

A Summary of Research and Development of Smart Microgrid at Home and Abroad

Yiwei Feng, Dandan Yang, Fangjie Ren

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu
Email: ywfeng@yeah.net, dandanyng@yeah.net, fangjieren@yeah.net

Received: Mar. 14th, 2019; accepted: Apr. 3rd, 2019; published: Apr. 10th, 2019

Abstract

With the increasing demand for renewable energy quality, it is difficult to meet the high-quality requirements of users by simply expanding the scale of the power grid. As an effective carrier, smart microgrid has been rapidly developed and paid attention. This paper first reviews the development of intelligent microgrid system, outlines the concept and foundation of intelligent microgrid, and focuses on the structural system and modeling method of smart microgrid. The management and allocation methods of multiple energy sources, and the stability of smart microgrid are analyzed. Finally, some problems existing in the smart microgrid system are described, and the development of the smart microgrid system is prospected and summarized.

Keywords

Smart Microgrid, Distributed Generation, Renewable Energy, Stability

智能微网的国内外研究发展综述

冯宜伟, 杨丹丹, 任方杰

兰州理工大学, 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州
Email: ywfeng@yeah.net, dandanyng@yeah.net, fangjieren@yeah.net

收稿日期: 2019年3月14日; 录用日期: 2019年4月3日; 发布日期: 2019年4月10日

摘要

随着社会对可再生能源质量的不断需求, 仅仅依靠扩大电网规模已经难以满足用户对电能的高质量要求, 作为分布式发电的有效载体, 智能微网得到了迅速的发展与关注。本文首先扼要回顾了智能微网系统的发展, 概述了智能微网的概念以及基础, 重点介绍了智能微网的结构体系及建模方法, 对多种能源的管

理调配方法、智能微网的稳定性及性能进行了分析。最后，描述了智能微网系统目前存在的一些问题，对智能微网系统的发展进行了展望和总结。

关键词

智能微网，分布式发电，可再生能源，稳定性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

1.1. 智能微网的简要发展史

智能微电网并非无中生有，它的出现是为解决传统电网无法满足用户对能源的精细化需求这一难题。21 世纪初期，在世界范围内接连发生的几次大面积停电事故使大规模电力系统集中式发电的运行难度较大、难以满足用户对电能质量的更高要求等弊端日益凸显。同时能源危机、环境污染也受到全球关注，仅仅依靠扩大电网规模显然不能解决这些问题，于是分布式发电作为集中式发电的有效补充，作为其有效载体，智能微网也得到了迅速的发展与关注。随着光伏、风电等可再生能源发电技术的发展，分布式发电日渐成为满足负荷增长需求、提高能源综合利用效率、提高供电可靠性的一种有效途径，并在配电网中得到广泛的应用。传统电网通过高电压互联网络从大型中央发电机供电，电力通过配电变压器交付给最终用户。然而，由于社会发展和工业需求，电力需求的快速增长，发电、输电和消耗电力的方式已发生改变[1]。日益增长的电力需求由传统能源如煤、天然气和汽油所驱动，而这些能源又向大气释放了导致气候变化的温室气体。由于化石燃料的枯竭，矿物燃料的高成本以及日益严重的环境问题，世界对用于发电的可再生能源的关注度越来越高，因此，利用可再生能源来发电是一个大趋势[2]。智能微网允许可再生能源安全地接入电网，以补充来自用户分布式发电和存储的电力供应。

近年来，作为一种现代化的解决方案，分布式发电技术(DG)已经开始受到关注，它具有污染少、可靠性高、能源利用效率高、安装地点灵活等诸多优点，可减少输配电损失，支持当地电网并提高系统稳定性，有效解决大型集中电网的许多潜在问题。分布式电源(DG)工厂通常与光伏系统、风力发电、小型水轮机、潮汐、沼气等可再生能源技术集成，实现分布式发电新兴潜力的更好方法是采取一种较为系统的方法，将发电和相关负载视为子系统或“微电网”。微电网被定义为包括微型涡轮、燃料电池、光伏(PV)阵列和风力涡轮等一组微型资源的小型分布系统，可连接到公用电网(并网模式)，或者在故障或其它外部干扰期间与公用电网隔离(孤岛模式)时独立运行，从而提高供电质量，客户可以获得更高效，更便宜和更清洁的能源。此外，微电网可以提高供电系统的可靠性，降低投资成本，减少排放，提高电能质量，减少配电网的功率损失。

智能意味着自动化操作，智能是指微电网的智能化，智能微电网技术的应用是在传统电力系统生产模式基础上增加一个存储电能的环节，使得原来几乎完全刚性的系统变得柔性起来，可以让整个电网系统运行更加合理，在用电高峰期，微网系统可以为负载提供能量；在负荷低谷期，微网系统可将电网中多余的能量存储起来。另外，在智能微电网系统中，许多分布式电源会硬性的将产生的电能输送给电网，电网智能被动承受，因此分布式电源输出的电能质量很大程度影响着电网系统。增加微网系统，可以对

