布对有源配电网停电损失的影响。建立了有源配电网的 FTU 优化布置数学模型, 并且采用遗传算法求解所建立的 0-1 整数规划模型。最后通过 33 节点和 60 节点有源配电网仿真算例表明所提优化布置算法可以保证网络的完全可观和供电可靠要求, 并且布置方案在网络结构变化时仍然适用。

关键词: 分布式电源; 有源配电网; FTU 优化布置; 状态估计; 可观测性; 停电损失

Study of FTU optimal placement in the active distribution network

DAI Guimu, WU Zaijun, XU Junjun, DOU Xiaobo

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A FTU optimal placement algorithm in the active distribution network is proposed when the distributed generations are accessed to the active distribution network in order to improve the monitoring and management of the active distribution network. Firstly, according to the characteristics of the active distribution network, the principles of the active distribution network's observability are analyzed from the view of state estimation. The load power is used as the pseudo-measurement and the observability of the active distribution network can be improved by the FTU optimal placement so that the active distribution network can be completely observable. The active distribution network's power loss influence of the FTUs' distribution is considered during the optimal placement. A mathematical model of the FTU optimal placement in the active distribution network is established and the genetic algorithm is used to solve the 0-1 integer programming model. At last, the simulation shows that the optimal placement can guarantee the observability and power supply reliability of the network in the 33-bus and 60-bus active distribution network, and the placement is also adapted to the changes of network structure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677025).

Key words: distributed generation; active distribution network; FTU optimal placement; state estimation; observability; power loss

0 引言

未来电网的发展使得越来越多的分布式电源 (Distributed Generation, DG) 接入配电网, 因此配电网的运行方式也由传统的单电源辐射型配电网转变为有源配电网^[1-2] (又称主动配电网, Active Distribution Network, AND)。DG 出力的间歇性和不确定性将使得有源配电网的潮流分布变化更为频繁, 有源配电网的网络结构也由于 DG 的投切操作

而呈现明显的时变特征, 这些都会给有源配电网的实时监测、运行控制等带来更多新的困难与挑战。近年来, 由于馈线终端单元 (Feeder Terminal Unit, FTU) 具有采集量测信息 (电压幅值量测、电流幅值量测、功率量测等)、开合分段开关等功能, 在配电网信息采集、状态监测、故障定位与隔离^[3-4] 等方面中得到了广泛的应用。然而由于配电网中节点众多、支路复杂, 大量布置 FTU 既不合理也不经济, 同时 FTU 的布置应当适应于有源配电网的网络完全可观性与供电可靠性^[5] 要求, 因此如何实现有源配电网中 FTU 的最优化布置具有十分重要的研究意义。

相角量测单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 在输电网中取得了巨大的应用, 关于 PMU 在输电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51677025); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-13-0129); 国家电网公司科技项目 (SGTYHT/14-JS-188)

网中的优化配置研究也有很多^[6-8]。文献[9-10]将 PMU 应用到配电网中, 研究适应于有源配电网的 PMU 和智能仪表(Smart Metering, SM)两种量测装置在有源配电网中的优化布置问题。但是由于 PMU 的造价较高, 在网络中大量配置会使配电网投资过大。文献[11-13]从网络状态估计的角度对配电网的可观测性进行了分析。文献[11]通过在配电网中布置大量的 SM 量测装置, 提出基于非同步量测数据的配电网状态估计新算法, 提高了配电网状态估计结果的精确性。文献[13]中将 DG 的自身特性与加权最小二乘状态估计有效结合, 建立 DG 出力模型, 在不增加配电网额外量测装置的基础上提高了状态估计精度。文献[14-17]从不同的角度研究了配电网的量测配置问题。文献[16]对负荷进行分类, 通过典型负荷模型估算配电网中节点负荷, 配置表计进行网络分割, 实现保证网络可观测条件下的表计优化配置。但分类比较粗略, 节点负荷的估计精度不高。文献[17]从保证网络的故障可观测角度上分析了 FTU 对故障定位、故障隔离的影响, 求解了在确定数量下的配电网 FTU 配置方法, 没有考虑 FTU 配置数量的最优化。

