

含有微电网的配电网规划方法

戴 上¹, 张 焰¹, 祝达康²

(1. 上海交通大学电气工程学院, 上海市 200240; 2. 上海市电力公司, 上海市 200122)

摘要: 微电网不仅包括多种负荷, 还包括可再生电源、固定电源等多种分布式电源, 这些分布式电源随时间具有较大的不确定性, 因此微电网在不同时间段内可能具有不同的发电特性或用电特性。文中建立了微电网发电及用电特性的数学模型, 并在此基础上对含有小比例微电网的配电网规划方法进行研究, 包括含有微电网的配电网变电站定容、定址方法, 微电网接入的限制条件, 以及含有微电网的配电网网架规划模型。最后以某地区配电网规划为例进行计算分析和结果校验。

关键词: 微电网; 分布式电源; 发电特性; 用电特性; 配电网规划

0 引言

微电网^[1-3]是一组由分布式电源、负荷、储能装置和控制装置构成的系统。微电网所含有的分布式电源包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏发电、风力发电机、蓄电池和高速飞轮等^[4]。

微电网接入配电网不仅可以充分利用配电网内部的绿色可再生能源, 还可以大大提高整个电网的安全性, 预防电网大停电事故的发生, 是中国建成坚强智能电网的一个重要环节。目前, 国内外对微电网已有较多研究与应用: 文献[5]介绍了日本已经建成的多个微电网示范工程; 文献[6]提出了一种适合日本微电网的控制方法; 文献[7]为了应对自然或者人为因素对电网的威胁, 提出了一种适合美国佛罗里达州的微电网模型, 以增强电网的安全性; 文献[8]对微电网接入配电网后产生的诸多问题进行了研究; 文献[9]提出了微电网接入配电网后待研究的4个方面问题; 文献[10]建立了含有微电网的配电系统故障后的供电恢复模型。目前国内外对微电网接入后配电网规划方法的研究还鲜有报道。

微电网高渗透^[8]将对配电网潮流和短路电流产生很大的影响。在缺乏相应的硬件条件、保护控制和运行管理办法时, 微电网大量接入配电网甚至可能导致电网失稳。本文认为微电网大量接入中国配电网还需要较长的时间, 需要分阶段循序渐进。目前最有意义的应是对微电网接入初期, 即小比例微电网接入后的配电网规划方法进行研究, 该阶段的指导思想应为合理地将微电网接入配电网, 尽量降低微电网接入对配电网的影响, 在运行实践中不断积累微电网的接入经验。首先需要建立微电网对于

外部配电网的发电及用电特性数学模型。

1 微电网发电及用电特性数学模型

根据美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)提出的微电网结构, 可以将微电网内部分为3个部分: 负荷、可再生电源(光伏发电、风力发电等)与储能设备、固定电源(微型燃气轮机等)。

本文重点建立以城市居住区为主要供电对象的微电网发电及用电特性模型, 包括3个部分: 居民负荷与太阳能光伏发电(包括储能设备)整体的发电及用电特性模型; 商业负荷的用电特性模型; 微型燃气轮机的发电特性模型。根据太阳能利用较为发达的日本九州地区的经验, 在城市居住区, 太阳能光伏发电是与居民用户相结合的, 太阳能光伏电池板直接架设在用户屋顶, 所以本文将居民负荷与太阳能光伏发电作为一个整体。考虑到大多数城市的风力资源相对太阳能资源较为匮乏, 以上海市为例, 上海市区常年风速很少超过5级, 在这种风速下风力发电机的工作效率是很低的, 在此类城市的配电网中大量接入风力发电机是不经济的。因此, 本文建立的微电网发电及用电特性模型暂不考虑风力发电机组。

太阳能光伏发电量随时间的变化具有不确定性, 因此整个微电网的发电及用电特性也会随时间有较大变化。本文建立的反映微电网发电及用电特性的数学模型如下:

$$p(t_n) = p_1(t_n) + p_2(t_n) - p_3(t_n) \quad (1)$$

式中: $p(t_n)$ 为整个微电网在不同时间段内的发电量或用电量预测值; n 为1年中各时间段标号, 本文将1年按月份划分为3个部分: 6月—8月(夏季)、3月—5月与9月—11月(春秋季)、12月—次年2月(冬季); 每天按小时划分为3个部分: 23:00—

