

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202081

# 分层分群电网体系结构

余贻鑫, 刘艳丽, 秦超, 孙冰

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 未来电网的超复杂性, 使得电网体系结构(grid architecture)的研究至关重要, 它是整个电网最高级别的描述(最顶层的模型)。从三个角度评述“分层分群的电网体系结构”的理念: ① 互联系统平衡区(balance area, BA)范式的拓展; ② 层流结构(laminar structure)的数学基础; ③ 学习互联网(Internet)的智能。清晰地表明, 基于“将系统分解为群集(clusters)的层次结构和全局协调”以及“每个集群(cluster)都保持自己的净功率平衡和局部自优化”的分层分群体系结构的电网(如具有智能外围的智能电网 GRIP)像 Internet 一样智能, 且有数学基础, 特别适合未来电网的需要。这些研究可为电网现代化规划和设计提供有价值的新视野和新方法。

**关键词:** 互联系统; 平衡区; 集群; 智能外围; 分层优化解耦; 互联网

## Layered and clustered grid architecture

YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, SUN Bing

(Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The extreme complexity of the future power grid makes research on grid architecture very important. It is the highest level (topmost) description (model) of the entire grid. This paper discusses the concept of “layered and clustered grid structure” from three perspectives: the expansion of the balance area of the interconnected systems, the mathematical foundation of the laminar flow structure, and learning the intelligence of the Internet. Research has shown that a layered and clustered grid architecture (such as GRIP), based on the concepts of “decomposing the system into a layering structure of clusters and implementing global coordination” and “each cluster maintaining its own net power balance and local selfish optimization”, has a mathematical foundation and is as smart as the Internet, such that it is especially suitable for the needs of future grids. These studies can provide a valuable new vision and new methodologies for power grid modernization planning and design.

**Key words:** interconnected systems; balance area; cluster; GRIP; layering as optimization decomposition; Internet

## 0 引言

电网体系结构(grid architecture)可为电网现代化规划和设计提供有价值的新视野, 以及面向未来的技术投资和降低集成成本的方法, 这是电网(公用事业)的监管者和高管都同样关注的两个问题。适当的结构可以创建固有的电网特征, 从而增强其韧性(resilience)和能力, 并限制电网改变中的不利影响以保护投资。精心设计的电网结构可简化下游决策, 释放从事单个组件或系统的架构师和工程人员的创造力, 并确保不会产生障碍甚至使工作无效的意外后果。由于这些原因, 在进行电网现代化的其他方面工作之前, 考虑电网体系结构的问题至关重要。它是整个电网的最高级别的描述(最顶层的模型)。

本文将从三个角度评述“分层分群的电网体系结构”的合理性和重要意义。1) 互联系统平衡区范式的拓展; 2) 层流结构的数学基础; 3) 学习互联网的智能。以期引起对电网体系结构学研究的注意。

全文由 5 节组成:

第 1 节介绍互联(输电)体系的体系结构, 它是电网体系结构理论与实践的典范, 具体内容包括: 平衡区(balance area, BA)的概念; 互联系统(由若干互联平衡区组成的)群集运行规范; 微网——平衡区理念在含高比例多变的分布式电源(variable distributed energy resources, VDERs)的局部配电网中的应用。

第 2 节介绍电网分层(layering, hierarchy)分群体系的层次结构, 具体内容包括: 电网体系结构改变

的原动力;带有智能外围的智能电网(smart grid with intelligent periphery, GRIP)的构想—互联系统群集模式由输电向外围的拓展; GRIP 的群集(clusters)运行规范。

第 3 节介绍电网分层分群体系结构的数学基础, 具体内容包括: 数学基础—分层优化分解(layering as optimization decomposition); 层流网络及其运行规范; 网络效用最大化(network utility maximization, NUM)问题举例。

第 4 节介绍建设像互联网一样智能的电网。

第 5 节给出结论。

## 1 互联(输电)系统的体系结构

### 1.1 平衡区的概念—互联电力系统的核心理念

电力系统早期采用了统一电力系统的发展模式。建立结构合理的大型电力系统不仅便于电能生产与消费的集中管理、统一调度和分配, 减少总装机容量, 节省动力设施投资, 提高系统运行的安全性和稳定性, 而且有利于地区能源资源的合理开发利用, 更大限度地满足地区国民经济日益增长的用电需求。

然而, 传统的集中控制模式处理数百甚至数千个监测点和控制点的信息尚可, 当独立系统的规模进一步扩大时, 集中控制模式就难以适应, 于是 20 世纪 20 年代至 50 年代互联系统模式应运而生。互联系统(interconnected systems)是若干独立电力系统(在文献[1]中被称为控制区, 后来改称平衡区 BA)通过联络线或其他设备连接起来的系统, 并建立了互联的“标准”<sup>[1-2]</sup>。平衡区的运行规范可概括为<sup>[3]</sup>: 每个平衡区有义务维持其对外的和事先约定的交易日的计划(on schedule)功率, 同时其内部发电的调节需要随时吸收它自己负荷的变化, 即使在该区域内有大的扰动时, 也需达到此标准, 平衡区如何运作以完成该目标是其自己的事。历史上的统一电力系统实际上是单 BA 系统。