电网中电能质量改善起到一个调节器的作用。微电网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统，微电网中的电源多为容量较小的分布式电源，即含有电力电子接口的小型机组，包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池、小型风力发电机组以及超级电容、飞轮及蓄电池等储能装置[3][4]，接在用户侧具有成本低、电压低以及污染小等特点。从微观看，微网可看作是小型电力系统，具备完整的发输配电功能，可实现局部的功率平衡与能量优化，与带有负荷的分布式发电系统的本质区别在于同时具有并网和独立运行能力。从宏观看，微网又可认为是配电网中的一个“虚拟”电源。智能微网可以智能地集成与其相连的所有用户行为，可将信息技术集成到现有电网中，通过供应商和消费者之间的实时双向交换电力信息来优化能源效率，从而实现多种能源优化互补，可以分析用户用电行为和习惯，在大数据的基础上，对用户进行精确供能。欧盟国家对微网的推广和部署预计将通过从能源供应商到最终用户进行优化，使能源消费者、欧洲能源系统和环境均受益，且有效利用 DER 使其构成欧洲未来电力网络战略研究议程的关键组成部分[5]。美国能源部对微电网也有着明确定义的电气边界，规定必须存在一个主控制器来控制 and 操作 DER 并作为单个可控实体，将微电网作为小型电力系统来产生，分配和调节用户的电流量[6]。国内对智能微网的研究尽管已取得一定的进展，但与欧洲、美国及日本等由研究机构、制造商和电力公司组成的庞大研究团队相比，我国在研究力量和取得成果上仍存在较大差距。

本文概述了智能微网的基础结构，并对其运行特性进行了分析与总结，并讨论这一领域目前存在的一些问题且进一步给出参考性的解决方案。

1.2. 智能微网的基础结构

智能微网主要由分布式发电单元，储能设备，负载等部分构成，分布式发电(DG)单元是微网的基本单元，微网系统有两种类型的发电技术：可再生资源，如太阳能光伏(PV)、风能、小型水力发电、海洋资源等；非再生资源，如复式发动机、燃气轮机、现代热动力组合(CHP)等[3]；大多数 DG 技术需要电力电子接口将能量转换为并网交流电源。转换过程所需的转换器可能是一个单级转换器(DC-AC 转换器)或双级转换器(DC-DC 转换器和 DC-AC 转换器)。转换器包含输出滤波器，与转换器串联在一起提高低开关频率的谐波性能。微网的分布式发电必须根据不同技术的特点和成本进行适当选择。

储能装置主要可以分为三大类：电化学系统(电池和液流电池)，动能储存系统(飞轮)和潜在储能系统(抽水储能和压缩空气储能)。对于这三类储能装置文献[7]进行了详细的比较。由于抽水储能系统和压缩空气储能系统是大规模的储能系统，它们大多用于标准电力系统的大功率范围，因此不适合小型可再生能源系统。微电网应用中的储能装置可以提高负载和分布式发电能源的功率不平衡、电能质量、可靠性和稳定性，根据负载特性和能量资源确定更合适的储能装置，一些关键储能技术总结如下所示：

1) 电池是最常用的储能设备之一，主要有铅酸、镍镉、镍金属氢化物和锂离子电池。铅酸蓄电池适用于长时间储能，它的性能较差，使用周期短(1200~1800 次)。镍镉电池与铅酸电池相比，镍镉电池具有更长的循环寿命、更高的能量密度和较低的维护保养，但成本过于昂贵。镍氢电池具有比镍镉电池高出 25%~30% 的能量密度，并与铅酸电池具有同等的循环寿命。与铅酸、镍镉和镍氢电池相比，锂电池的能量密度最高，但锂电池的投资成本和有限的寿命周期是锂电池的主要缺陷。为减轻光伏集成的负面影响，已经提出将电池存储系统集成到太阳能光伏系统中。

2) 飞轮储能装置具有寿命周期长、能量高、功率密度高的特点，但其缺点是有很高的摩擦损失，该装置可用于减少风能和太阳能系统产生的电力波动。

3) 超级电容器又称双层电容器，电容器与超级电容器的主要区别在于多孔膜的使用，多孔膜提供了两个电极之间的离子转移，因此电能可直接存储，响应时间非常小。此外，它的电容和能量密度值可以

比电容器大几百到几千倍。与铅酸蓄电池相比, 超级电容器具有较低的能量密度, 但具有较高的功率密度、较长的循环寿命和约 75%~80% 的能源效率。但这项技术的主要缺点是成本过高, 比铅酸电池高出 5 倍。超级电容器还可以缓解可再生能源的波动, 这在文献[8]中也进行了详细的介绍。

4) 超导储能系统的生命周期非常长, 从十个周期到数千个周期, 效率高达 95%, 响应速度非常快, 实现成本也很高, 在功率因数、频率调节、暂态稳定性、电能质量等方面有良好的改善。利用与风电相结合的超导储能系统可以控制孤岛模式下微电网的频率和电压, 当微电网在并网模式下运行时, 超导储能系统可以提供恒定的功率流, 克服风力发电引起的功率波动。

