

# 基于电气关联性的虚拟微网划分方法

吴春潮<sup>1</sup>, 薛飞<sup>2</sup>, 徐晓彤<sup>2</sup>, 卢少锋<sup>2</sup>, 蒋林<sup>3</sup>, 李刚<sup>4</sup>

(1. 国投白银风电有限公司, 甘肃省兰州市 730000; 2. 西交利物浦大学, 江苏省苏州市 215123; 3. 利物浦大学, 英国利物浦; 4. 国家电网公司科技部, 北京市 100031)

**摘要:** 随着智能电网与能源互联网研究的兴起, 分布式可再生能源和储能设备的不断接入, 配电网的智能化发展已成为一种必然趋势。而大量现存的传统配电网如何适应自由、对等、灵活的目标, 成为迫切需要解决的问题。本文提出基于电网的电气关联强度将传统配电网划分成若干具有强内部聚合特性的虚拟微网, 并提出了基于扩展 CPS 的虚拟微网实施框架, 以及边界划分、资源优化部署、协同能量管理的三阶段研究问题。针对第一个研究问题, 通过定义电气关联强度, 对复杂网络中经典的 Newman 快速分区算法进行改造, 实现对虚拟微网边界的自动优化。通过仿真算例验证了该方法的合理性和效率。

**关键词:** 虚拟微网; 电气关联强度; Newman 分区算法; 智能配电网

## 0 引言

随着智能电网和能源互联网研究的不断推进, 分布式可再生能源发电以及储能设备将不断接入配电网, 传统配电网面临着更加复杂化、互动化的服务需求。因此, 发展具有灵活性、可观性、可控性的智能配电网已经成为一种共识和趋势<sup>[1]</sup>。文献[1]将未来智能配电网的功能总结为: 可再生资源消纳的支撑平台; 多源海量信息集成的数据平台; 多利益主体参与的市场交易平台; 电气化交通发展的支撑与服务平台; 智慧城市建设的能源基础平台等。可见, 智能配电网的发展将涵盖物理系统、信息和数据系统、社会经济交易等不同领域, 因此有必要基于扩展 CPS (物理、信息、社会经济)<sup>[2]</sup> 构建其发展实施总体框架。

与此同时, 作为消纳可再生能源和提高配电网运行灵活、高效、自治特性的有效方法, 微网作为智能电网和能源互联网的核心技术得到了广泛的关注<sup>0</sup>。但是, 目前实际建成并运行的微网项目十分有限。而对于大量已经接入现有传统配电网的用户来说, 重新构建并接入微网并不可行。因此, 如何发挥微网运行的优势来改善传统配电网的灵活性和可控性, 成为一种挑战, 但同时也是智能配电网发展的一个机遇。

近来, 已有学者提出将传统配电网划分成若干子区域, 在区域边界配置分段开关, 各区域仿造微网的方式灵活运行。这种通过虚拟方式划分并仿造微网方式运行的区域, 被称作“虚拟微网” (Virtual Microgrid,

简称 VM)<sup>[4]-[8]</sup>。本文将虚拟微网定义为: 基于传统配电网的结构虚拟划分的独立系统, 具有与微网相似的控制策略和运行方式, 可适应未来配电网基于弱中心化群体智能技术<sup>[22]</sup> 实施主动能量管理的要求。与传统微网不同, 虚拟微网并非从初始阶段开始规划设计的全新微网, 其边界根据已有传统配电网的实际状况人为划分, 且动态可调。其目的在于有效的整合与管理配电网的分布式能源设施, 以实施配电网的主动能量管理。也就是说, 为充分利用现有配电网资源, 减少网络升级的投入, 虚拟微网是实现由传统配电网向智能配电网转化的一种有效可行的方式和方法。但是, 目前对于虚拟微网的研究还存在以下问题:

- (1). 虚拟微网边界的划分方法缺乏合理性, 尤其是配网自身结构特点没有得到体现;
- (2). 被动接受分布式发电以及储能资源的分布作为已知条件, 没有考虑资源规划对能量管理的制约作用;
- (3). 传统配电网向虚拟微网发展和实施缺乏覆盖物理、信息、社会经济各层面的综合框架和策略;
- (4). 对虚拟微网特有的能量管理问题和方法缺乏深入探讨和认识。

针对虚拟微网以上问题, 本文的主要贡献体现在:

- (1). 提出了一种基于扩展 CPS 的实施框架;
- (2) 提出虚拟微网的三阶段发展问题, 即边界划分、资源优化部署、协同能量管理, 探讨了各阶段所面临的挑战及

的微网关键技术研究。

收稿日期: yyyy-mm-dd; 修回日期: yyyy-mm-dd

国投白银风电有限公司科技项目(2016-GTJCT-JF-29): 面向能源互联网

可能的技术方向; (3) 针对第一阶段的边界划分问题, 本文提出借鉴复杂网络划分社团结构的方式, 利用电气关联强度改进 Newman 快速分区算法。通过算例验证, 该方法可有效的基于结构紧密性划分虚拟微网。