针对有源配电网, 本文提出了一种满足网络完全可观和供电可靠性的 FTU 优化布置算法。首先从有源配电网的特性角度, 运用状态估计的方法分析了有源配电网的可观测性原理。将所有节点负荷作为状态估计的伪量测值, FTU 采集支路实时量测值与所有 DG 实时出力值, 通过 FTU 的优化布置可以提高有源配电网的观测可靠性, 使其满足网络的完全可观精度指标要求。另外, 分析了 FTU 的分布对有源配电网分区停电损失的影响, 合理的 FTU 布置可以提高有源配电网的供电可靠性。最后通过建立 FTU 优化布置的数学模型, 在 Matlab 软件中采用遗传算法^[18]求解所建立的优化模型, 并且在 33 节点与 60 节点有源配电网系统算例中验证了本文所提算法的正确性和有效性。

1 有源配电网可观测性原理

1.1 有源配电网的状态估计

对于一个 N 节点、 b 条支路的有源配电网来说, 选取网络节点电压幅值 U 、相角 θ 为状态变量, 如果所有状态变量可以通过系统内的量测量求解得到, 则称该有源配电网可观测。在有源配电网中, 系统量测量和状态变量之间关系可以通过如下量测方程表示。

$$\mathbf{z}=\mathbf{h}(\mathbf{x})+\mathbf{v} \quad (1)$$

式中: \mathbf{z} 为量测量矢量; \mathbf{x} 为电压矢量; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为非线

性量测函数; \mathbf{v} 为量测误差矢量。

从数值分析的角度分析, 如果满足

$$\dim(\mathbf{z}) \geq \dim(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中, $\dim(\bullet)$ 表示向量的维数。

则系统中所有节点的电压都可以通过量测方程求解得到, 因此该有源配电网系统是可观的。然而一般配电网中配置的实时量测装置较少, 所以为了使得系统满足网络可观条件, 一般在配电网中要运用大量的伪量测量数据。因此对于有源配电网来说, 本文中的量测量 \mathbf{z} 主要由两部分组成。

$$\mathbf{z}=[\mathbf{z}_1 \ \mathbf{z}_2]^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{z}_1 为伪量测量, 为节点负荷功率预测值; \mathbf{z}_2 为实时量测量, 为支路上 FTU 量测量, 包含: 节点电压幅值量测、支路电流幅值量测、支路功率量测。伪量测量 \mathbf{z}_1 的量测关系为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入有功和无功; $\mathbf{Y}=\mathbf{G}+\mathbf{jB}$ 为系统节点导纳矩阵; U_i 、 θ_i 为节点 i 电压幅值和相角。

FTU 量测量 \mathbf{z}_2 的量测关系为

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} = -U_i^2 B_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ U_i = U_i \\ I_{ij} = \sqrt{(G_{ij}^2 + B_{ij}^2)(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_{ij} 、 Q_{ij} 和 I_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的节点 i 侧量测的支路有功、无功和电流幅值。

所以通过在有源配电网中布置 FTU, 网络中量测量的维数将大于状态量的维数, 即

$$\dim(\mathbf{z}) > \dim(\mathbf{x}) \quad (6)$$

需要提及的是, 在满足式(6)的量测方程组中, 由于所有的量测量都存在随机误差, 这样不可能通过直接求解量测方程组得到所有状态量的精确值, 但是可以通过状态估计的方法求出状态量的最优拟合估计值。

加权最小二乘法(Weighted Least Square, WLS) 是进行状态估计求解的最常用方法, 其实质是以各量测量的误差平方和最小为目标。

$$\min J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (7)$$

式中: \mathbf{z} 为 m 维量测矢量; \mathbf{x} 为 n 维电压矢量, 且有 $m > n$; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为 \mathbf{z} 和 \mathbf{x} 之间的非线性关系; \mathbf{W} 为 $m \times$

m 维量测权重矩阵。

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & w_{m-1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & w_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, w_i 为第 i 个量测量对应的权重值。由于各量测量的精度不同, 对不同的量测赋予不同的权重。FTU 量测值精度较高, 取权重较大; 而伪量测量精度较低, 通常设定较小的量测权重抑制其对状态估计结果的影响。