图 1 给出了由 3 个平衡区构成的互联电力系统<sup>[3-4]</sup>示意图, 各平衡区中均存在发电设备, 分别记为  $G_A$ 、 $G_B$  和  $G_C$ , 各平衡区中的负荷分别记为  $L_A$ 、 $L_B$  和  $L_C$ 。对于任一平衡区, 运行过程中需要随时满足如下的功率平衡约束:

$$P_T = P_{AG} - P_{AL} \quad (1)$$

式中:  $P_{AG}$  表示平衡区内部的总发电功率;  $P_{AL}$  表示平衡区内部的总负荷功率;  $P_T$  表示该平衡区与其他平衡区联络线上的计划功率代数和, 以功率流出为正, 流入为负。在互联系统运行期间, 当某平衡区

内的  $P_{AL}$  变化时, 该平衡区内  $P_{AG}$  要通过内部调度(dispatch)跟随  $P_{AL}$  的变化, 从而实现  $P_T$  保持之前计划功率(power on schedule)不变, 以分担维持互联系统瞬时功率平衡的责任。此外, 联络线上的计划功率  $P_T$  不允许频繁变化, 在一天内需要平稳在为数不多的几个水平上(以保证平衡区能够实现其安全优化运行——包括机组启停的约束), 以确保互联电力系统的安全性。

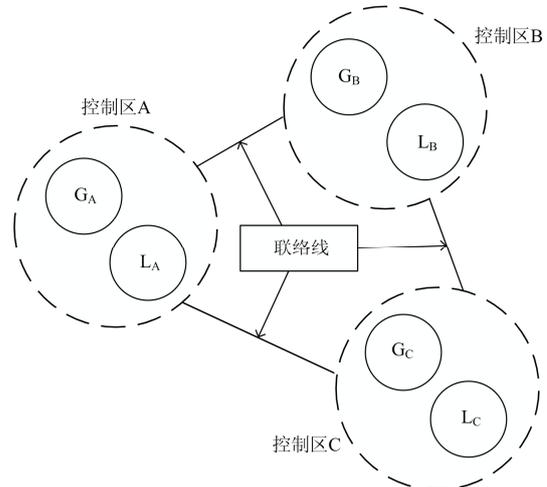


图 1 由 3 个平衡区构成的互联电力系统示意图  
Fig. 1 Diagram of interconnected power systems consisting of three balance areas (BAs)

多个平衡区互联的主要目的有两个: 1) 保证供电的连续性; 2) 实现电力生产的经济性。在正常运行期间互联的多个平衡区共享发电, 通过利用区域负荷之间的不同时性和可用的低成本容量, 优化比邻平衡区之间的功率交换, 能够降低互联系统的整体运行成本和推迟新增发电容量的投资; 在某个平衡区内因大修而需要机组计划停运时可通过计划功率的调整实现调峰。不过, 每个平衡区在分享互联运行好处的同时, 也被期望分担同等的责任, 以达到平滑的、睦邻的和互惠的运行, 这涉及到按照上述互联规范所建立的系统管制内的所有合作参与者。

### 1.2 互联系统(由若干互联的平衡区组成的)群集运行规范

在正常情况下, 多平衡区互联系统的发电控制可通过以下 3 个方面实现:

1) 满足全系统功率平衡, 即要达到全系统的发电功率实时地同全系统负荷需求相匹配。是否实现总供需平衡的判断准则是系统频率保持在额定频率(在可接受的波动水平内)不变。

2) 互联系统内各平衡区合理分摊全系统的发电(分配到各平衡区), 其目标是把发生在互联系统范围内的负荷变化划分给各个平衡区。合理的分摊准则是一个平衡区的总发电跟随该区域的总负荷变化(即每个区域吸收它自己的负荷变化)。平衡区内部的发电与负荷可能不相等, 但对于这个区域与系统的其余部分之间占主流的交流模式(计划安排)而言, 只差一个固定值。

3) 对于每个平衡区内可供选择的电源, 从经济自优化(selfish optimization)的角度或以市场竞价的方式, 安排它们的发电功率。

在紧急情况下, 互联系统的所有旋转备用容量共享, 从而为所有平衡区的连续供电做出贡献。据统计, 北美电网中约有 70 个平衡区, 一个平衡区在地理区域上是唯一的运行实体。各平衡区的调度中心装有先进成熟的监控系统(如能量管理系统 EMS), 并实行全年 24 h 值班。为了协调更大区域内的电网运行, 由国家调度和大区调度(可靠性协调组织)负责进行大区内的电网安全性分析, 并且实施一个或多个平衡区在紧急情况下的运行协调<sup>[5]</sup>。就中国目前的电力系统调控方式而言, 每个省网可以看成是一个平衡区。