## 1 虚拟微网的实施框架

本文基于扩展 CPS<sup>[2]</sup> 构建虚拟微网的实施框架, 如图 1 所示。

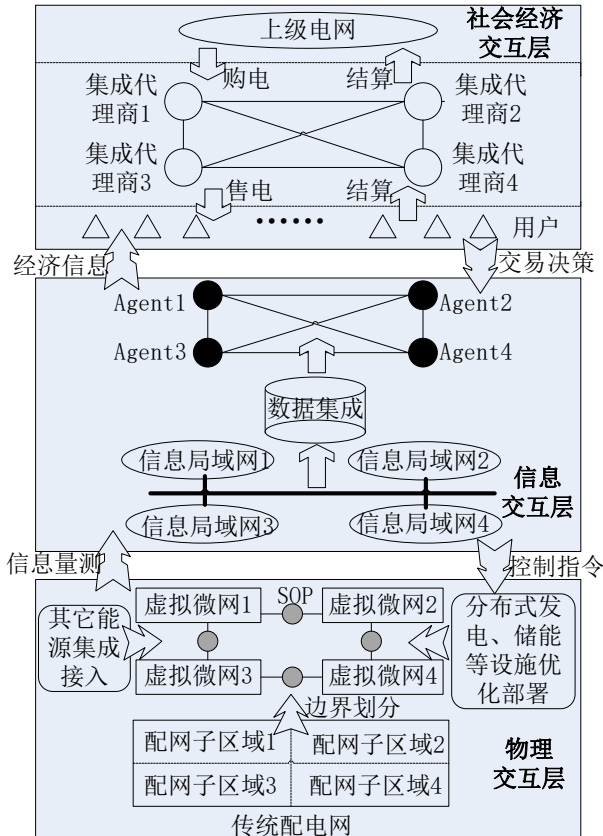


图 1 虚拟微网实施框架示意图

Fig. 1 Framework of Implementation for Virtual Microgrid

在物理层, 根据特定的优化目标, 将其划分为若干子区域。基于不同的优化逻辑和目标, 划分方式可能完全不同。各子区域之间的边界配置分段开关, 可控制区域之间的连接和开断, 使虚拟微网可并网或孤岛运行。随着智能软开关 SOP 的不断发展和应用, 基于 SOP 的智能配网柔性互联受到了广泛关注<sup>[9]</sup>。如果在虚拟微网的边界部署 SOP, 可提供灵活、快速、精确的功率交换控制与潮流优化能力。而虚拟微网本身也可能成为实现智能配网柔性互联的有效方式。此外, 如果以虚拟微网为基础, 进一步整合其它能源, 可形

成局域能源网。通过局域能源网的互联, 可使其成为实现能源互联网的有效途径。

对于社会经济层, 在虚拟微网的想定下, 可仿照电动汽车集成运营商的理念<sup>[10]</sup>, 虚拟微网由对应的集成代理商负责投资建设并获取收益。因此, 代理商可根据电网特性和长远发展目标, 有序部署分布式发电设施。当然, 虚拟微网与代理商之间可能是一对一关系, 也可能是多对一关系, 但为其独立自主的管理和控制奠定了基础。

信息层是物理层与社会经济层的桥梁, 也是实现智能配电网可控性和可观性的核心。如果物理系统以虚拟微网为单位构建, 那么量测布局和信息利用可以虚拟微网为单位。此外, 信息层担负着为社会经济交互提供信息和决策依据, 因此信息层的建模应与集成代理关系对应。例如, 可利用多 Agent 系统建模, 使每一个 Agent 对应一个虚拟微网的物理模型, 为对应的集成代理商提供决策信息或进行辅助决策。

## 2 发展虚拟微网的三阶段问题

完整的虚拟微网需要具有分布式电源、储能等资源的存在, 而虚拟微网的意义在于灵活的整合这些资源, 以实施主动能量管理。但是, 虚拟微网的形成并非一蹴而就, 尤其是分布式发电等资源的接入是一个逐步演进的过程。对于虚拟微网的形成和实施主动能量管理的能力, 有以下两种因素会产生影响:

(a) 配电网的母线和线路的连接布局, 也就是网络的拓扑结构和相应的网络参数;

(b) 分布式电源、储能等资源在配电网中的具体配置和分布, 包括电源位置、类型、容量等。

从当前情况来看, 因素 (a) 是一种被动因素, 因为它已经是既成事实, 在不对网络进行大规模投入与更新的前提下, 需要被动接受。而由于目前绝大多数传统配电网中, 尚没有大量接入分布式发电等资源, 因素 (b) 是一种主动可优化因素。因此, 首先根据被动因素客观的依据网络结构划分内部聚合性强的区域, 确定虚拟微网边界。然后, 发挥主动因素, 优化配置分布式资源, 使主动因素与被动因素协调一致, 避免它们的冲突与混乱。

基于以上论述, 虚拟微网的发展可包括三个阶段:

(1). 边界划分

现存关于虚拟微网的有限研究中, 将分布式发电的地点和容量作为已知条件, 通过概率潮流的计算,

以网损和边界潮流最小为目标划分虚拟微网的边界<sup>[4]-[8]</sup>。一方面, 现有绝大多数传统配电网还没有或很少有分布式发电设备的接入, 将分布式发电的位置和容量作为已知条件与其现实不符。另一方面, 在电源分布尚未确定之前, 网络结构的影响至关重要。而依据网络结构, 顺势规划电源分布, 则为改善和优化系统运行提供了机遇。因此, 本文认为, 应首先以结构为基础划分虚拟微网边界, 再将该边界作为约束条件, 进行分布式发电和储能资源的优化分配。

此外, 虚拟微网的边界并非完全固定, 可实行动态切换。理论上, 如果在所有节点之间都安装分段开关, 则网络将具有最佳的灵活性。但显然, 从成本角度考虑, 并不可行。因此, 合理选取适当位置作为边界部署分段开关, 甚至 SOP, 成为这一阶段的核心问题。

## (2). 资源优化部署

将前一阶段所划分边界作为约束条件, 进行分布式发电和储能等资源的优化分配, 使资源的分布与结构的趋势相一致。分布式资源是配电网发起主动能量管理的基础, 对这些资源主动合理的规划, 有助于支撑配电网更好的主动能量管理能力。为保证虚拟微网的自我供给和自我平衡能力的最大化, 应针对其内部新能源发电和负荷的不确定性以及可控 DG、储能、需求侧管理等灵活性资源进行量化<sup>[20][21]</sup>, 将区域内不确定性与灵活性的平衡作为约束条件。由于配置规划与运行的耦合性, 可采用内外两层优化模型: 外层资源配置优化以投资收益和新能源消纳最大化为目标; 内层运行优化以边界潮流和网损最小化等为目标。