5) 钒氧化还原电池(VRB)是目前市面上的一种流动电池, 与传统的储能电池(BESS)相比较具有寿命长、维护低、功率和能量独立、充放电响应快、效率高等优点, 但与 BESS 相比运营和维护成本仍然相对较高。基于 VRB 的微电网文献比较有限, 因为这项技术已经被商业化。

微电网可为住宅, 商业和工业等不同类型的负载提供电能。这些负载可以分为两部分: 临界负载和非临界负载。一般来说, 商业和工业用户需要高强度的电能质量和可靠性, 被定义为临界负载, 而大多数住宅型负载被认为是非临界负载, 需要的服务质量较低。对负载的分类提供下面所列出的优点, 同时获得所需的稳定性操作和控制[9]:

- 1) 满足并网模式下净有功/无功功率所需的负载/微源控制策略, 及孤岛模式下电压、频率稳定性;
- 2) 提高关键型负载和敏感型负载的电能质量和可靠性;
- 3) 降低峰值以提高设备的评级;
- 4) 保持预期的操作和控制。

1.3. 智能微网的控制单元

智能电网技术包含有大量的设备, 如太阳能、风能或燃料电池, 这些设备可通过电力电子接口连接至电网。将电压源逆变器(VSI)作为电子接口有助于电网电压和频率的适当调整, 文献[10]将基于 VSI 接口的分布式发电单元分为两组, 对于发电单元的控制主要分为两类: 网络形成和网络跟踪。网络形成控制器负责分布式发电单元和负载之间的电压控制, 网络跟踪控制器通常用于电流控制模式中, 这种控制策略在分布式发电单元中的使用最为广泛, 并且最常用的网络跟踪技术是同步参考帧、静止参考帧。文献[11]提出了基于无源性的分布式能源控制系统稳定性的控制方法。文献[12]还利用对称分量变换对不同类型的网络跟踪器进行了研究。除了电压和电流控制外, 分布式发电单元还须调节有功功率和无功功率, 其中最常用的方法是 Q/F 下垂控制器和 P/V 下垂控制器。当 Q/F 下垂控制器用于无功功率补偿时, 有功功率控制器采用 P/V 下垂控制。

储能装置是微电网的重要组成部分, 可有效平衡可再生能源和负载之间的功率, 因此需要具体的控制策略来实现这一目标。文献[13]解释了如何利用模糊控制提高风电场储能系统的风电输出功率, 还存在滞环电流控制, 神经网络, PI 和 PID 控制, 蒙特卡罗模拟方法等控制策略[14] [15] [16]。

2. 智能微网的建模及控制

2.1. 智能微网的建模

电力系统(EPS)被认为是异构耦合振荡器的网络, 每个振荡器对应作为可变幅度和可变频率电压源的同步发电机[17]。微电网中通常存在旋转电机和传输线, 它们通过与负载进行相互作用来决定电力系统的响应, 旋转电机和感应线路的惯性使有功功率和无功功率不再解耦。普通模型将忽略非线性影响且允许通过下垂增益对发电机进行闭环控制, 从而获得足够鲁棒的响应。然而现代电力系统部署微电网存在一些新的控制挑战, 尤其与微电网系统的稳定性和自然响应有关的控制方面。文献[18]提出具有多个分布式

能源单元的微电网的状态反馈控制策略来改善它们在孤岛运行和并网运行模式下的瞬态特性, 将每个 DER 单元的主要控制设计为用于整个网络的简单但有代表性的集总动态模型, 且对其瞬态响应及其鲁棒性进行优化, 该文献所描述的电子接口分布式能源示意图如图 1 所示。

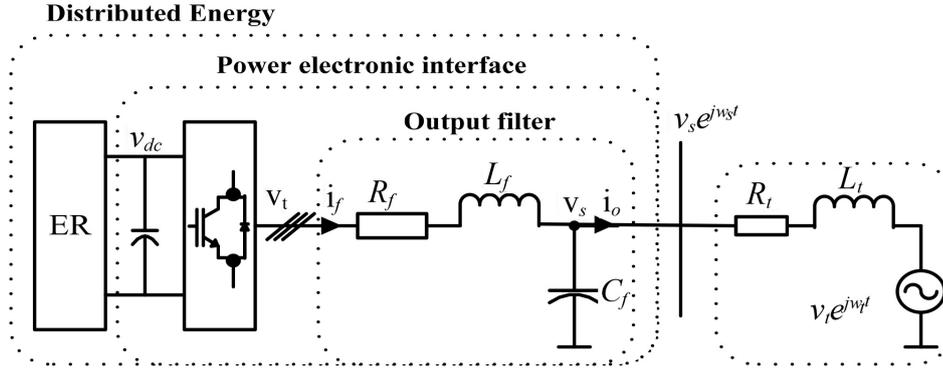


Figure 1. Schematic diagram of distributed energy for electronic-interfaced
图 1. 电力电子接口分布式能源示意图