### 1.3 微网——平衡区理念在含高比例多变的分布式电源(VDERs)局部配电网中的应用

如图 2 所示, 微网是指带有明显定义了电气边界的互联的负荷与分布式发电群(cluster)<sup>[注 1]</sup>, 相对于电力公司它是单个可控的实体。为了使它能够以

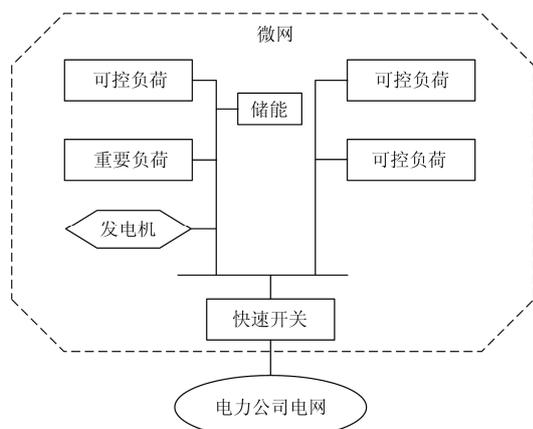


图 2 微网示意图

Fig. 2 Diagram of a microgrid

注 1: 本文中把 Cluster 译为集群或群, 把 Clusters 译为群集, 它们是电网的基本单位。

联网或孤岛这两种模式运行, 微网可以通过开关设备与电网连接和断开。

本质上, 它是把互联输电系统中平衡区的理念下放到配电系统, 每个微网相类似一个平衡区(对大电网它是个“好市民”), 区内装有能量管理系统(EMS)和能够做出响应的控制系统<sup>[6]</sup>。

## 2 电网分层(Layering, Hierarchy)分群体系结构

### 2.1 电网体系结构改变的原动力

电网的变化已经日益偏离 20 世纪电网发展所依据的基本原理和假设。如果不指出这些, 会对电网的可靠性和功能造成严重的不良后果。发展的新原动力, 主要是演变中的用户期望、新技术的涌现以及从大规模的中央经济到网络经济的改变。后者是由连接到配电网边际渗透率日益增长的 VDER<sup>[注 2]</sup>和无处不在的通信联系所驱动的。此外原动力中还包括韧性不足和赛博攻击(cyber-attack)威胁的不断增加。

### 2.2 带有智能外围的智能电网(GRIP<sup>[2]</sup>)的构想——互联系统群集模式由输电向外围的拓展

置于高压输电系统内的 EMS 覆盖了数百个发电机和变电站, 数十年来在管理和控制电力系统以确保其经济可靠地运行方面取得了巨大的成功。将这个系统及其底层的集中式操作范式扩展到配电系统, 并扩展到未来网络中成千上万的生产型消费者(prosumers), 将导致效率低下, 是不明智和站不住脚的。

文献[2]提出了如下的设想: 未来的配电网、微网、建筑单元(大楼、工厂和住宅等)与输电系统的差异将逐步消失, 具有本地发电和双向电力潮流的特点, 都将配有 EMS 并按照“群集”理念<sup>[6]</sup>实现各自近实时的净功率平衡。

互联输电系统是若干个平衡区(即区域性输电网)互联起来的群集(clusters), 每个平衡区是一个集群(cluster); 每个区域性输电网是若干个配电网互联起来的群集, 每个配电网是若干个微网、建筑单元组成的群集, 每个微网又可以是若干个建筑单元互联起来的群集。形成了如图 3 所示的多层的群集层次结构。如果这个图扁平化, 则形成群集嵌套。

注 2: 分布式发电是电力的未来, 也是能源的未来<sup>[6]</sup>。

和平衡区相似,每个群都有:1)发电和/或负荷;2)智能控制(EMS)和通信。群的基本功能也包括以下三个步骤:1)进行发电/负荷调度(dispatch),以维持净功率平衡和自身优化(selfish optimization)<sup>[注3]</sup>;2)当地的反馈控制,用于平滑波动;3)通过削减发电/负荷来缓解故障。

分层分群的概念看似与当今的电力系统并无太大不同<sup>[7]</sup>,在许多方面差异不大。但是一个关键的不同是,潮流不再只是从大型系统到用户单向流动。首先,配电系统或大电网上大多数节点乃至终端用户的电表都可以注入和输出功率,并且可以在这两个模式之间平稳地切换。进而,这些特点再加上多种规模的经济高效的储能的出现,改变了一切,至少需要对配电系统及其运行进行变革。从大系统和批发市场运营商的角度来看,他们希望每个输电和配电(T&D)接口都可以在充当负荷节点和充当供应节点之间切换运行方式。