次日 09:00, 17:00—23:00, 09:00—17:00, 则一共将 1 年划分为 3×3 个时间段, 即 $n = 1, 2, \dots, 9$; $p_1(t_n)$ 为各时间段内居民负荷与太阳能光伏发电所构成的整体的发电量及用电量预测值; $p_2(t_n)$ 为各时间段内商业负荷用电量预测值; $p_3(t_n)$ 为各时间段内微型燃气轮机发电量预测值。

$p_1(t_n)$ 可由下式计算:

$$p_1(t_n) = \alpha_{1n} P_{1\max} \quad (2)$$

式中: $P_{1\max}$ 为规划目标年微电网内部居民负荷的年最大负荷预测数据; α_{1n} 为规划地区居民负荷与太阳能光伏发电所构成的整体分别在 9 个时间段内平均每小时用电量或发电量与根据居民负荷年最大负荷预测数据 $P_{1\max}$ 计算得到的每小时用电量的比值, α_{1n} 为正表示该整体呈用电特性, 为负表明该整体呈发电特性, 具体数值见表 1。

表 1 α_{1n} 数值
Table 1 Data of α_{1n}

| 日内时间段 | 6月—8月 | 3月—5月 9月—11月 | 12月— 次年2月 |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 23:00—次日 09:00 | $\alpha_{11} = 0.521$ | $\alpha_{14} = 0.519$ | $\alpha_{17} = 0.871$ |
| 17:00—23:00 | $\alpha_{12} = 0.484$ | $\alpha_{15} = 0.272$ | $\alpha_{18} = 0.910$ |
| 09:00—17:00 | $\alpha_{13} = -0.366$ | $\alpha_{16} = -0.568$ | $\alpha_{19} = -0.144$ |

式(2)可以较为准确地反映居民负荷和太阳能光伏发电整体的发电和用电特性, 通过引入表 1 中 α_{1n} 的统计数据, 将 $p_1(t_n)$ 根据太阳能光伏发电量强弱分为 9 个典型的时间段分别表示, 有效解决了太阳能光伏发电随时间变化较大而不易表达的特点。

$p_2(t_n)$ 可由下式计算:

$$p_2(t_n) = \alpha_{2n} P_{2\max} \quad (3)$$

式中: $P_{2\max}$ 为规划目标年微电网内部商业负荷的年最大负荷预测数据; α_{2n} 为规划地区商业负荷分别在 9 个时间段内的平均每小时用电量与根据商业负荷年最大负荷预测数据 $P_{2\max}$ 计算得到的每小时用电量的比值, 具体数值见表 2。

表 2 α_{2n} 数值
Table 2 Data of α_{2n}

| 日内时间段 | 6月—8月 | 3月—5月 9月—11月 | 12月— 次年2月 |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 23:00—次日 09:00 | $\alpha_{21} = 0.072$ | $\alpha_{24} = 0.061$ | $\alpha_{27} = 0.118$ |
| 17:00—23:00 | $\alpha_{22} = 0.599$ | $\alpha_{25} = 0.538$ | $\alpha_{28} = 0.900$ |
| 09:00—17:00 | $\alpha_{23} = 0.739$ | $\alpha_{26} = 0.345$ | $\alpha_{29} = 0.758$ |

$p_3(t_n)$ 可由下式计算:

$$p_3(t_n) = \begin{cases} P_{3\max} & n = 2, 3, 5, 6, 8, 9 \\ 0 & n = 1, 4, 7 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{3\max}$ 为微电网内所有微型燃气轮机额定功率之和; $p_3(t_n) = P_{3\max}$ ($n = 2, 3, 5, 6, 8, 9$) 表示微型燃

气轮机在对应时间段(高电价时段)内以额定功率输出, $p_3(t_n) = 0$ ($n = 1, 4, 7$) 表示微型燃气轮机在另一些时间段(低电价时段)内不工作。