分布式能源(DER)指能源资源(ER)及其电网电力电子接口(PEI)的集合, ER 表示能量存储系统或具有集成能量存储的发电机。考虑到 EPS 是一个复杂的振荡器网络, 假定每个 DER 单元可以被控制为 AC 电压源, 该电压源在图 1 中表示在耦合点 $v_s e^{j\omega_s t}$ 上具有可调电压幅值和频率的总线, 因此采用内部控制环路作为滤波电容器电压, 变量 v_s 和 ω_s 是动态模型的输入变量。为了将控制设计简单化, 将微电网其余部分建模为具有串联阻抗的集总交流电压源 $v_g e^{j\omega_g t}$, 与变量 v_g 和 ω_g 相关的不确定性主要通过状态观测器的鲁棒设计和反馈增益来抵消。根据图 1 模型定义以下描述电流和角度的动态微分方程组:

$$L_g \frac{di_o}{dt} = -R_g i_o - j\omega_s L_g i_o - v_g e^{j\delta} + v_s \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_g - \omega_s \quad (2)$$

角度 δ 是不能直接测量但其动态可由状态观察器进行估计的状态变量。为使该模型形象化, 上述等式用以下状态空间的形式描述:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad y = h(x) \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_g}{L_g} x^{(1)} - \frac{v_g}{L_g} \cos x^{(3)} \\ -\frac{R_g}{L_g} x^{(2)} - \frac{v_g}{L_g} \sin x^{(3)} \\ \omega_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_g} & x^{(2)} \\ 0 & -x^{(1)} \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad h(x) = \begin{bmatrix} x^{(1)} \\ x^{(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 x_j 表示状态变量的第 j 个元素, $x = [i_{od} \quad i_{oq} \quad \delta]^T$ 。模型的输出为电流矢量, $y = [i_{od} \quad i_{oq}]^T$ 。模型

的输入是分布式单元耦合点处电压的幅度和频率, $\mathbf{u} = [v_s \ \omega_s]^T$ 。

针对系统模型(3), 从控制理论的角度出发来设计相应的状态观测器和反馈控制器, 由于系统模型本身的非线性特性, 为便于进一步的研究, 不少学者都从线性的角度进行近似研究, 利用鲁棒控制的思想来设计, 初始状态选择为 $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$, 初始输入的工作点为 $\mathbf{u}_0 = [v_b \ \omega_b]^T$, 则线性化的模型可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \mathbf{u} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_0 \mathbf{x} \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_0 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0} + \sum_{i=1}^2 \left. \frac{\partial \mathbf{g}_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{u}^{(i)} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0), \quad \mathbf{C}_0 = [\mathbf{I}_{2 \times 2} \ \mathbf{O}_{2 \times 1}] \quad (8)$$

由上述(7)、(8)式可得到下列矩阵:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \frac{R_g}{L_g} & \omega_b & 0 \\ -\omega_b & -\frac{R_g}{L_g} & -\frac{v_b}{L_g} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此, 相应的输入 - 输出传递函数如下:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}_0 (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{B}_0 \quad (10)$$

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1}{L_g A_{ol}(s)} \begin{bmatrix} s + \frac{R_g}{L_g} & \frac{v_b \omega_b}{s} \\ -\omega_b & \frac{v_b}{s} \left(s + \frac{R_g}{L_g} \right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$A_{ol}(s) = s^2 + 2 \frac{R_g}{L_g} s + \left(\frac{R_g}{L_g} \right)^2 + \omega_b^2 \quad (12)$$

模型参数 L_g 和 R_g 嵌入了微电网所有无源元件的效果, 通过将 DER 单元与微电网所连接变压器的漏电感和铜电阻近似化, 假设 $u(t)$ 是确定性信号 $u(k)$, 则获得以下精确的离散时间状态空间表示:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_k, \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_k \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_d = e^{T_s \mathbf{A}_0}, \quad \mathbf{B}_d = \int_0^{T_s} e^{A_0 \eta} \mathbf{B}_0 d\eta, \quad \mathbf{C}_d = \mathbf{C}_0 \quad (14)$$

2.2. 智能微网的控制

角度 δ 是未测量的(内部)状态变量, 它的估计需要电流测量、模型参数 L_g 和 R_g , 以及网络其余部分的操作点 v_g 和 ω_g , 若存在参数估计误差, δ 的估计将受到影响, 因此考虑将其稳态值进行预测, 有效使用 δ 的估计反馈。采用全阶状态观测器将 DER 单元的输出滤波器处电压的幅度和频率给出的输入状态进行重构。

状态观测器对系统的建模尤为重要。首先, 通过不完整的状态测量来实现状态反馈需要使用状态观测器。其次, 状态反馈提供重要的鲁棒控制特性, 例如输出反馈无法保证的大增益和相位裕度, 这适用