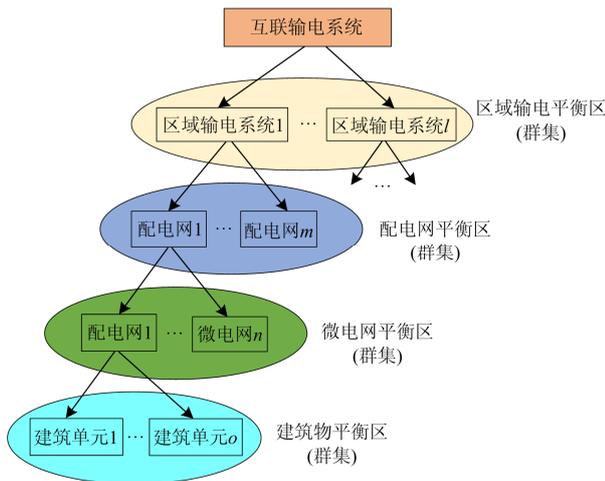


图3 电网分层分群(群集嵌套)体系结构示意图  
(配电网中也可能直接包括建筑单元)

Fig. 3 Diagram of layered and clustered (clusters nesting) architecture of grids

### 2.3 GRIP 的群集运行规范

1) 资源发现与管理:采用主动报告策略,每个集群周期性地向其他集群报告自身资源现状,同时更新其相邻集群的相应信息,系统中每个集群能够知晓彼此的存在。

注3:功率平衡是电网的第一需要。上一层电网的 dispatch 的结果是下一层电网的 on schedule 的方案,所以:①层数越低 on schedule 越频繁,从而可减小底层净功率平衡的负担;②如果上一层电网在做潮流优化和网络重构时对其与下一层联络线上的功率预测的准确度高,或进行上下两层协调优化,则可预先保证下层具有较好的实现功率平衡的能力。

2) 连通性与责任分摊:集群可灵活接入/断开,接入后集群具有自治性,群集共同分担责任(每个集群向整个电网贡献自己的能力,不仅是能源消费者,也是能源提供者)<sup>[注4]</sup>。

3) 高效的集群间数据共享和交换协议:集群之间通过直接交换信息来实现资源共享(而非集中调度),交换协议定义了通信时信息必须采用的格式和这些格式的意义。

实现协作的工具是解决一个共同问题对电网组件(即装置,系统或组织)进行分工合作的工具。

为使电网体系结构的规范或开发具有严谨性,尽可能地使用数学的方法和新的(如互联网和物联网的)方法学。

## 3 电网分层分群体系结构的数学基础

### 3.1 数学基础

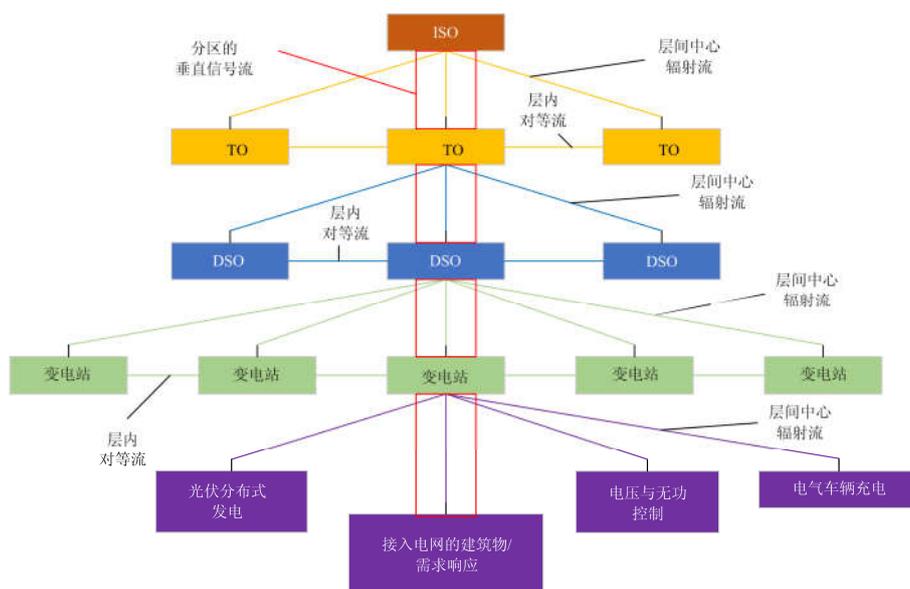
文献[8]指出:分层优化分解(layering as optimization decomposition)提供了一种从上而下的方法,用于根据第一原理(最基本的命题和假设)设计分层协议栈。其所产生的概念上的简单性与不断增加的通信网络的复杂性形成了鲜明对比。该框架的严格性和相关性的两个基石是“网络作为优化器”和“分层分解”。它们在一起提供了一个有前景的角度,不仅可以理解当前分层协议栈中什么“起作用”,而且还可以理解其为何起作用,什么可能不起作用,以及网络设计师有哪些替代方案。