## (3). 协同能量管理

从原则上讲, 虚拟微网的能量管理基本功能架构, 应该与常规微网相似。但由于虚拟微网的特殊性, 这一阶段将出现一些与以往微网能量管理不同的问题, 我们探讨如下。

### (3-1) 多连接点问题

虚拟微网本身同样符合微网的原始定义<sup>[11]</sup>。但是, 以往关于微网的研究中, 都只考虑微网与外界只有一个公共连接点 PCC 作为边界, 并以此控制其与外界的联通或开断。但是, 对于虚拟微网, 由于其基于原配电网结构划分而来, 其与外界可能拥有多个连接点, 并同时与多个虚拟微网或主网进行互动。这种多连接点将给虚拟微网的单一可控特征带来极大挑战和复杂性。这一问题可望通过多端 SOP 技术得以改善<sup>[9]</sup>。

### (3-2) 潮流过路问题

以往的多微网协同调度问题中, 各微网通过各自唯一的连接点与外界连接, 彼此之间相对独立<sup>[12]</sup>。在多虚拟微网问题中, 某一虚拟微网可能只与其它虚拟微网相连, 而不能直接与主网相连。因此, 其部分功率供给需要借由其它虚拟微网作为通道进行输送, 这将带来运行调度和交易结算两方面的问题。一方面, 虚拟微网的并网或孤岛运行决策不再完全独立, 其操作将可能影响其它虚拟微网的供电通道。而过路潮流也为虚拟微网对外呈现单一可控性带来了挑战。另一方面, 如果虚拟微网隶属于不同的代理商, 由过路潮流产生的网损等问题如何在交易结算中体现, 也成为需要解决的课题。

### (3-3) 协同与博弈并存

发展虚拟微网的目的是由传统配电网集中式层次化的运行模式向弱中心化基于群体智能的纯分布式转化<sup>[22]</sup>。不同虚拟微网代理商之间形成一种协同和博弈并存问题。文献[13][14]研究了类似协同和博弈问题。例如欧洲电网由不同国家电网互联而成, 为维护系统安全稳定, 各电网之间必须彼此协同。但由于各自利益独立, 又同时存在博弈问题。这一问题可通过多 Agent 和机器学习来建模, 并评估相应的调度和信息共享机制是否有效。因此, 基于多 Agent 和机器学习等人工智能方法同样有望解决虚拟微网的协同博弈问题。

## 3 结构性电气关联强度

针对虚拟微网边界划分问题, 本文提出利用基于结构性电气关联强度的社团分区算法确定。对外呈现单一可控特性, 是微网的一个显著特征, 而微网内部结构的紧密性对这一特征具有决定性的影响。但是, 到目前为止, 尚未有研究从内部结构紧密性对微网的规划进行探讨。而基于结构紧密度对电网的划分与复杂网络的社团结构识别具有极大相似性。

在无权重纯拓扑网络模型中, 节点之间的关联紧密度只能通过相互连线的数量和密集程度来体现。但是, 对于实际物理系统, 节点之间的关联强度需要用权重来反应, 且权重的选取要体现该物理系统的功能和相互关联的物理含义。在电网中, 两节点之间的电气关联强度具有两层物理含义, 一是两点之间以最小的损耗和代价传输电能, 二是可以最大的功率传输电能。前者取决于两节点之间的阻抗特性, 而后者取决于两节点之间传输功率的容量。在以往有权重网络中, 多选择一种物理量作为线路的权重, 而如果多种物理

量与目标特性相关则无法全面体现。因此,本文提出构建复合权重的网络模型,即一种权重可同时反应多种物理量的影响。

对于一个给定的网络  $G$ , 其纯拓扑模型可通过邻接矩阵 (Adjacency Matrix)  $A$  来描述其结构<sup>[15]</sup>:

$$A_{vw} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } v \text{ 和 } w \text{ 相连} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$A_{vw}$  为邻接矩阵的元素。

而对于一个有权重网络, 其邻接矩阵可更新为

**Error! Reference source not found.:**

$$A_{vw} = \begin{cases} w_{vw} & \text{如果 } v \text{ 和 } w \text{ 相连} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

$w_{vw}$  为节点  $v$  和  $w$  之间连接线的权重。

作为电网的复合权重, 我们可将节点  $v$  和  $w$  之间的电气关联强度定义为:

$$E_{vw} = \frac{C_{vw}}{Z_{vw}} \quad (3)$$

其中,  $Z_{vw}$  代表阻抗,  $C_{vw}$  代表电能传输容量。其物理含义为, 两点之间的阻抗越小, 其传输的损耗越小; 两点之间的容量越大, 则可最大传输的功率越大。因此, 阻抗越小、容量越大, 则两点间电气关联强度越大。

但是, 根据式 (2) 传统邻接矩阵的定义, 如果以  $E_{vw}$  作为邻接矩阵的权重, 则相应的阻抗和容量都应选取  $v$  和  $w$  之间直接连线的阻抗与容量。

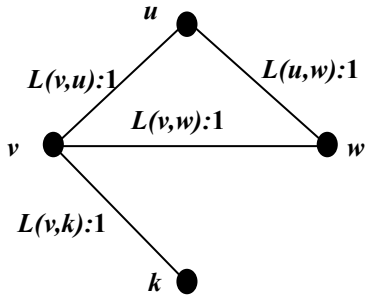


图 2 电气关联强度示意图

Fig. 2 Sketch for electrical coupling strength

如图 2 所示,  $L(v,w):1$  表示连接在  $v$  和  $w$  之间的连线, 其阻抗为 1。根据式 (2) 对于邻接矩阵的定义, 则计算  $E_{vw}$  的阻抗和容量即为线路  $L(v,w)$  阻抗和容量。如果假定所有线路的容量相同, 则在该网络中有  $E_{vw}=E_{vk}$ 。节点  $v$  与  $w$  和  $v$  与  $k$  的关联强度相同。但是, 与复杂网络通用模型不同, 电网中两点之间的传输电能不仅仅通过一条最短路径, 而是几乎所有路径都会