表 1 和表 2 的数据是本文参照日本九州地区熊本市太阳能居民用电统计数据以及商业用户用电统计数据计算得到的(目前中国还暂时缺少该类数据的积累)。

假设微电网负荷总量为 $P_{\max} = P_{1\max} + P_{2\max}$, 微型燃气轮机额定功率之和 $P_{3\max}$ 占微电网总负荷比例固定(这里设定为 0.2), 则 $P_{1\max}$ 与 $P_{2\max}$ 的比例不同, 式(1)数学模型的发电及用电特性也会有所不同。如果 $P_{2\max}$ 所占比例较大, 整个微电网可能不会出现由用户倒送功率给配电网的情况。为了使得本文构造的反映微电网发电及用电特性的数学模型更加具有说明意义, 即微电网模型既有呈现用电特性的时刻, 也有呈现发电特性的时刻, 这里取 $P_{1\max} : P_{2\max} : P_{3\max} = 0.8 : 0.2 : 0.2$ 。将表 1 与表 2 中的 α_{1n} 与 α_{2n} 的数据代入式(1)~式(4)中, 计算得到微电网对外部配电网呈现的发电及用电特性的数学模型如下:

$$p(t_n) = \begin{cases} 0.431P_{\max} & n = 1 \\ 0.307P_{\max} & n = 2 \\ -0.345P_{\max} & n = 3 \\ 0.427P_{\max} & n = 4 \\ 0.125P_{\max} & n = 5 \\ -0.585P_{\max} & n = 6 \\ 0.720P_{\max} & n = 7 \\ 0.708P_{\max} & n = 8 \\ -0.164P_{\max} & n = 9 \end{cases} \quad (5)$$

2 含有微电网的配电网变电站规划

配电网变电站规划包括变电站定容与定址 2 个方面。

2.1 变电站定容

假设各变电站采用相同数量和容量的变压器, 单台变压器容量为 S_i , 各变电站所含变压器台数为 N , 待规划配电网在规划目标年不包括微电网负荷的负荷总量为 P_{total}' , 微电网负荷总量为 P_{\max} , 内部微型燃气轮机额定功率之和为 $0.2P_{\max}$, 变压器容载比为 w , 则计算出所需变电站数量 m 为:

$$m = \frac{[P_{\text{total}}' + (P_{\max} - 0.2P_{\max})]w}{S_i N} \quad (6)$$

式(6)中 $P_{\max} - 0.2P_{\max}$ 为微电网对整个外部配电网所显示出来的最大负荷。在计算该数值时, 微型燃气轮机作为固定发电机, 可以在微电网负荷较大的时候随时投入, 应计及在内; 而可再生电源受时

间和天气影响很大,不能够随时投入,所以不计及在内。

单台变压器容量 S_i 和各变电站所含变压器台数 N 如未事先给定,则可以在满足供电的前提下由所有变压器价格之和最小来确定。

2.2 变电站定址

本文以最小负荷距为原则,利用多源连续选址方法^[11]对含有微电网的配电网变电站进行选址。

假设满足式(5)模型的微电网接入配电网,利用式(7)可以得到该微电网在最小负荷距原则中的计算负荷 $P_{\text{micro}} = 0.148P_{\text{max}}$ 。

$$P_{\text{micro}} = \frac{\sum_{n=1}^9 p(T_n) T_n}{\sum_{n=1}^9 T_n} \quad (7)$$

式中: T_n 为对应时段 t_n 的时间长度。

可以看出, P_{micro} 为平均负荷。与 P_{micro} 的概念相对应,本文应用各负荷节点年最大负荷预测结果乘以负荷率 λ (取 0.8) 来模拟各负荷节点的平均负荷,并以此作为最小负荷距原则中各普通负荷节点的计算负荷。

建立含有微电网的配电网变电站定址数学模型,采用粒子群优化(PSO)算法^[12]求解。

所建模型如下:

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} P_i \lambda \sqrt{(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^q \delta_{jk} P_{\text{micro}_k} \lambda \sqrt{(u_j - x_k)^2 + (v_j - y_k)^2} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } (u_j, v_j) \in \text{可行区域} \quad (9)$$

$$S_j^{(N-1)} < S_{\text{max}} \quad (10)$$

$$r_j < r_{\text{max}} \quad (11)$$

式中: m 为变电站个数; h 为普通负荷节点数; q 为微电网个数; (u_j, v_j) 为各变电站站址坐标; (x_i, y_i) 为普通负荷节点坐标; (x_k, y_k) 为微电网坐标; P_i 为各负荷节点的年最大负荷预测数据; P_{micro_k} 为各微电网的平均负荷; δ_{ji} 和 δ_{jk} 为标志参量, $\delta = 1$ 表示变电站 j 对该节点供电, $\delta = 0$ 表示变电站 j 不对该节点供电。

式(9)是变电站位于可行区域的约束;式(10)是各变电站在 $N-1$ 情况下不过载的约束;式(11)是各变电站供电半径不超过最大值的约束。

3 含有微电网的配电网网架规划

变电站位置及容量确定之后,接下来需要对配电网进行网架规划。

3.1 微电网接入的限制条件

根据《城市电力网规划设计导则》(Q/GDW 156—2006)规定,小规模分布式电源发电以就近消纳为主,不允许对上级电网倒送功率。今后一段时间内,国内配电网缺乏功率倒送控制方式和管理办法的现状仍不会得到根本改变,因此,本文在进行含有微电网的配电网网架规划时,将尽量减少微电网接入对配电网的影响,引入防止微电网向供电变电站倒送功率的限制条件。今后,随着电网的不断发展,微电网大量接入配电网将成为趋势,作者将对微电网大量接入后的配电网规划方法进行详细研究。

图 1 为微电网接入配电网的一个示意图。

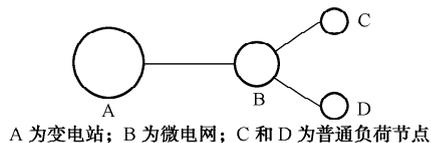


图 1 微电网接入配电网示意图
Fig. 1 Sketch map of micro-grid accessing to distribution network

当微电网 B 倒送功率时,如果节点 C 和节点 D 负荷之和大于此时微电网 B 的倒送功率值,便可以保证微电网 B 不向变电站 A 倒送功率。为尽量保证所有微电网不对变电站倒送功率,微电网接入比例不能过大,这与微电网接入初期的实际情况相吻合。

在图 1 中,假设 B 为满足式(5)的微电网,负荷节点 C 与负荷节点 D 的最大年负荷预测数据分别为 P_C 与 P_D 。可以看到,在 $n=6$ 时,微电网 B 对外输出功率达到最大值,绝对值为 $0.585P_{\text{max}}$,该数值为 $n=6$ 时间段内的一个平均输出功率。所以,要保证微电网输出功率尽量不倒送至上级电网,需满足下式:

$$\lambda(P_C + P_D) - 0.585P_{\text{max}} > 0 \quad (12)$$

式中: λ 为负荷率,取 0.8。

满足式(12)虽然可以保证微电网输出功率尽量不倒送,但并不能保证每时每刻微电网的输出功率均小于其所在线路上其他负荷功率之和,这种情况下可以通过在变电站安装相应的电力电子装置来阻止功率倒送。

3.2 含有微电网的配电网网架规划模型

本文建立的含微电网的配电网网架规划模型以配电网综合年费用最小为目标函数,并假设微电网以式(5)模型接入配电网,采用二进制粒子群优化(BPSO)算法^[13]求解。