美国太平洋西北国家实验室<sup>[9]</sup>通过分层优化解耦(layering as optimization decomposition)研究了众所周知的 NUM(详见 3.3 节)技术,并把这个技术称为层流协调框架(laminar coordination framework),把由它导出的特定的协调结构称为层流网络(laminar network)。用这个框架,能够:1)识别各种各样(同电网的控制结构和基础设施相匹配)规模的协调结构(网络);2)对含有特别高比例 VDER 的输电和配电系统进行协调的众多方法进行比较分析。

### 3.2 层流网络及其运行规范

基于数学基础,文献[9]提出了一个协调节点网络(如图4所示),其中:

注4:第三次工业革命使能源互联网内可再生能源具有分散性的特点,对此,必须采取协作模式,而非集中式或分级指挥和控制机制。因为,协同行为有利于以进一步分配的形式共享所创造的利益,各集群将共同努力确保可再生能源的最充分和最有效利用,通力合作、追求共同利益是实现经济可持续发展的最佳途径。各集群必须按要求通过调度保持个体净功率平衡,分担维持系统瞬时净功率平衡的运行任务<sup>[2]</sup>。

图 4 层流协调网络实体-关系(E-R)图, 以及用于协调和对等交互的关键数据流<sup>[8]</sup>Fig. 4 Entity-relationship (E-R) diagram of laminar network and key data flows for coordination and peer to peer interactions<sup>[8]</sup>

1) 所有参与优化的节点(或域)<sup>[注5]</sup>递归分层, 每层都具有中心辐射型层间通信(hub-and-spoke inter-layer communication)和点对点通信(peer to peer communication)。

2) 每个节点(或域)解决了较大优化问题的某些方面, 并在逻辑上与其上方和下方的节点进行通信, 并可能与其相邻的对等节点进行通信。

3) 协调是以整个节点集(或域集)的分解优化问题的关联解为基础的, 从而能为每个控制元素提供必要的协调信号。

依据文献[9], 能满足边界约束、控制联合与分解以及可扩展性等属性的主要原则是: 全局协调内部的局部优化。

注意, 协调不是控制, 尽管如果需要, 可以使用目标分解协调机制来解决控制问题。

本质上是, 所有节点协作解决一个常见的优化问题, 定会产生必要的协调信号。在局部, 每个过程都可以使用协调框架内的本地目标和约束来执行优化。为明确基本数学含义, 以 NUM 问题中最基本的直接原始解耦(direct primal decomposition)为例进行介绍。更多的较复杂的 NUM 分布式算法, 本文不再涉及, 读者可参看文献[8,10]。

### 3.3 NUM 问题举例

考虑以下关于  $\mathbf{y}$ .  $\{\mathbf{x}_i\}$  的 NUM 问题:

注 5: 节点(node), 即域(domain), 在实施自优化时也是计及约束的, 本文中的 cluster 是一种以具有净功率平衡能力作为约束的域, 因而分层分群的结构包含分层分群的结构。

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{y}, \{\mathbf{x}_i\}} \sum_i f_i(\mathbf{x}_i) \\ \text{subject to} \begin{cases} \mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_i, \forall i \\ \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i \leq \mathbf{y}, \forall i \\ \mathbf{y} \in \Psi \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

对于一个具有耦合变量的 NUM 问题, 如果固定其中某个变量, 优化问题就可解耦为几个子问题, 此时采用原始解耦是适当的。譬如, 把变量  $\mathbf{y}$  固定, 则问题将解耦。这就可以将式(2)中的优化分为两层。在较低的层次上, 当  $\mathbf{y}$  固定时, 式(2)解耦为若干个子问题, 每个子问题中只包含一个  $\mathbf{x}_i$ 。

$$\begin{cases} \max_{\{\mathbf{x}_i\}} f_i(\mathbf{x}_i) \\ \text{subject to} \begin{cases} \mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_i, \forall i \\ \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i \leq \mathbf{y} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

在较高层次上, 有一个主问题, 通过求解式(4)负责更新耦合变量  $\mathbf{y}$ 。

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{y}} \sum_i f_i^*(\mathbf{y}) \\ \text{subject to} \mathbf{y} \in \Psi \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $f_i^*(\mathbf{y})$  是给定  $\mathbf{y}$  时问题(3)的最优目标值。如果原来的优化问题式(2)是凸的, 则全部子问题和主问题都是凸的。

如果函数  $\sum_i f_i^*(\mathbf{y})$  是可微的, 则主问题式(4)可用梯度法求解。如果目标函数不是可微的, 则可采用子梯度法。而式(3)中的子问题可以通过  $\mathbf{y}$  的知识