不同程度的参与。图 2 中,  $v$  与  $w$  之间除直接连线  $L(v,w)$  以外, 还有一条通过节点  $u$  的  $L(v,u)$  和  $L(u,w)$  的间接路径。如果计及  $v$  与  $w$  之间的并联路径, 则很明显其等值的并联阻抗小于 1。这样, 实际上  $v$  与  $w$  之间的电气关联强度要大于  $v$  与  $k$ 。

因此, 本文在计算电气关联强度时, 所采用的阻抗和容量均为两点之间的等值阻抗和容量。具体的, 两点间等值阻抗为:

$$Z_{vw}^e = (Z_{vv} - Z_{vw}) - (Z_{vw} - Z_{ww}) \quad (4)$$

其中  $Z_{vw}$  为阻抗矩阵第  $v$  行第  $w$  列元素。

两点之间的等值传输容量可计算为:

$$C_{vw}^e = \min_{l \in L} \left[ \frac{P_{l_{\max}}^l}{|a_l^{vw}|} \right] \quad (5)$$

其中  $L$  为全网络线路集合;  $P_{l_{\max}}^l$  为线路  $l$  的最大传输容量;  $a_l^{vw}$  为从  $v$  向  $w$  传输电能时线路  $l$  的 PTDF (Power Transmission Distribution Factor)。关于两点间等值阻抗和容量的计算, 详细过程请参考文献 [16][17]。

## 4 基于电气关联强度的改进 Newman 分区算法

在复杂网络领域, 关于集群或社区的划分界定, Newman 快速分区算法是较为广泛接受的一种方法, 也常作为衡量其它分区算法的标准<sup>[15]</sup>。

在纯拓扑网络模型中, 对于一个给定的网络  $Y$ , 基于式 (1) 定义的邻接矩阵元素, 节点  $v$  的度 (degree) 可以定义为:

$$k_v = \sum_w A_{vw} \quad (6)$$

设  $m$  为网络中线路的总数, 如果将全网络划分为若干个区域或群落,  $c_v$  和  $c_w$  代表节点  $v$  和  $w$  各自所属的群落, 则对应于这种划分方式可计算量化参数 Modularity 为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{vw} \left[ A_{vw} - \frac{k_v k_w}{2m} \right] \delta(c_v, c_w) \quad (7)$$

$\delta(i, j) = 1$  如果  $i = j$ , 否则为 0。进一步的, 可将

Modularity 表达为:

$$Q = \sum_{vw} \left[ \frac{A_{vw}}{2m} - \frac{k_v k_w}{2m \cdot 2m} \right] \delta(c_v, c_w) \quad (8)$$

原 Newman 分区算法应用于虚拟微网划分, 还存在以下问题:

- (1). 无法同时体现阻抗与容量两种物理属性的影响;
- (2). 无法体现两点间所有路径对电能传输的贡献, 不符合电网物理规律;
- (3). 以往很多 Newman 分区算法在电网领域的改

造应用，其权重和 Modularity 的定义与虚拟微网划分不相适应。

我们首先利用式(3)所定义的电气关联强度将节点  $v$  的度更新为：

$$E_v = \sum_w E_{vw} \quad (9)$$

将  $M$  定义为有权重邻接矩阵所有非零元素总和的一半：

$$M = \frac{1}{2} \sum_{vw} E_{vw} \quad (10)$$

则与电气关联强度对应的  $Q$  值可更新为：

$$Q_e = \sum_{vw} \left[ \frac{E_{vw}}{2M} - \frac{E_v E_w}{2M \cdot 2M} \right] \delta(c_v, c_w) \quad (11)$$

$c_v$  和  $c_w$  代表节点  $v$  和  $w$  各自所属的虚拟微网。

可以这样理解  $Q_e$  的物理含义：在网络  $Y$  中随机抽取一个单位的电气关联强度，则该单位电气关联强度从节点  $v$  连接到节点  $w$  的概率取决于以下两个事件的概率：

- A. 该单位电气关联强度从节点  $v$  起始；
- B. 该单位电气关联强度到节点  $w$  终止。

根据式(9)对度的定义，则事件 A 的概率即为  $E_v/2M$ 。而对于网络  $Y$ ，节点  $v$  和  $w$  之间的电气关联强度  $E_{vw}$  已知，则事件 A 和 B 之间不完全独立。当事件 A 为真，则事件 B 的概率为  $E_{vw}/E_v$ 。则随机抽取的该单位电气关联强度从节点  $v$  连接到节点  $w$  的概率为  $(E_v/2M) \times (E_{vw}/E_v) = E_{vw}/2M$ 。

对应的，假定另有一个网络  $R$ ，其节点总数和总  $M$  与网络  $Y$  相同，且节点  $v$  和  $w$  的度也相同，但是  $M$  在网络中完全随机分布。随机抽取一个单位的电气关联强度，则该单位电气关联强度从节点  $v$  连接到节点  $w$  的概率仍取决于事件 A 和 B 的概率。由于在  $R$  中，电气关联强度完全随机分布，不存在  $E_{vw}$  的给定条件，则事件 A 和 B 的概率完全独立。随机抽取的该单位电气关联强度从节点  $v$  连接到节点  $w$  的概率为  $(E_v/2M) \times (E_w/2M)$ 。