所建模型如下:

$$\min C = \sum_{i=1}^{n_1} (C_i T_i \delta_i + 8760 D \Delta P_i \delta_i) \quad (13)$$

$$\text{s. t. } C \in \text{辐射状结构} \quad (14)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (15)$$

$$S_i \leq 0.5 S_{\max} \quad (16)$$

$$\lambda P_{M-L} - 0.585 P_{\max} > 0 \quad (17)$$

式中: n_1 为可行线路走廊总数; δ_i 为 0-1 标志参量, 0 代表该走廊不被选取, 1 代表该走廊被选取; T_i 为各条线路的建设投资费用; $C_i = \gamma_i + \alpha_i$, γ_i 为投资回收率, α_i 为设备折旧维修费率; D 为平均单位电价; ΔP_i 为第 i 条线路根据普通负荷节点或微电网节点的年平均负荷计算得到的功率损耗(微电网节点的年平均负荷由式(7)计算得出), $8760 \Delta P_i$ 近似为该线路 1 年内的电能损耗值; U_i 为各节点电压; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为节点电压上下限; S_i 为各条线路实际承载容量; S_{\max} 为线路额定容量; P_{M-L} 为微电网所在线路其他普通负荷节点年最大负荷预测数值之和; P_{\max} 为微电网负荷总量。

式(16)满足了配电网“手拉手”接线方式要求, 用以提高供电可靠性; 式(17)保证了微电网输出功率尽量不向上级电网倒送。

4 算例分析

本文以国内某地区 2015 年配电网规划为算例原型, 假设少量微电网接入该配电网, 如图 2 所示。在图 2 中, 待规划的配电网高压侧电压等级为 110 kV, 低压侧为 20 kV; 节点 1~35 为普通负荷节点, 负荷预测总量为 100.150 MW; A, B, C 为满足式(5)模型的微电网, 内部负荷总量分别为 7.500 MW, 6.320 MW, 5.230 MW。

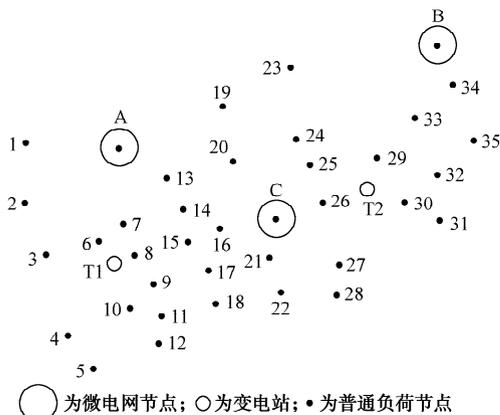


图 2 含有微电网的配电网变电站规划图

Fig. 2 Figure of distribution network substation planning containing micro-grid

4.1 变电站定容定址

每个变电站配置已给定, 包括 2 台 63 MVA 的

110 kV/20 kV 变压器, 容载比取 2.0。利用式(6)计算得到该配电网共需要 2 个变电站。应用 2.2 节提出的变电站选址模型, 采用 BPSO 算法求解得到变电站站址如图 2 中 T1 和 T2 所示, 其中 T1 对负荷节点 1~18 及微电网 A 供电, T2 对负荷节点 19~35 及微电网 B、微电网 C 供电。

4.2 网架规划

根据 4.1 节变电站布点结果, 应用 3.2 节提出的模型, 采用 BPSO 算法对该配电网算例进行网架规划, 得到如图 3 所示的网架图。

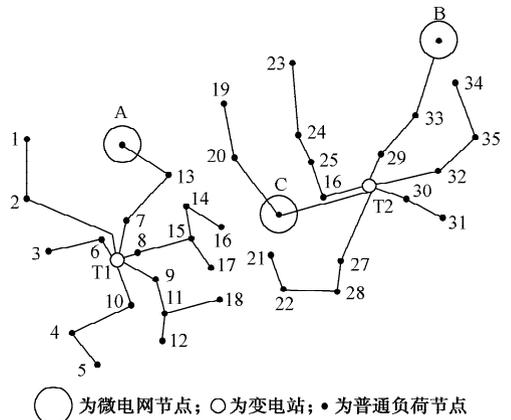


图 3 含有微电网的配电网网架规划图

Fig. 3 Figure of distribution network structure planning containing micro-grid

网架规划中所有线路型号选择为 150 mm² 18 kV/20 kV 三芯铜导线, 并采用双回线路供电。

4.3 结果校验

对图 3 网架进行可靠性和倒送功率校验, 结果如下:

1) 所有线路承载容量均小于线路额定容量的 50%, 可以对出自不同母线的线路末端形成“手拉手”接线方式, 提高供电可靠性。

2) 在含有微电网 A 的线路上, 节点 7 与节点 13 的负荷之和为 6.060 MW; 在含有微电网 B 的线路上, 节点 29 与节点 33 的负荷之和为 6.240 MW; 在含有微电网 C 的线路上, 节点 19 与节点 20 的负荷之和为 5.170 MW。三者均满足式(12)约束条件, 保证了微电网尽量不向上级电网倒送功率。

3) 线路最大压降小于 2%, 电压质量符合要求。

5 结语

本文建立了一种针对城市居住区的微电网发电及用电特性数学模型, 在此基础上提出了一套含有微电网的配电网变电站规划及网架规划方法。通过对国内某地区配电网规划算例进行计算分析表明,

本文提出的规划方法是可行的。

本文研究的是微电网接入初期阶段。随着微电网技术的成熟、配电网对于逆向潮流控制保护装置的配套以及调度人员运行管理经验的增加,微电网大量接入配电网将成为可能。对含有大量微电网的配电网规划方法的研究将是今后的研究课题之一。

参 考 文 献

- [1] LASSETER R, AKHILA A, MARNAY C, et al. The CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2006-09-12]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [2] LASSETER R H. Microgrids// Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting; Vol 1, January 27-31, 2002, New York, NY, USA; 305-308.
- [3] MARNAY C, RUBIO F J, SIDDIQUI A S. Shape of the microgrid// Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting; Vol 1, January 28-February 1, 2001, Columbus, OH, USA; 150-153.
- [4] 王成山,肖朝霞,王守相.微电网综合控制与分析.电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [5] MOROZUMI S. Micro-grid demonstration projects in Japan// Proceedings of Power Conversation Conference, April 2-5, 2007, Nagoya, Japan; 635-642.
- [6] FUNABASHI T, YOKOYAMA R. Microgrid field test experiences in Japan// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, Canada; 2p.
- [7] COX D J. Microgrid infrastructure modeling for residential microgrids// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA; 1-6.
- [8] DVORSKY E, HEJTMANKOVA P. Microgrid interconnection to distribution power networks// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 21-26, 2006, Dallas, TX, USA; 286-288.
- [9] 王成山,王守相.分布式发电供能系统若干问题研究.电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [10] 王守相,李晓静,肖朝霞,等.含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法.电力系统自动化,2007,31(10):61-65.
WANG Shouxiang, LI Xiaojing, XIAO Zhaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 61-65.
- [11] 程浩忠,张焰,严正,等.电力系统规划.北京:中国电力出版社,2008.
- [12] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization// Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth); Vol 4, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, USA; 1942-1948.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary particle swarm optimization// Proceedings of 1997 Conference on System, Man, and Cybernetics; Vol 5, October 12-15, 1997, Orlando, FL, USA; 4104-4109.

戴 上(1985—),男,通信作者,硕士,主要研究方向:配电网规划及微电网接入。E-mail: ds1921723@sjtu.edu.cn

张 焰(1958—),女,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统安全性。

祝达康(1973—),男,硕士,主要研究方向:电力系统电压稳定、规划、谐波。

Distribution Network Planning Method Containing Micro-grid

DAI Shang¹, ZHANG Yan¹, ZHU Dakang²

(1. Shanghai Jiaotong University Electrical Engineering Department, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200112, China)

Abstract: A micro-grid contains quite a few distributed generators besides multiple loads. The power generated from these distributed generators may vary greatly over time. Therefore, the micro-grid may have different power generating or consuming characteristics in different time slots. First, a mathematical model for micro-grid power generating and consuming characteristics is developed. Then, a distribution network planning method containing a small proportion of micro-grids is studied, including the method of distribution substation planning, restrictions on micro-grid access to network, and the model of distribution network structure planning. Finally, a distribution network planning example is used to analyze and verify the planning method.

Key words: micro-grid; distributed generation; power generating characteristics; power consuming characteristics; distribution network planning