局部地独立解决。很显然，式(3)中的约束变量形式是使问题可以如此简练地处理的基础。

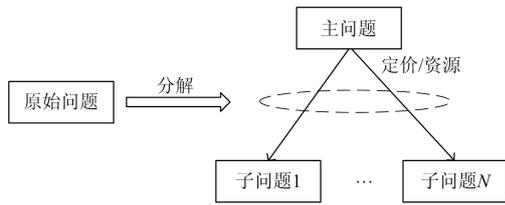


图 5 优化问题分解的示意图

Fig. 5 Diagram of the decomposition of optimization problems

事实上，1) 电网中有很大一类问题其目标函数具有式(2)目标函数的形式，如输电网协同优化潮流<sup>[11]</sup>、安全成本优化(最优安全控制)、紧急控制和安全约束机组启停优化等；2) 借助于文献[12]中所介绍的注入功率空间上安全域边界的近似超平面表达式，可以使优化约束具有式(3)的形式，把分层分群电网体系结构中很大一类电网最优化问题归纳为如式(2)一式(4)所示的形式，从而变成了可以使用原始直接法求解的 NUM 问题。这样，不仅可以避免在子系统自优化过程中大量嵌入的潮流计算、特征值分析与时域仿真，而且可以快速确定协调变量  $y \in \Psi$ ，从而显著提升计算效率。

### 3.4 小结

把第 2 节中的 GRIP<sup>[2]</sup>的电网分层分群体系与本节的层流网络<sup>[8]</sup>加以比较，不难发现在以下两个方面二者完全一致。

1) 将系统分解为群集(clusters)或域(domains)的层次结构(如图 3 或图 4 所示)，采用全局协调(coordinating, scheduling)内部的局部优化(selfish optimization, dispatching)的运行规范，能够对含有特别高比例 VDER 的多层次的输电和配电系统进行协调优化。

2) 层流网络的提出是通过分层优化解耦(layering as optimization decomposition)研究了众所周知的 NUM 问题而得出的，具有数学基础，从而推知 GRIP<sup>[2]</sup>的电网分层分群体系具有同样的性质。

## 4 建设像互联网一样智能的电网

电网被认为是 20 世纪最伟大的发明，而互联网是 21 世纪最伟大的创新。互联网是智能的，可以轻松适应接连不断地具有颠覆性的信息革命的快速变化的情景。在新的电力时代，我们希望电网能像互联网一样智能<sup>[13]</sup>。

### 4.1 互联网的分层、分布式(分群)范式

互联网具有子网层次结构，它是由多层(子)网络组成的网络，如图 6(a)所示，顶部是全球互联网

(NAP 为网络接入点)，其后的几层，包括 NSP(网络服务提供商)骨干网，ISP(本地互联网服务提供商)骨干网等，最后是 LAN(局域网)或用户。

互联网协议栈的分层结构如图 6(b)所示，称为 TCP/IP 堆栈。简要地说具有以下四层功能。

1) 应用层：用户与应用层交互。互联网的应用包括简单邮件传输协议(SMTP)，超文本传输协议(HTTP)和文件传输协议(FTP)等。应用程序将消息传递到传输层进行传输。

2) 传输层：通常将消息分为较小的数据包，并将数据包与目标地址一起单独发送。传输层确保数据包按顺序且准确无误地到达。

3) 网络层：网络层处理主机之间的通信。数据包封装在数据报中。路由算法用于确定数据报应直接传递还是应发送到路由器。

4) 物理层：物理层负责将包含文本信息的数据包转换为电信号并通过通信通道进行传输。

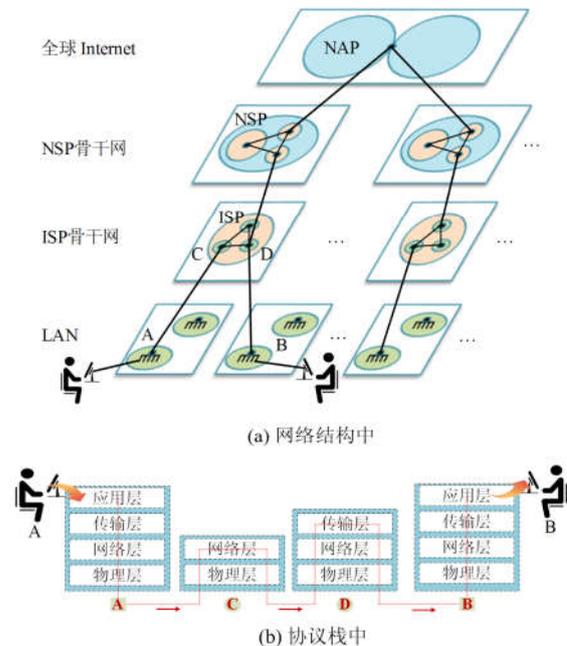


图 6 数据流路径示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 6 Diagram of data flow path<sup>[13]</sup>

协议栈的上一层利用下一层中可用的功能，并指示下一层执行任务。将上一层的指令编码为标头添加到消息的前端，每一层都在向下传递过程中添加一个标头。接收端的处理流程与发送端的流程正好相反，每一层从消息的标头中读取并翻译指令，并在从消息中删掉用于指示本层的标头之后向上传递消息。图 6(b)展示了电子邮件在具有两个中间路由器的协议栈中上下传递的路径。作为说明由群集的不同层执行的各种功能的示例，这里假设路由器