根据文献[12], 采用 WLS 的状态估计可以通过如下的形式进行迭代求解, 得到所有状态变量估计值。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}^{(k)} = [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{W} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})]^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{W} [z - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})] \\ \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(k)}}$, 为第 k 次迭代的量测雅克比矩阵; $\mathbf{x}^{(k)}$ 为第 k 次迭代求解得到的状态变量。迭代收敛的条件为 $\max_i |\Delta \mathbf{x}^{(k)}| \leq \varepsilon$, ε 为给定的迭代收敛精度, 本文中取值为 $\varepsilon=10^{-5}$ 。

1.2 有源配电网完全可观性定义

有源配电网中布置 FTU 后, 经过 l 次迭代满足收敛标准时, 求得 $\hat{\mathbf{x}}^{(l)}$, 即为最优状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 。但是节点电压的估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 和节点电压的潮流真值 \mathbf{x} 之间是有偏差的, 因此本文引入两个偏差指标来描述有源配电网估计值与潮流真值的偏差。

(1) 最大电压幅值偏差

$$\sigma_U = \max_i \left\{ \left| \frac{U_i - \hat{U}_i}{U_i} \right| \right\} \quad (10)$$

式中, U_i 和 \hat{U}_i 分别为第 i 个节点电压幅值的真值和估计值。

(2) 最大电压相角偏差

$$\sigma_\theta = \max_i \left\{ \left| \theta_i - \hat{\theta}_i \right| \right\} \quad (11)$$

式中, θ_i 和 $\hat{\theta}_i$ 分别为第 i 个节点电压相角的真值和估计值。

所以, 本文中定义有源配电网完全可观为: 一个包含 N 节点、 b 条支路的有源配电网中所有的量测量(包括伪量测量和实时量测量)如果通过状态估计方法求得的所有节点电压的最优估计值和潮流真值之间满足 $\sigma_U \leq \sigma_{U,\text{ref}}$, $\sigma_\theta \leq \sigma_{\theta,\text{ref}}$, 则称该有源配电网完全可观。其中 $\sigma_{U,\text{ref}}$ 、 $\sigma_{\theta,\text{ref}}$ 为给定电压幅值

和相角偏差指标参考值。

2 有源配电网的供电可靠性分析

在配电网中, 一般 FTU 会配合支路上的分段开关一起使用。在网络中发生故障后, 配电自动化系统确定故障位置后会对围成故障区域的 FTU 下发开断支路上分段开关指令, 从而实现故障区域的隔离。因此, FTU 的合理布置将会提高有源配电网的供电可靠性, 所以在有源配电网 FTU 的优化布置中, 应当充分考虑网络 FTU 规划布点对故障停电损失的影响。如图 1 所示为一个简单的有源配电网, 其中通过网络支路上布置了一定数量的 FTU, 将配电网划分为多个分区。

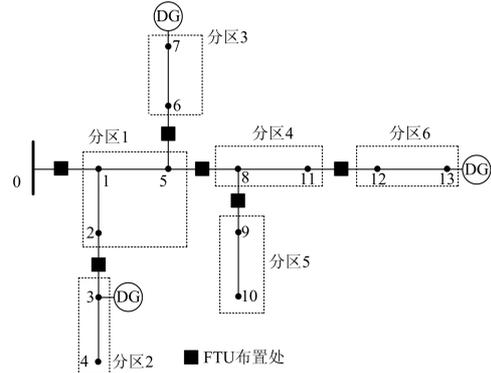


图 1 有源配电网区域划分

Fig. 1 Region division of active power distribution network

图 1 中, 有源配电网中接入 3 个 DG, 整个网络划分为 6 个分区, 且每个分区由若干个 FTU 作为边界所围成。当网络中发生故障后, FTU 将动作使得故障分区和正常电网隔离, 故障所在分区停电。对于每个分区来说, 当区域中的任何一条支路上发生故障, 都将导致该分区被隔离, 从而分区内的所有负荷节点都将失去供电。