于微电网的主要控制，其中鲁棒性对于参数不匹配，未建模动态和其他不确定性下的稳定性至关重要。基于线性化模型(13)处理线性二次调节(LQR)问题，通过 LQR 设计反馈控制，优化系统对所给定驱动力和状态轨迹的响应。该设计过程保证闭环动态系统的大相位和增益裕度[19]，利用 LQG/LTR 设计程序实现鲁棒控制特性。状态观测器和反馈控制限制了在 DR 单元耦合点处的电压幅值和频率的变化，因此观测器和反馈控制需被同时设计加以实现系统鲁棒性及电压幅度和频率调节。文献[18]中线性二次估计和调节问题的解决方案优化了状态变量矢量的轨迹，且输入变量，即电压幅度和频率，可以在鲁棒控制框架内根据操作要求进行调整。该文章还将所提出的策略与传统的下垂控制和先进的控制方法进行比较，通过使用 PSCAD/EMTDC 软件环境对三单元测试微电网进行时域仿真，在多种工作条件下验证了该方案的有效性。对几种干扰的响应，如拓扑变化和向并网运行模式的转换已经模拟，证实了所提方法的动态响应及其鲁棒性。

2.2.1. 智能微网的分层控制

文献[20]中所提出的智能微电网模型是将电池作为储能元件表示电网的三相电压源，包括其负载和非敏感负载且将非敏感负载放置在电网侧。其基本结构如图 2 所示，此处的智能微电网主要由一组径向反馈线构成，包含有三个敏感负载反馈(反馈 A-C)和一个非敏感负载反馈(反馈 D)。敏感负载反馈包含必须始终提供的敏感负载，每个馈线必须具有额定微源，以满足该馈线的负载。相反，非敏感负载反馈是馈电器，存在干扰或电能质量问题时可关闭该馈线；当供电设备存在问题时，反馈 A-C 可以使用静态开关从电网中孤岛运行，该静态开关可以在小于一个周期内分离，以便将敏感负载与电网隔离，从而最大限度地减少对敏感负载的干扰。在孤岛运行模式中，微电网可自动工作，因此，必须有足够的局部发电量来满足敏感负载的需求[21] [22]。此外，考虑到微电网运行过程中单个反馈所引起的干扰情况，每个敏感负载反馈必须具有足够的局部发电能力以供应其自身负载。孤岛运行模式下的微电网仅供应敏感负载，而非敏感负载将由电网供电。该文献还利用 simulink 仿真对所建立的模型进行了模拟，通过验证该模型对系统的运行模式进行了评估。

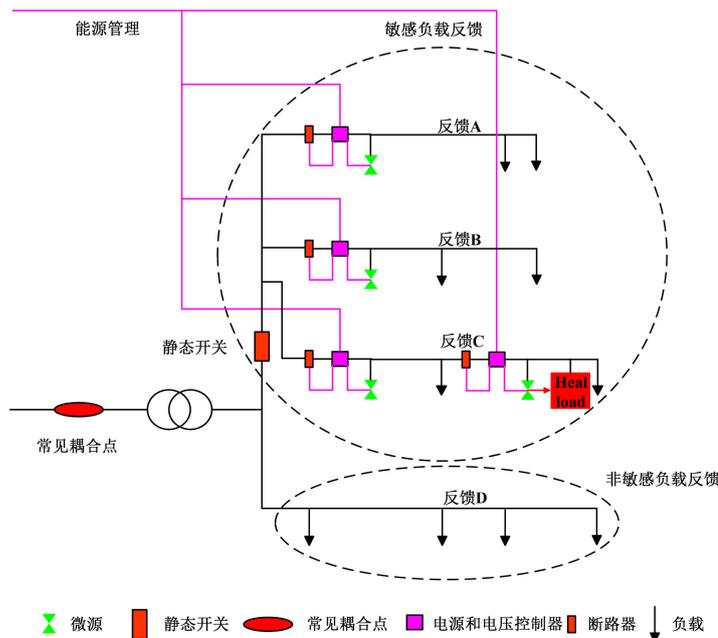


Figure 2. Smart microgrid architecture
图 2. 智能微网的结构

智能微电网控制器可以基于如图 3 所示的分层控制, 包括集中式或分散式控制器。分级系统的控制级别分类如下[23] [24]:

- 1) 由微控制器(MCS)和负载控制器(LCS)组成的局部控制器;
- 2) 微电网中央控制器(MGCC);
- 3) 分销管理系统(DMS)。

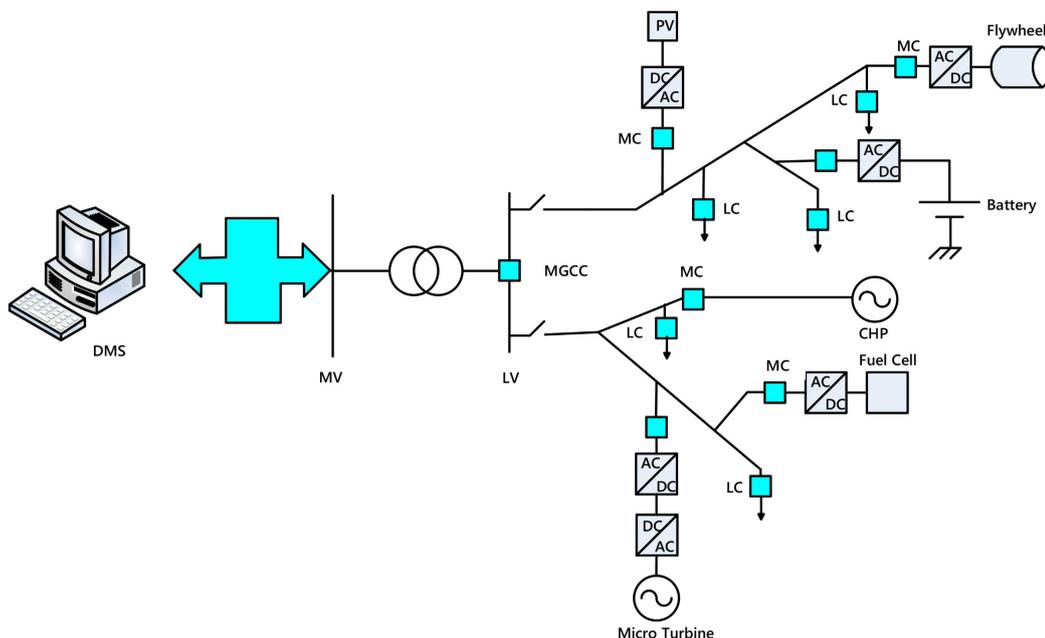


Figure 3. Hierarchical control of smart microgrid
图 3. 智能微网的分层控制

局部控制是智能微网控制的基本类别, 其主要用途是控制微源, 这种类型的控制器旨在无需通信系统即可控制微源及其电力电子接口的操作点, 无通信系统这一特点使系统的成本较低且电路简单, 将局部控制器的测量数据精简为局部电压和电流。并网模式运行模式下局部控制器可与其他类型控制器共存, 而在孤岛模式, 如文献[25] [26]所述, 局部控制器是所需的唯一控制器, 该控制器还必须确保微源的“即插即用”功能, 一个或多个微源必须能够在需要时随时随地无缝连接或断开配电网。此外, LCS 安装在可控负载上提供负载控制功能, 通常用于需求侧管理。每个微电网与其 DMS 间存在 MGCC, 具有从局部控制器的简单协调到优化微电网操作的主要职责, MGCC 的作用定义集中控制和分散控制之间的区别, MCS 和 LCS 遵循 MGCC 在并网模式下的命令, 并具有在孤岛模式下执行自身控制的自主权。

2.2.2. 智能微网的微源控制

并网模式到孤岛操作模式的转换可能导致发电和负载之间很大程度上不匹配, 从而导致严重的频率和电压控制问题, 若连接和断开过程同时涉及大量微源, “即插即用”功能也可能产生问题。为更好地利用可再生能源使不存在与能量的可变性和间歇性及电力不稳定性相关的问题, 须在包含大量小规模 RES 的局部电力系统中设计恰当的存储系统。微源具有较小发电容量且大多需要逆变器将其输出转换为适合电力系统的规格。因此由电力电子接口源支配的小尺寸源的连接可以被认为是无惯性系统, 该系统无法通过分散系统中的惯性响应初始功率或能量不匹配, 故智能微电网需要能量存储系统与管理系统来解决不匹配问题。由于需求冲突和通信局限性, 控制大量微源和具有不同特性的存储具有极大挑战。

微源的控制需确保在不改变现有设备的情况下将新的微源添加到系统中，可独立地选择设定点，微网可以快速地无缝连接至电网或从电网中隔离，无功和有功功率均可独立控制，满足负载的动态需求。每个微源控制器必须有效响应系统变化而不需要来自负载、静态开关或其他源的数据，这同样适用于静态开关。对于微源的控制框图如图 4 所示，左边的块计算 P、Q 和电压幅值的实时值，控制在逆变器端所产生的期望电压幅值和角度的两个下垂控制在单独的模块中实现，脉冲发生器负责向逆变器内部的电子器件发出正确的触发脉冲以跟踪控制器的请求。

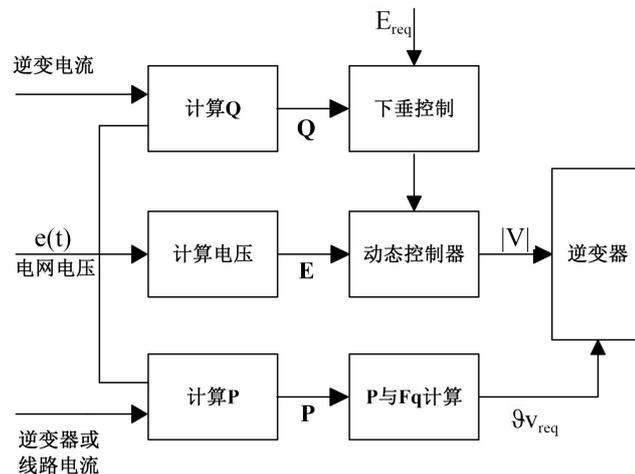


Figure 4. Microsource controller
图 4. 微源控制器

3. 智能微网的能源管理及稳定性

智能微电网是一种新型网络结构，在传统微电网系统生产模式基础上增加一个存储电能的环节，它是一组微电源、负载、储能系统和控制装置构成的系统单元，是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，既可以与外部电网并网运行，也可以孤立运行。因此，其稳定性问题也尤为重要，根据智能微网运行模式，将其稳定性问题分为并网微电网稳定问题和孤岛微电网稳定问题。微电网是相对传统大电网的一个概念，是指多个分布式电源及其相关负载按照一定的拓扑结构组成的网络，并通过静态开关关联至常规电网。开发和延伸微电网能够充分促进分布式电源与可再生能源的大规模接入，实现对多种能源形式的可靠供给，是实现主动式配电网的一种有效方式，因此将可再生能源的集成到智能微网中以及对可再生能源的管理对可持续发展都具有十分重要的意义。