D 是 ISP 的主服务器, 并执行存储转发功能。

互联网之所以智能, 是因为分层体系结构明确了分工, 而分布式(分群)控制则使责任分担成为可能。路径上的许多路由器都承担了从 A 到 B 发送消息的责任。每个路由器的智能在于完成简单且具体的任务, 即正确地将消息转发给下一个接收方。分层体系结构中的功能分解使通过利用和配置现有的较低层功能来添加新的应用程序或功能成为可能, 使创新变得更容易实现。分布式控制和分层体系结构还使互联网能够抵御干扰并适应技术进步。

#### 4.2 GRIP 所基于的分层、分布式(分群)范式

现实电网运行模式是将系统运行的基本责任落在了一个集中的决策者——电网运营商身上, 即保持整个电网瞬时功率平衡且没有过载和异常情况。GRIP 不需舍弃成功的 EMS 或运行良好的输电系统网络运行的做法, 仅是使其变得更简单(对外围设备不承担任何责任)。

1) 基于 GRIP 构想的电网网络结构——群集的自然层次结构

基于 GRIP 构想的电网网络结构见图 3, 图 7(a) 是其部分电网示意图。虽然电功率无法像 Internet 中的数据流, 可以从一个节点引导到另一节点。但是从逻辑上可以通过子网追踪从发电到负荷的电力流。可以这样做的理论依据是, 当且仅当电网的全部子电网(并集铺盖全网且没有交集)都达到净功率平衡(即发电与负荷之差不变)且没有过载和异常时, 电网的任何地方功率平衡(输入与输出差值不变)且没有过载和异常。而这恰好对应于 GRIP 构想中关于集群的定义, 即把具有管理和控制其净功率平衡能力的一群(并集铺盖全网且没有交集)智能发电、负荷和生产性消费者(prosumers)所组成的电网的一个连通子网称为集群(cluster)。

##### 2) GRIP 集群功能的分层结构

GRIP 集群功能具有如图 7(b)所示的分层结构, 由市场层、计划层和平衡层三层组成。用户(即发电、负荷和生产型消费者)与电力市场交互以共享或交易电力。交易必须通过电网的计划和调度实现, 并且每个集群的净功率必须始终维持平衡。

(1) 市场层(market layer): 市场中的各种电力交易必须能在调度层中实现, 可以通过离线分析将集群运行约束转换为集群可接受的交易约束。

(2) 计划层(scheduling layer): 生产型消费者可以通过参与日前市场、小时前市场和实时市场中的一个或多个市场实现自身利益的最大化。必须提前完成计划的准备工作, 以首先确保集群在执行交易时具有维持净功率平衡的能力。

(3) 平衡层(balancing layer): 能确保集群在调度的时间步长(几秒钟或者更短的时间)内维持净功率平衡(包括需求响应和负荷控制)。

作为说明由集群的不同层执行的各种功能的示例, 在图 7(b)中假定需要配电网集群 D 进行发电/负荷的再调度。

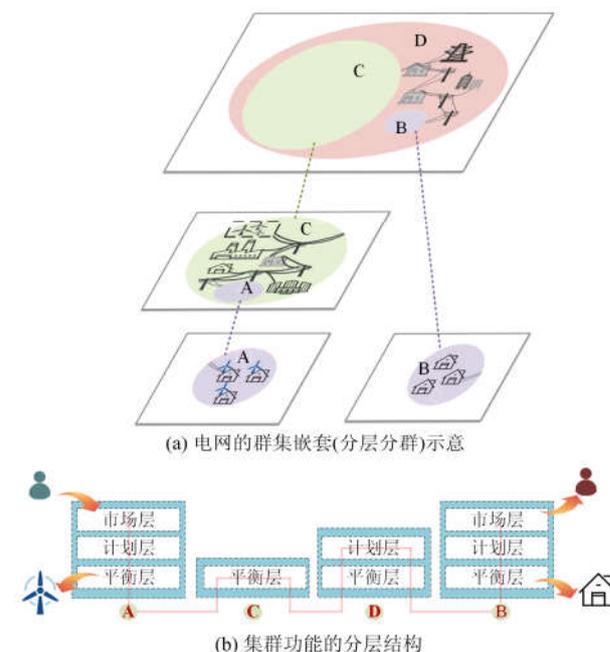


图 7 GRIP 的分层体系结构中由 A 到 B 输送功率  
Fig. 7 Diagram of power delivery from A to B in the hierarchy of GRIP clusters

##### 3) GRIP 的如下运行规范使它类似 Internet

(1) 在 GRIP 的网络中, 维护电力平衡的责任由所有集群共同承担:

每个集群必须维护其净功率平衡, 并承担计划、调度、平衡和安全性的所有职责。

每个集群必须作为一个自治单元运行; 即使在发生任何干扰(例如集群中的发电故障)的情况下, 也要严格遵守其已承诺的计划(schedules)。每个集群都必须能够防止计划外的潮流, 并从集群内部或上一层获得必要的储备(reserve)。上方集群的储备将能够维持该集群的净功率平衡, 并防止扰动进一步传播的影响。