本文采用负荷功率标幺值 S_j 表征节点 j 的停电损失, S_j 越大, 表明该节点的停电损失越大。因此定义第 i 个分区发生故障后的该分区停电损失 C_i 为

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^m S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (12)$$

式中: m 为第 i 个分区的负荷节点总数; n 为网络中所有负荷节点总数。分区停电损失 C_i 可以认为是该停电区域负荷占总负荷的百分比。

对于有源配电网的所有分区, 本文以网络中最大的分区停电损失表征有源配电网的供电可靠性, 即定义

$$C = \max_i \{C_i\} \quad (13)$$

C 值越小, 则说明配电网的供电可靠性越高。

3 FTU 优化布置

3.1 模型建立

通过上节的分析可知, 对于有源配电网, 通过在网络中有选择性地布置 FTU 既可以提高网络的可观性, 同时也可以减少网络故障下分区的停电损失, 提高供电可靠性。另外, 在有源配电网中 DG 经常会发生投切操作, 从而导致有源配电网的网络结构经常发生改变, 所以 FTU 的布置应当在各种网络结构下都适用。因此本文从保证有源配电网完全可观测量和网络供电可靠性的角度, 以实现布置的 FTU 数量最少为目标函数建立优化布置数学模型如下。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^B b_i + y_{DG} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \max_j \{\sigma_{U,j}\} \leq \sigma_{U,\text{ref}} \\ \max_j \{\sigma_{\theta,j}\} \leq \sigma_{\theta,\text{ref}} \\ C \leq R_{\text{max}} \\ b_1 = 1 \\ b_i \in \{0,1\} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: b_i 指支路是否布置 FTU, $b_i=1$ 表示该支路布置 FTU; B 为网络中支路总数; y_{DG} 为网络中 DG 的数量。主要是由于在有源配电网中 DG 的出力随机性较大, 且 DG 的投切操作频繁, 所以在 DG 接入点应当配置 FTU 加强对 DG 的监测, 因此在所有 DG 接入点都布置 FTU, 目标函数中以 y_{DG} 项表示。 $\sigma_{U,j}$ 、 $\sigma_{\theta,j}$ 分别为第 j 种网络结构下的电压幅值偏差和相角偏差指标。 $\sigma_{U,\text{ref}}$ 、 $\sigma_{\theta,\text{ref}}$ 为给定的网络完全可观电压幅值和相角的要求值, R_{max} 为给定的供电可靠性要求值。一般变电站出口处都要求配置 FTU, 所以将 $b_1=1$ 加入约束条件。

3.2 模型求解

FTU 的优化布置模型是一个典型的 0-1 整数非

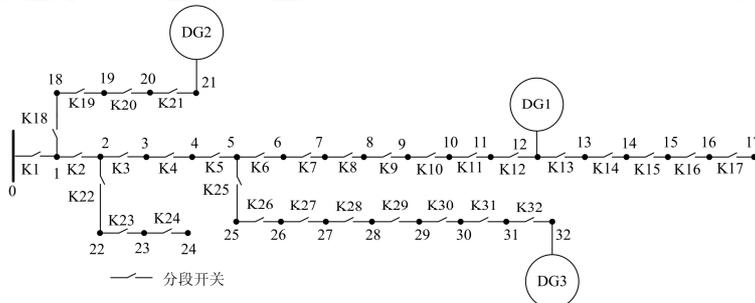


图 3 33 节点有源配电网

Fig. 3 33-bus active distribution network

线性规划问题, 本文采用文献[18]中提及的遗传算法求解该优化布置模型。遗传算法是将待求的优化求解模型通过模拟生物自然进化过程, 经过基因编码、选择、交叉、变异、迭代等一系列操作, 从而搜索得到最优解的一种方法。本文的求解过程流程图如图 2 所示。