3.1. 可再生能源

可再生能源是电力生产系统中很有前途的选择，特别是风能和光伏能源系统，它们均属于清洁能源并逐渐拥有成熟的技术。此外，风能被认为是世界上增长最快的能源之一，而光伏能源是最容易扩展的可再生能源类型。

近年来，对可再生能源系统的研究主要集中在建模、规模和性能等方面，而将其集成到智能微网中的研究比较有限，将可再生能源集成到智能微网对可持续发展具有十分重要的意义。在文献[27]提出在智能电网系统中集成可再生能源的研究，智能微网的使用能够适应更高的可变成本可再生能源系统的渗透率，提高系统的可靠性和能源效率，未来将可再生能源系统集成到智能微电网中的潜力，对可再生能源的开发人员、实践者和政策制定者有很大作用。文献[28]对智能微网在可再生能源发电中的应用进行了综

合描述和展望,文中提出的关键技术是电子设备之间的通信,使可再生能源适应未来电网的基础设施。文献[29]提出了适用于国内应用的小型光伏并网系统的实时能量模型,该模型已用于预测爱尔兰都柏林光伏系统的实时输出功率。文献[30]提出可再生电能输送和管理系统(FRADM),它是美国国家科学基金会提出的一种与住宅接口的配电系统,该系统运营基于这样的一种观念,即避免能源危机的关键不一定是可再生能源本身,而是提供和管理大规模分布式可再生能源和能源储存所需的基础设施。FRADM 的目标是建立一个高效的电网,将高度随机、分布式和可扩展的替代发电源和能量存储与现有电力系统集成在一起。文献[31]提出智能可再生能源发电的能源管理和控制系统,该系统的构建能源为光伏/风力/柴油,其系统本身可对未来的电源管理进行预测和决策。

3.2. 能源管理

能源管理主要从供需管理和能源的生产调度方面来体现,供需管理问题包含着供应和需求两个不同的部分。在电力供应侧,需要建立一个分层的需求控制方案,以实现经济消费调度,满足能源用户的需求;在电力需求侧,需要对可再生能源发电的随机性进行适当的模型化,这可能占据了微电网中大部分的电力供应,注意电力消耗和发电之间的连接是由负载平衡约束所充当。

需求控制技术可以分为基于价格的负载控制技术(称为需求响应方法)和直接负载控制(称为需求侧管理)。需求响应方法控制方案鼓励用户根据价格信息单独制定能源消耗决策。而需求侧管理策略通常由控制器直接应用,并且要求消费者订购经济激励计划。文献[32]开发了一种实时定价方案,旨在通过智能电网系统中的需求响应管理降低峰值平均负载比(PAR),提出并解决了两阶段优化问题。文献[33]以成本最小化和 PAR 最小化为目标,开发了一种用于局域网调度的随机模型。文献[34]提出了线性规划公式,通过直接控制负载来最小化能源成本。文献[35]使用鲁棒优化方法来调整给定用户每小时电价的负载水平。但这些研究没有考虑到可再生能源的不确定性,因此其控制方案可能不容易优化并适用于由再生能源所构成电力资源的重要组成部分这一微电网方案。

调度能源生产也存在一些考虑可再生能源不确定性的研究,可分为两类:基于随机的方法和基于鲁棒优化的方法。例如,文献[36]中定义的电源曲线用来捕捉电力系统中的波动,其中的每个电源产生的能量被建模为模型中的随机到达。文献[37]利用不确定变量的概率分布函数(PDF)提出随机操作管理方法来处理波动性需求和可再生能源。Hidden Markov 模型也用来描述可再生能源的特征[38],在实际过程中要想获得准确的分布函数计算成本过于高昂,可再生能源不遵循 Hidden Markov 过程或任何简单分布,因此不确定状况下的优化建模受到更多关注。鲁棒优化不采用明确的概率分布,将可再生能源发电限定在包含最坏情况的不确定性集合中,如文献[39]所考虑的可再生能源高渗透率微电网的分布式经济调度问题,可再生能源的固有随机特性由具有确定性下限和上限的不确定性集合来捕捉。类似的可再生能源建模方法也可以在其他几个研究中找到,有关微电网供需管理的主要内容如图 5 所示。