(2) 在集群内部的分层体系结构中, 下层执行上层指示的任务, 并且必须明确定义接口。市场层期望计划层(scheduling layer)执行计划层认为可接受的任何交易。构成可接受交易的内容必须明确定义。计划层准确地知道平衡层在平滑波动方面的能力水平。各层之间没有反复协商。

#### 4.3 基于新范例所提出的具有智能外围的电网 (GRIP)像 Internet 一样智能, 特别适合服务于将来的电网

1) 更好地利用多变的分布式电源(VDER): 分布式运营模式将最大程度地利用多变的可再生能源, 因为 VDER 的运营将掌握在当地利益相关者的手中, 他们对资源的预测、计划(schedule)和控制有更好的了解。

2) 为生产型消费者(prosumers)赋权: 生产型消费者可以完全控制自己的发电和负荷的运行, 并获得安装和运行更高效的设备的激励机制, 例如太阳能光伏、电池储能系统、电动汽车充电系统以及 ICT 硬件和软件等。

3) 与外围设备责任分担: 在新的数字化时代, 外围设备的智能和能力与电网运营商在管理其子电网方面相似, 因为硬件变得越来越便宜, 软件变得越来越智能。

4) 纳米、迷你和微电网的无缝集成: 新范式的责任分担特征与当今的纳米、迷你和微电网的自治或半自治理念兼容, 有助于它们的无缝集成。此外, 允许群集的半自治运行将防止生产型消费者“背叛电网”<sup>[14]</sup>。

5) 快速适应技术创新: GRIP 的分层体系结构使整合创新技术变得容易。

#### 4.4 小结

1) 互联网建立在促进技术创新的分层架构上, 其智能分布在整个网络层次结构中。

2) 分层分群体系结构的电网(如 GRIP)具有像 Internet 一样的结构特点和运行范式。

3) 基于新范例所提出的具有智能外围的电网 (GRIP)像 Internet 一样智能, 特别适合服务于将来的电网。

## 5 结论

基于“将系统分解为群集(clusters)的层次结构和全局协调”和“每个集群(cluster)都保持自己的净功率平衡和局部自优化”的分层分群体系结构的电网(如具有智能外围的智能电网 GRIP)像 Internet 一样智能, 且有数学基础, 特别适合未来的电网的需要。

请注意, 监管结构、行业结构和控制协调结构是一致的, 但是随着电网由于新兴趋势而发生变化, 控制结构越来越成问题。发电的分叉(跨输配电层次), 负荷的响应, 以及管理净负荷与总负荷相关的动态以及配电对输电运行的影响越来越大, 这表明需要分层分群体系结构的模型来确保可靠性责任。然而, 现实在 VDERs 的市场管理、需求响应的实施和部分智能电网规划中的确存在违反本文所述的

分层分群体系结构的问题。

## 参考文献

- [1] COHN B. Control of generation and power flow on interconnected systems[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1966: 1-100.
- [2] FELIX F W, PRAVIN P V, HUI R S Y. Smart grid with intelligent periphery for the future: architecture for the energy internet[J]. Engineering, 2015, 1(4): 436-446.
- [3] SUN Bing, YU Yixin, QIN Chao. Should China focus on the distributed development of wind and solar photovoltaic power generation? a comparative study[J]. Applied Energy, 2017, 185: 421-439.
- [4] 孙冰. 高比例风能和太阳能发电开发模式评估与优化[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
SUN Bing. Assessment and optimization on the development scheme of high penetration of wind and solar power generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [5] 丁道齐. 复杂大电网安全性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 35-48.
- [6] 余贻鑫. 智能电网的基本理念和关键技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [7] LORENZO K. The bottom-up (R) evolution of the electric power system[J]. IEEE Power and Energy, 2019: 17(2): 42-49.
- [8] MUNG C, STEVEN L, CALDERBANK A R. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures[J]. Proceedings of the IEEE, 2007: 95(1): 255-312.
- [9] TAFT J D, BECKERD A D. Grid architecture[R]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2015.
- [10] PALOMAR D, CHIANG M. Alternative decompositions for distributed maximization of network utility: framework and applications[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(12): 2254-2269.
- [11] YANG Tiankai, YU Yixin. Security region-based laminar flow coordinated optimization of grids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106406.
- [12] YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, et al. Theory and method of power system integrated security region irrelevant to operation states: an introduction[J]. Engineering, 2020, 6(7): 754-777.
- [13] LIU Yanli, YU Yixin, WU F F, et al. A grid as smart as internet[J]. Engineering, 2020, 6(7): 778-788.
- [14] BRONSKI P. The economics of load defection[R]. Rocky Mountain Institute and HOMER Energy, 2015.

收稿日期: 2019-09-13

作者简介:

余贻鑫(1936—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性与稳定性、配电网规划、智能电网等。E-mail: yixinyu@tju.edu.cn

(编辑 姜新丽)