可见，式(11) $Q_e$  体现了在同一虚拟微网中，网络  $Y$  节点之间电气关联强度与随机网络  $R$  中电气关联强度分布概率的差值。该差值越大，说明  $Y$  的同一虚拟微网内部节点间电气关联越紧密。而寻求最优的虚拟微网划分方式就等同于寻求  $Q_e$  最大的划分方式。

具体执行算法时，与 Newman 快速分区算法相似，该过程可参见 Newman 快速分区算法<sup>[15]</sup>。

## 5 算例分析

为验证上述改进的 Newman 分区算法是否可应用于配电网中虚拟微网的划分界定，本文选取 IEEE 标准 33 节点配电网<sup>[18]</sup>和葡萄牙 94 节点配电网<sup>[19]</sup>为例进行分析。对电网中的输电线路而言，其电阻远远小

于电抗，所以本文在计算过程中只考虑电抗的影响。对于某一电压等级的输电线路，其最大电能传输容量往往取决于材料和线径等因素，所以在算例分析中，本文假设所有输电线路的最大电能传输容量均相同。电能传输容量对虚拟微网分区结果的影响会在算例 2 中进行讨论。

表 1 IEEE33 节点配电网线路的电气关联强度  
Table 1 The electrical coupling strength for IEEE 33-bus distribution network

母线 始端 编号	母线 终端 编号	电气关联 强度	母线 始端 编号	母线 终端 编号	电气关联 强度
1	2	2511.3208	29	30	463.4043
2	19	765.4313	30	31	124.3925
19	20	88.3798	31	32	331.0030
20	21	250.3972	32	33	225.9336
21	22	127.8033	6	7	193.5844
2	3	477.0609	7	8	96.9881
3	23	388.5501	8	9	161.8784
23	24	168.9324	9	10	161.8784
24	25	170.8601	10	11	1842.9231
3	4	642.6502	11	12	967.6090
4	5	617.1561	12	13	103.7143
5	6	169.4342	13	14	168.0320
6	26	1158.5106	14	15	227.7376
26	27	827.8507	15	16	219.7982
27	28	128.2960	16	17	69.6049
28	29	170.9820	17	18	208.6934

### 4.1 算例 1

根据(3)的定义，IEEE 标准 33 节点配电网的电气关联强度如表 1 所示。结合电气关联强度的计算结果和基于改进的 Newman 分区算法，不同分区方式对应的  $Q$  值如图 3 所示。当虚拟微网个数为 7 时， $Q_e$  达到最大值 (0.7141)，这一结果说明在这种分区方式下，各个虚拟微网内部节点间的电气联系最紧密，其对应分区结果如图 4 所示。

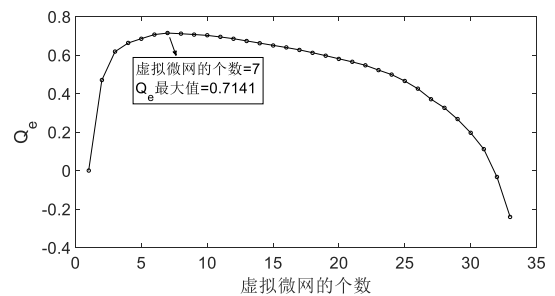


图 3 IEEE33 节点配电网不同虚拟微网划分对应的  $Q_e$

Fig. 3 The  $Q_e$  for different number of virtual microgrids in IEEE 33-bus distribution network

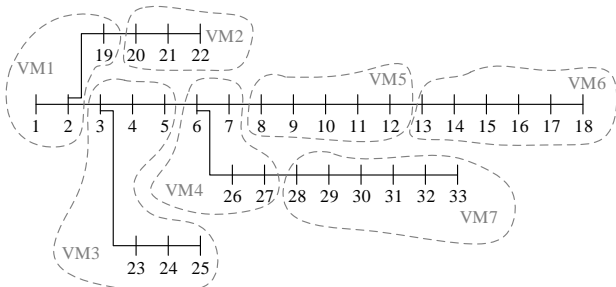


图 4 IEEE 33 节点配电网的虚拟微网分区结果

Fig. 4 The partitioning result of virtual microgrids for IEEE 33-bus distribution network

#### 4.2 算例 2

将改进的 Newman 分区算法应用于葡萄牙 94 节点配电网, 得到结果如图 5 所示。当虚拟微网数量为 12 时,  $Q_e$  最大为 0.8354。基于这个结果, 虚拟微网的划分如图 6 所示。图 7 为文献 [10] 中根据潮流和电压等状态特性的划分结果。虽然图 6 和图 7 中虚拟微网的个数相同, 但是划分结果相差甚远。以图中最上端连接母线 52 至母线 66 的线路为例, 采用图 6 的划分方式可以保证虚拟微网 VM4 和 VM5 间相对较弱的电气联系。经过计算, 图 7 划分方式下的  $Q_e$  (0.6855) 小于图 6 的  $Q_e$  (0.8354), 因此, 考虑电网的结构特性, 图 6 的界定方式更为合理。

表 2 葡萄牙 94 节点配电网线路电抗及电气关联强度

Table 2 The reactance and electrical coupling strength for Portuguese distribution network with 94 nodes

母线始端 编号	母线终端 编号	电抗 (p.u.)	电气关联 强度
52	53	0.0008	1299.5916

53	54	0.0027	367.0897
54	55	0.0009	1139.9693
55	56	0.0009	1139.9693
56	57	0.0013	791.8592
57	58	0.0006	1579.7872
58	59	0.0008	1169.9055
59	60	0.0009	1083.9416
60	61	0.0008	1110.4187
61	62	0.0008	1138.2218
62	63	0.0010	945.4584
63	64	0.0025	403.7520
64	65	0.0016	634.4346
65	66	0.0024	416.4330