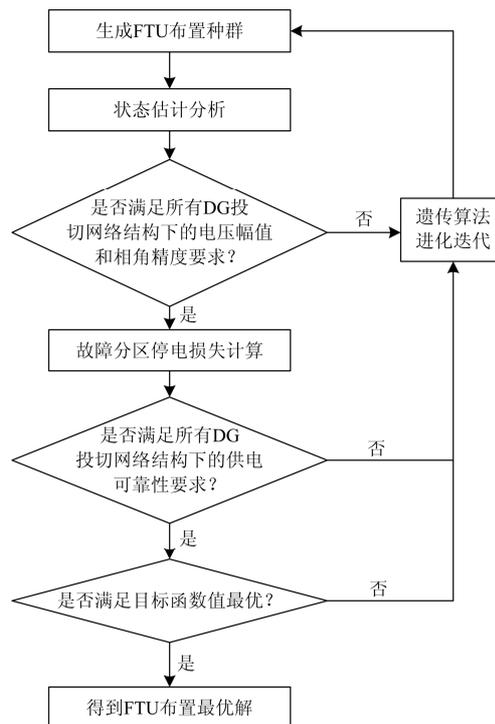


图 2 优化求解流程图

Fig. 2 Flow chart of the optimal solution

4 实例分析

在 33 节点和 60 节点有源配电网中进行算例分析, 2 个有源配电网系统中均接入 3 个 DG, 且所有 DG 以 PQ 控制方式接入。本文在 Matlab 软件环境中进行仿真分析, 验证了本文所提算法的正确性和合理性。33 节点有源配电网和 60 节点有源配电网分别如图 3、图 4 所示, 表 1 所示为有源配电网中接入的各个 DG 详细信息。

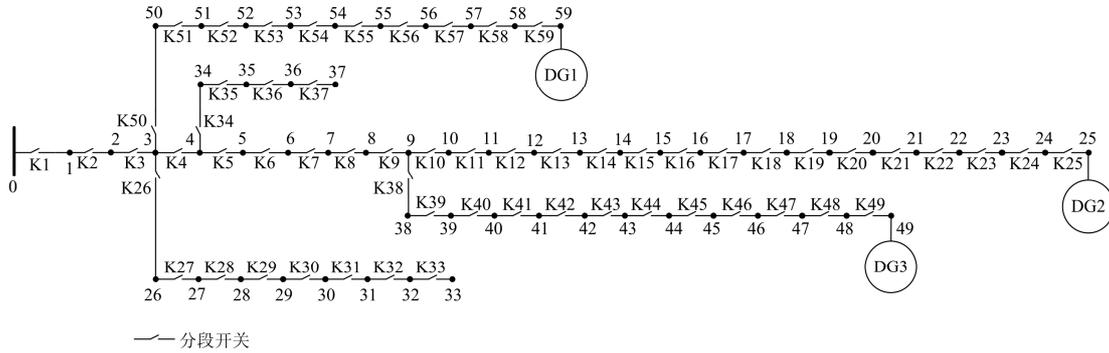


图 4 60 节点有源配电网

Fig. 4 60-bus active distribution network

表 1 接入 DG 信息表

Table 1 Information table of the accessed DGs

系统	DG 编号	DG 接入节点位置	DG 接入容量(P、Q)
33 节点	1	节点 12	260 kW, 135 kVar
有源配	2	节点 21	190 kW, 90 kVar
电网	3	节点 32	360 kW, 440 kVar
60 节点	1	节点 59	450 kW, 180 kVar
有源配	2	节点 25	600 kW, 220 kVar
电网	3	节点 49	300 kW, 200 kVar

对于有源配电网中的量测量误差，可以认为是在潮流真值的基础上添加符合正态分布特性的随机噪声。本文中伪量测量为节点负荷功率值，根据历史负荷数据预测得到，算例中取最大预测误差为 40%；DG 出力值和布置 FTU 支路量测值为实时量测得到，精度较高，本文算例中取 FTU 量测节点电压幅值、支路电流幅值最大误差为 0.5%，支路功率最大误差为 1%。