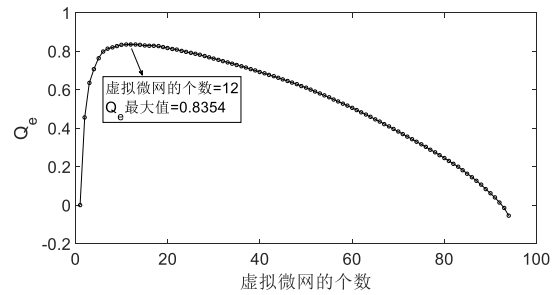


图 5 葡萄牙 94 节点配电网不同虚拟微网个数对应的  $Q_e$

Fig. 5 The  $Q_e$  for different number of virtual microgrids in Portuguese distribution network with 94 nodes

为了分析传输容量对电气关联强度以及微网分区结果的影响, 我们将连接母线 5 和母线 6 的线路 ( $l_{5-6}$ ) 的最大传输容量由 0.99MVA 改为 99MVA。在图 6 中, 由于所有线路的最大传输容量相同, 所以电抗较大的线路  $l_{5-6}$  被界定为虚拟微网 VM1 和 VM2 的边界。当线路  $l_{5-6}$  的最大传输容量改变时, 其虚拟微网分区结果如图 8 所

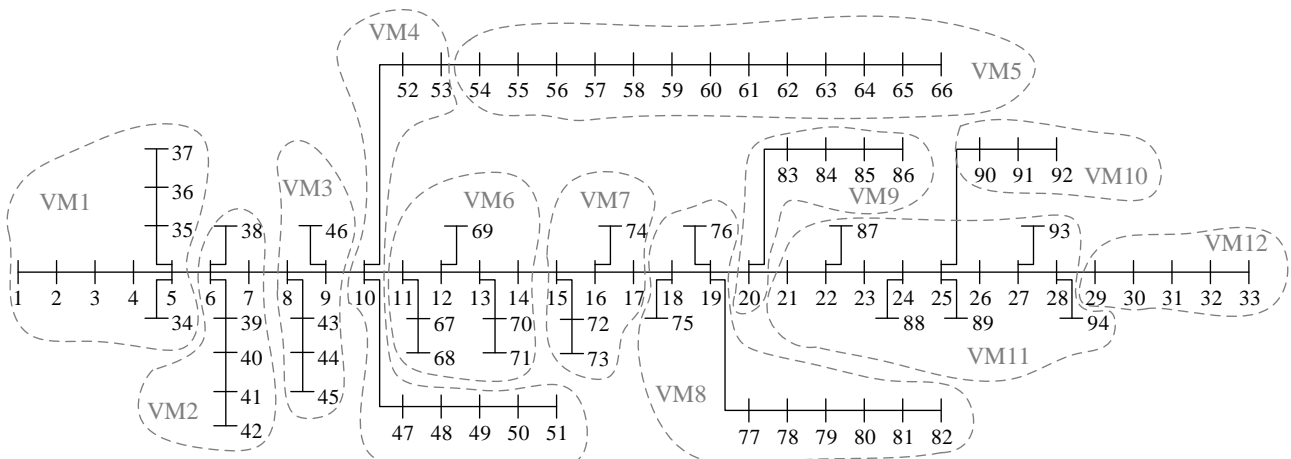


图 6 葡萄牙 94 节点配电网的虚拟微网分区结果 (基于改进的 Newman 分区算法,  $Q_e=0.8354$ )

Fig. 6 The partitioning result of virtual microgrids for Portuguese distribution network with 94 nodes (Based on the improved Newman fast community-detection algorithm,  $Q_e=0.8354$ )

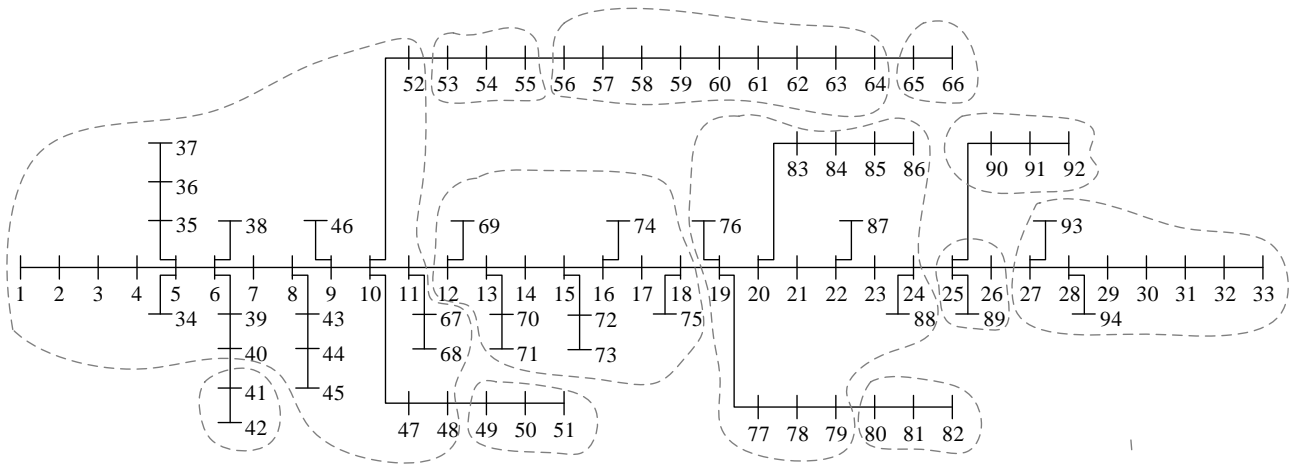


图 7 葡萄牙 94 节点配电网的虚拟微网分区结果 (基于文献[20]的其他分区方法,  $Q_e=0.6855$ )

Fig. 7 The partitioning result of virtual microgrids for Portuguese distribution network with 94 nodes (Based on other partitioning method in [25],  $Q_e=0.6855$ )

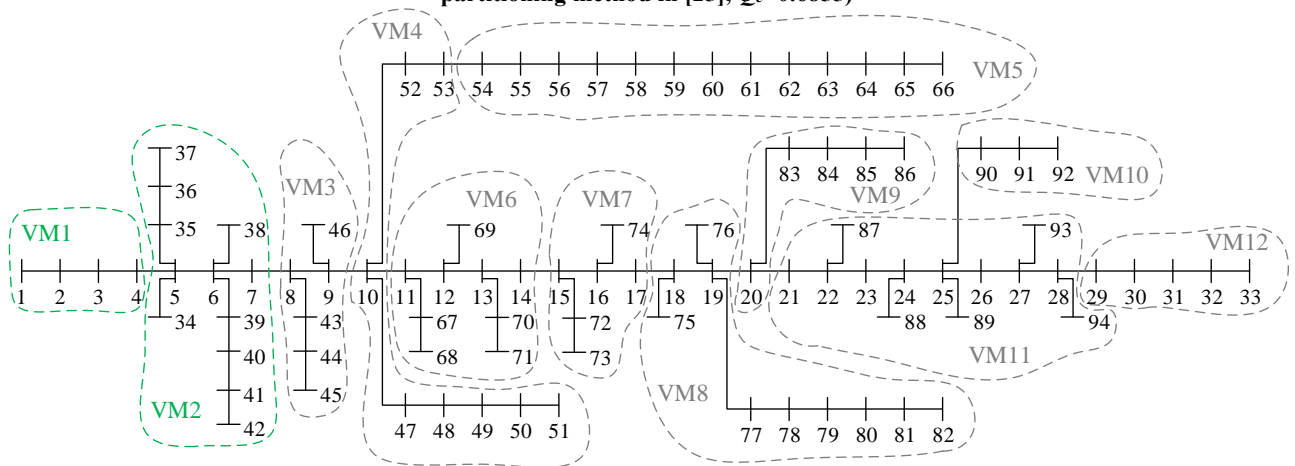


图 8 局部线路最大传输容量不同时的虚拟微网分区结果 (基于改进的 Newman 分区算法,  $Q_e=0.8247$ )

Fig. 8 The partitioning result of virtual microgrids with different maximum power limit of the local transmission line (Based on the improved Newman fast community-detection algorithm,  $Q_e=0.8247$ )

示。从图中可以看出, VM1 和 VM2 的边界由线路  $l_5$  变为线路  $l_{4.5}$ 。在这种情况下, 将电气关联强度较弱的线路  $l_{4.5}$  作为虚拟微网的边界更为合理, 此分区结果也满足以最大的功率传输电能的划分原则。

根据第 2 节讨论的虚拟微网发展三阶段, 基于电气关联性的虚拟微网划分方法解决了第一阶段边界划分问题。在后续第二阶段将解决资源优化部署问题, 一阶段划分的虚拟微网边界将被固定为约束条件, 在每一个确定的 VM 边界范围内, 要解决如何优化部署分布式发电和储能等资源, 包括它们的种类、容量、地点, 以虚拟微网运行特性或经济特性最优为优化目标。在第三阶段, 利用多智能体和群体智能等技术, 研究如何以虚拟微网的方式实现配网的主动能量管理, 如何更好地就地消纳可再生能源。我们将陆续发表后续阶段的成果。

## 5 结论

尽管智能配电网已成为智能电网发展的一项核心课题, 但对于众多庞大的传统配电网而言, 如何高效的实现智能化改造依旧困难重重。虚拟微网理念的出现, 为这一领域带来了新的思路。但是, 其具体实施和发展策略仍缺乏深入探讨。本文基于扩展 CPS 提出了虚拟微网的实施框架以及分三阶段的发展步骤, 并探讨了其特有的一些技术挑战可能的解决思路, 为这一领域进一步深入发展奠定基础。

进一步的, 针对构建虚拟微网的第一步核心问题, 本文根据现有传统配电网的实际状况与发展能源互联网的长远目标, 引入复杂网络的结构分析方法, 提出了基于结构分析的虚拟微网边界的自动划分方法。根据仿真真例的验证, 这种方法具有灵活、高效、合理的优点, 通过与其它算法的结果对比, 证明其更加

符合构建虚拟微网的目标。未来,以虚拟微网划分边界作为约束条件,我们将进一步研究虚拟微网内分布式发电和储能资源等的优化配置,以在划定的虚拟微网内实现不确定性与灵活性的就地平衡;并进一步研究多虚拟微网互联协调运行的关键技术。