表 2 和表 3 分别为 33 节点以及 60 节点有源配电网算例中所有节点负荷标么值信息，其中功率基准值 SB=1 MVA。

表 2 33 节点有源配电网负荷信息表

Table 2 Load information of 33-bus active distribution network

节点	0	1	2	3	4	5	6
负荷	0	0.12	0.1	0.14	0.07	0.06	0.22
节点	7	8	9	10	11	12	13
负荷	0.22	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.14
节点	14	15	16	17	18	19	20
负荷	0.06	0.06	0.06	0.1	0.1	0.1	0.1
节点	21	22	23	24	25	26	27
负荷	0.1	0.1	0.47	0.47	0.07	0.07	0.06
节点	28	29	30	31	32		
负荷	0.14	0.63	0.17	0.23	0.07		

表 3 60 节点有源配电网负荷信息表

Table 3 Load information of 60-bus active distribution network

节点	0	1	2	3	4	5	6
负荷	0	0	0.07	0	0.17	0.07	0.15
节点	7	8	9	10	11	12	13
负荷	0.09	0.04	0.09	0.18	0.18	0.09	0.09
节点	14	15	16	17	18	19	20
负荷	0	0.08	0.14	0.13	0	0.13	0.13
节点	21	22	23	24	25	26	27
负荷	0.12	0.06	0.07	0	0.17	0.07	0.14
节点	28	29	30	31	32	33	34
负荷	0.11	0.16	0.13	0.17	0.25	0.07	0
节点	35	36	37	38	39	40	41
负荷	0.17	0.11	0.11	0.16	0.18	0.13	0
节点	42	43	44	45	46	47	48
负荷	0.13	0	0.12	0.16	0.15	0.08	0
节点	49	50	51	52	53	54	55
负荷	0.27	0.16	0.14	0	0.16	0.19	0.21
节点	56	57	58	59			
负荷	0	0.14	0.14	0.16			

2 个有源配电网系统中均有 3 个 DG 接入，因此 DG 的投切将会导致 8 种可能的网络结构：

- (1) DG1、DG2、DG3 全部切出；
- (2) DG1 接入，DG2、DG3 切出；
- (3) DG2 接入，DG1、DG3 切出；
- (4) DG3 接入，DG1、DG2 切出；
- (5) DG1、DG2 接入，DG3 切出；
- (6) DG1、DG3 接入，DG2 切出；
- (7) DG2、DG3 接入，DG1 切出；
- (8) DG1、DG2、DG3 全部接入。

本文算例中取 $\sigma_{U,ref} = 0.01$ ， $\sigma_{\theta,ref} = 0.5$ ， $R_{max} = 0.15$ 。表 4 所示为 FTU 优化布置结果。

表 4 FTU 优化布置结果

Table 4 Results of FTU optimal placement

仿真系统	DG 接入节点	FTU 数量	FTU 布置位置
33 节点有源配电网	12、21、32	12	支路 0-1、支路 3-4、支路 5-6、支路 11-12、支路 18-19、支路 2-22、支路 23-24、支路 28-29、支路 29-30; DG 接入点 12、21、32;
			支路 0-1、支路 5-6、支路 8-9、支路 11-12、支路 16-17、支路 20-21、支路 26-27、支路 30-31、支路 34-35、支路 37-38、支路 42-43、支路 46-47、支路 50-51、支路 53-54、支路 56-57; DG 接入点 25、49、59;
60 节点有源配电网	25、49、59	18	支路 0-1、支路 5-6、支路 8-9、支路 11-12、支路 16-17、支路 20-21、支路 26-27、支路 30-31、支路 34-35、支路 37-38、支路 42-43、支路 46-47、支路 50-51、支路 53-54、支路 56-57; DG 接入点 25、49、59;

各种网络结构下的电压幅值和相角最大偏差指标如表 5 所示, 表 6 和表 7 分别列出了 33 节点和 60 节点有源配电网在表 4 中 FTU 布置下的所有分区的停电损失结果信息。