### 参考文献

- [1] 王成山,李鹏,于浩.智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J].电力系统自动化,2018,42(10):13-21. DOI: 10.7500/AEPS20171012002.  
WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and Characteristic Analysis of Flexibility in Smart Distribution Network[J].Automation of Electric Power Systems,2018,42(10):13-21. DOI: 10.7500/AEPS20171012002.
- [2] 薛飞,李刚.能源互联网的网络化能源集成探讨[J].电力系统自动化,2016,40(1):9-16. DOI: 10.7500/AEPS20150708002.  
XUE Fei, LI Gang. Discussion on Networking Energy Integration for Energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1):9-16. DOI: 10.7500/AEPS20150708002.
- [3] 茆美琴,丁勇,王杨洋,等.微网——未来能源互联网系统中的“有机细胞”[J].电力系统自动化,2017,41(19):1-11. DOI: 10.7500/AEPS20170417007.  
MAO Meiqin, DING Yong, WANG Yangyang, et al. Microgrid—An “Organic Cell” for Future Energy Interconnection System[J].Automation of Electric Power Systems,2017,41(19):1-11. DOI: 10.7500/AEPS20170417007.
- [4] Seyed Ali Arefifar, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, Tarek H. M. El-Fouly. Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, Volume: 3, Issue: 3 Pages: 1491 - 1502, DOI: 10.1109/TSG.2012.2198246
- [5] Seyed Ali Arefifar; Yasser A. -R. I. Mohamed, Tarek H. M. EL-Fouly. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security [J], IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, Volume: 4, Issue: 3, Pages: 1567 - 1575, DOI: 10.1109/TSG.2013.2259854.
- [6] Seyed Ali Arefifar, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, Tarek H. M. EL-Fouly. Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids, IEEE Transactions on Power Systems, 2013, Volume: 28, Issue: 4, Pages: 4192 - 4200, DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2259852.
- [7] M. Venkata Kirthiga, S. Arul Daniel, S. Gurunathan. A Methodology for Transforming an Existing Distribution Network into a Sustainable Autonomous Micro-Grid. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, Volume: 4, Issue: 1, Pages: 31 - 41, DOI: 10.1109/TSTE.2012.2196771.
- [8] Mohammed E. Nassar, M. M. A. Salama. Adaptive Self-Adquate Microgrids Using Dynamic Boundaries. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, Volume: 7, Issue: 1, Pages: 105 - 113, DOI: 10.1109/TSG.2015.2420115.
- [9] 王成山,宋关羽,李鹏,等.基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J].电力系统自动化,2016,40(22):168-175. DOI: 10.7500/AEPS20160620009.  
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and Prospect for Soft Open Point Based Flexible Interconnection Technology for Smart Distribution Network[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):168-175. DOI: 10.7500/AEPS20160620009.
- [10] Bing Han; Shaofeng Lu; Fei Xue; Lin Jiang; Xiaotong Xu, Three-stage electric vehicle scheduling considering stakeholders economic inconsistency and battery degradation. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, Year: 2017, Volume: 2, Issue: 3 Pages: 102 - 110
- [11] A Majzoubi, A Khodaei, Application of Microgrids in Supporting Distribution Grid Flexibility. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, PP (99) :1-1
- [12] 许志荣,杨莘,赵卓立,等.中国多微网系统发展分析[J].电力系统自动化,2016,40(17):224-231. DOI: 10.7500/AEPS20150627003.  
XU Zhirong, YANG Ping, ZHAO Zhuoli, et al. Analysis on the Development of Multi-microgrid in China[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(17):224-231. DOI: 10.7500/AEPS20150627003.
- [13] E Bompard, R Napoli, F Xue, Vulnerability of interconnected power systems to malicious attacks under limited information. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2008, 18 (8) :820-834.
- [14] E Bompard, R Napoli, F Xue, Assessment of information impacts in power system security against malicious attacks in a general framework. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94 (6) :1087-1094.
- [15] A Clauset, ME Newman, C Moore. Finding community structure in very large networks. Physical Review E, 2004, 70 (2) :066111.
- [16] S Arianos, E Bompard, A Carbone, F Xue. Power grid vulnerability: A complex network approach. Chaos, 2008, 19 (1) :013119.
- [17] E Bompard, R Napoli, F Xue. Extended topological approach for the assessment of structural vulnerability in transmission networks. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4 (6) :716-724.
- [18] Mohamed M. Hamada, Mohamed. A. A. Wahab, Nasser. G. A. Hemdan. Simple and efficient method for steady-state voltage stability assessment of radial distribution systems. Electric Power Systems Research, 2010, 80:152-160.
- [19] Dulce Fernão Pires, Carlos Henggeler Antunes, António Gomes Martins. NSGA-II with local search for a multi-objective reactive power compensation problem. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43:313-324.  
Hossein Haddadian, Reza Noroozian. Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices. Applied Energy, 2017, 185:650-663.



- [20] Jinye Zhao, Tongxin Zheng, and Eugene Litvinov, A Unified Framework for Defining and Measuring Flexibility in Power System. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL.31, NO.1, JANUARY 2016.
- [21] Andreas Ulbig, Göran Andersson, Analyzing operational flexibility of electric power systems. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 72 (2015) 155–164.
- [22] 宋蕙慧,于国星,曲延滨,Hak Man KIM, Web of Cell 体系——适应未来智能电网发展的新理念. 电力系统自动化, Vo 1.41 No.15 Aug.10, 2017.
- SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of Cell Architecture—New Perspective for Future Smart Grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15):1-9.
- 

## Partitioning of Virtual Microgrids by Electrical Coupling Strength

WU Chunchao<sup>1</sup>, XUE Fei<sup>2</sup>, XU Xiaotong<sup>2</sup>, LU Shaofeng<sup>2</sup>, JIANG Lin<sup>3</sup>, LI Gang<sup>4</sup>

(1. SDIC Baiyin Wind Power Co., LTD, Lanzhou 730000, China; 2. Xi'anJiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China; 3. University of Liverpool, United Kingdom; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

**Abstract:** With fast development in research of Smart Grid and Energy Internet, more and more distributed generation and energy storage devices are connected into distribution networks, intelligence of distribution network has become as a tendency. It is a big challenge for large-scale conventional distribution networks to be consistent with requirements of free, equal and flexible interaction. This paper proposes to partition conventional power distribution networks into different virtual microgrids with high internal convergence based on structural coupling strength. Furthermore, an implementation framework based on extended CPS and a developing framework consisting of three phases have been introduced. Corresponding to the target of the first phase, by definition of electrical coupling strength, the classical Newman fast community-detection algorithm is upgraded to make automatic optimal partitioning of virtual microgrids. Through case studies, the proposed algorithm has been justified as efficient and reasonable.

**Key words:** Virtual Microgrid; Electrical Coupling Strength; Newman Partitioning Method; Smart Power Distribution