表 5 各种网络结构下的最大偏差指标

Table 5 Maximum deviation index of various network structures

网络结构	33 节点有源配电网		60 节点有源配电网	
	最大电压幅值偏差(σ_U)	最大电压相角偏差(σ_θ)	最大电压幅值偏差(σ_U)	最大电压相角偏差(σ_θ)
1	0.006 132	0.464 722	0.005 775	0.185 106
2	0.005 104	0.437 600	0.005 738	0.203 743
3	0.006 117	0.448 984	0.004 119	0.152 763
4	0.004 877	0.391 428	0.004 869	0.167 408
5	0.005 090	0.421 588	0.004 116	0.145 761
6	0.004 580	0.367 840	0.004 862	0.154 356
7	0.004 876	0.376 373	0.004 006	0.122 033
8	0.004 579	0.352 860	0.004 004	0.114 165

表 6 33 节点有源配电网分区停电损失结果表

Table 6 Results of each region's power loss in 33-bus

active distribution network

分区	分区中包含节点	停电损失 C_i
1	1、2、3、18	0.138
2	4、5、25、26、27、28	0.137
3	6、7、8、9、10、11	0.101
4	12、13、14、15、16、17	0.108
5	19、20、21	0.066
6	22、23	0.104
7	24	0.104
8	29	0.138
9	30、31、32	0.104

表 7 60 节点有源配电网分区停电损失结果表

Table 7 Results of each region's power loss in 60-bus

active distribution network

分区	分区中包含节点	停电损失 C_i
1	1、2、3、4、5、26、34、50	0.083 5
2	6、7、8	0.043 3
3	9、10、11	0.069 6
4	12、13、14、15、16	0.061 8
5	17、18、19、20	0.060 3
6	21、22、23、24、25	0.064 9
7	27、28、29、30	0.083 5
8	31、32、33	0.075 7
9	35、36、37	0.060 3
10	38、39、40、41、42	0.100 5
11	43、44、45、46	0.066 5
12	47、48、49	0.054 1
13	51、52、53	0.046 4
14	54、55、56	0.061 8
15	57、58、59	0.068 0

从表 4 可以看出, 对于有源配电网来说, 通过在网络中布置一定数量 FTU 装置可以实现配电网可观。算例分析中, 在 33 节点有源配电网, 最少只需要布置 12 个 FTU 即可满足系统的完全可观测量要求, 而在 60 节点有源配电网中则需要布置 18 个 FTU 才能满足完全可观要求, 随着系统规模的扩大, 需要布置的 FTU 数量也有所增大。在系统中所有的 DG 接入点布置 FTU, 可以加强对 DG 出力以及 DG 并、离网操作的监测, 同时也可以提高系统的状态估计精度; 在支路上布置的 FTU 可以获取实时支路量测数据, 可以提高网络的可观性。对于 DG 投切形成的各种有源配电网网络结构, FTU 的布置均能满足有源配电网完全可观: 其中 33 节点有源配电网算例中最大的电压幅值偏差为 0.006 132, 最大的电压相角偏差为 0.464 722, 60 节点有源配电网中最大的电压幅值偏差为 0.005 775, 最大的电压相角偏差为 0.185 106。从表 6 和表 7 的停电损失数据中可以知道, 在 33 节点有源配电网中布置了 12 个 FTU 后, 网络被划分为 9 个分区, 分区在发生故障时的最大分区停电损失为 0.138; 60 节点有源配电网中布置 18 个 FTU 后, 网络可以划分为 15 个分区, 且最大的分区停电损失为 0.100 5, 均能满足算例中有源配电网的最大停电负荷占总负荷小于等于 15% 的要求。

5 结论

区别于传统配电网,随着分布式电源的接入,有源配电网的运行方式和网络特性都发生了改变,因此加强对有源配电网的监测显得尤为重要。由于配电网的节点和支路数众多,因此考虑布置尽可能少 FTU 装置来获取量测点电气量信息,对实现有源配电网完全可观和提高供电可靠性都具有重要的意义。本文从实际运用的角度出发,提出了一种适用于有源配电网的 FTU 优化布置算法。本文主要实现了如下目标:

(1) 分析了有源配电网可观测原理,从状态估计方法角度给出了有源配电网完全可观定义,并且定义了有源配电网的供电可靠性指标,建立了有源配电网的 FTU 优化布置模型。

(2) 通过实例分析表明,FTU 的布置可以加强对有源配电网的监测。在 33 节点和 60 有源配电网算例中分别只需要最少布置 12 个 FTU 和 18 个 FTU 即可实现完全可观要求和供电可靠性要求,且得到的 FTU 优化布点对于有源配电网的各种网络结构都适用,同时也表明本文提出的有源配电网 FTU 优化算法具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 赵波,王财胜,周金辉,等.主动配电网现状与未来发展[J].电力系统自动化,2014,38(18):125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [2] 张建华,曾博,张玉莹,等.主动配电网规划关键问题与研究展望[J].电工技术学报,2014,29(2):13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [3] 付家才,陆青松.基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):100-105.
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [4] 刘鹏程,理新利.基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [5] 刘仲,牟龙华,杨智豪.大停电后含分布式电源的电网分区及负荷恢复方案[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):55-61.
LIU Zhong, MU Longhua, YANG Zhihao. Scheme for partitioning and load restoration of power grid containing distributed generation after blackout[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 55-61.
- [6] 王家林,夏立,吴正国,等.电力系统 PMU 最优配置新方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(6):1-5.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. New method of optimal PMU placement of the power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 1-5.
- [7] 徐岩,甄静.基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):55-62.
XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.
- [8] 李新振,滕欢.考虑潮流方程直接可解的 PMU 最优配置[J].电力系统保护与控制,2009,37(16):63-67.
LI Xinzhen, TENG Huan. Optimal configuration of PMU considering direct solvable power flow[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 63-67.
- [9] LIU Junqi, PONCI F, MONTI A, et al. Optimal meter placement for robust measurement system in active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(5): 1096-1105.
- [10] LIU Junqi, TANG Junjie, PONCI F, et al. Trade-offs in PMU deployment for state estimation in active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 915-924.
- [11] ALIMARDANI A, THERRIEN F, ATANACKOVIC D, et al. Distribution system state estimation based on nonsynchronized smart meters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2919-2928.
- [12] 卫志农,陈胜,孙国强,等.含多类型分布式电源的主动配电网分布式三相状态估计[J].电力系统自动化,2015,39(9):68-74.
WEI Zhinong, CHEN Sheng, SUN Guoqiang, et al.

- Distributed three-phase state estimation for active distribution network integrated with different types of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 68-74.
- [13] 王韶, 江卓翰, 朱姜峰, 等. 计及分布式电源接入的配电网状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 82-87.
WANG Shao, JIANG Zhuohan, ZHU Jiangfeng, et al. State estimation of distribution network involving distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 82-87.
- [14] 高亚静, 张占龙, 吴文传, 等. 配电网量测配置评估及优化[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 39-44.
GAO Yajing, ZHANG Zhanlong, WU Wenchuan, et al. Evaluation and optimization of measurement configuration in distribution system[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 39-44.
- [15] 徐臣, 余贻鑫. 提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 17-21.
XU Chen, YU Yixin. Evaluation and optimization of meter placement to enhance distribution state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 17-21.
- [16] 陈得治, 郭志忠. 基于表计配置的配电网可观性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 35-41.
CHEN Dezhi, GUO Zhizhong. Distribution system network observability analysis based on meter placement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 35-41.
- [17] 陈得宇, 沈继红, 张仁忠, 等. 配电网故障可观测的实现及馈线终端单元配置方法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 94-99.
CHEN Deyu, SHEN Jihong, ZHANG Renzhong, et al. Realization of fault observability of distribution system and corresponding optimal configuration method of feeder terminal units[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 94-99.
- [18] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的故障行波定位装置的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 77-83.
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of travelling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-83.

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-03-31

作者简介:

戴桂木(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与主动配电网; E-mail: daigm12@126.com

吴在军(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为变电站自动化、分布式发电与主动配电网、电能质量分析与控制;

徐俊俊(1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为主动配电网。

(编辑 张爱琴)