能源生产调度是指有效调度不同能源(本地发电机,中央电网,可再生能源发电等)的过程,以满足能源需求,并且能在电力系统受到各种物理限制的情况下以最低成本实现。作为电力系统中的典型问题,主要由机组组合(UC)和经济调度(ED) [40]两部分所构成。UC 问题涉及确定在未来很短时间内用于满足预测需求的发电机组的启动和停机计划。是一个复杂型优化问题,具有整数和连续变量,已被证明是 NP 完全型问题。文献所提到的基本 UC 方法包括优先级列表[41],动态规划[42],拉格朗日松弛[43],整数规划[44]。

传统能源生产调度通常是提前 24 小时(提前一天)进行的,并且基于系统负载可以提前一天以合理的高精度进行预测的事实,但在微电网中对小规模电力和热需求、可再生能源供应和电力市场价格的准确预测非常困难。以下文献对微电网的能源生产调度进行了调查研究:文献[45]使用演化计算方法研究微电

网经济负荷调度的多目标优化问题，旨在最大限度地减少热发电机的排放，并最大限度地降低总运营成本。文献[46]提出了一种用人工智能技术和基于线性规划的多目标优化的微电网智能能量管理的通用公式。类似地，文献[47]还提出了一种智能能源管理系统，用于在 24 小时的时间间隔内优化 CHP-微电网的运行。

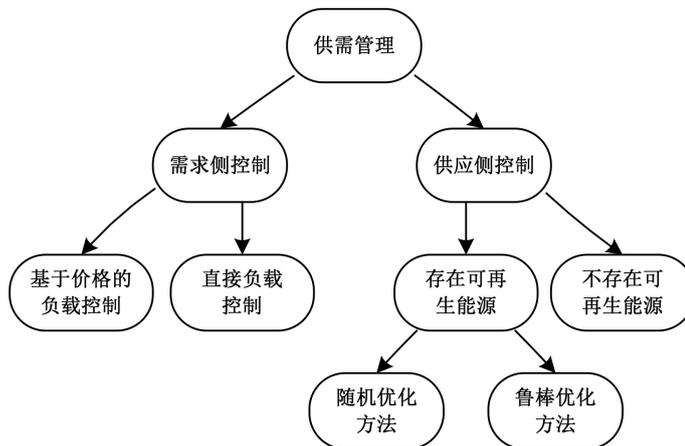


Figure 5. Microgrid supply and demand management
图 5. 微电网供需管理

在调度能源生产时，还存在着考虑供需不确定性的研究。这些研究可以分为两组：基于随机优化的方法和基于鲁棒优化的方法[48] [49]，通过考虑负载的随机性及其相关结构，提出一种发电机组调度方法。文献[50]提出长期解决安全约束机组组合的随机模型。文献[37]中还存在着更复杂的情况，开发了一种高效的随机框架来研究不确定性对微电网运行管理的影响，所提出的随机框架同时考虑负载预测误差，风力发电，光伏发电和市场价格的不确定性。论文[51]研究了风能的随机性对系统规划和调度的影响。同样地，文献[52]中对随机和存储方法进行了比较，有效管理不确定性的机组组合问题，并评估了组合方法的效益。文献[53]实现了以最小化预期运行成本为目标的两阶段随机目标函数，随机优化方法明确包含了不确定性的概率分布函数，并且它们通常依赖于不确定性实现的离散场景，这种方法主要有两个实际限制，首先，获得精确的不确定性概率分布可能是困难和昂贵的；其次，该解决方案仅为系统可靠性提供了概率保证，为获得足够高的保证需要大量样本，这将带来计算挑战。

最近的一些研究表明鲁棒优化作为不确定条件下的优化建模框架得到了广泛关注。文献[54]针对节点受限网络存在不确定性的安全约束机组组合问题，提出了两阶段自适应鲁棒机组组合模型。文献[55]又提出一种鲁棒优化方法来适应风力输出的不确定性，其目的是为市场中的热力发电机组提供可靠的机组组合计划。文献[39]基于鲁棒优化问题提出了一种功率调度方法来解决可再生能源的随机可行性问题。论文[48] [49]也提出了基于鲁棒优化的方法，用于考虑风电或能源消耗不确定性的最优微电网管理，而非假设明确的概率分布，鲁棒优化将随机变量限制在包含最坏情况的预定义不确定性集合中。例如，在实际情况中，将价格预测或可再生能源发电的不确定性作为具有确定的下界和上界的区间值来表示，并在文献[56]中开发的框架合并来解决该问题，不需要明确的概率分布便可更灵活地表征系统不确定性。此外，很容易控制该解决方案的保守性，且无论在理论上还是实际问题中，大规模问题是可计算的，有关电网中能源生产调度的内容如图 6 所示。

3.3. 智能微网的稳定性

传统电力系统稳定性问题主要分为三类：转子角稳定性，电压稳定性和频率稳定性。转子角度稳定

性是指发电机在受到扰动后保持同步的能力，是发电机转子的电磁转矩和机械转矩之间的平衡。频率稳定性指电力系统在各种条件下能够保持稳定频率的能力，是发电机和负载之间的平衡。电压稳定性是指电源系统受干扰后在所有总线上保持稳定电压的能力，是每条总线上负载需求和电源间的平衡。从三种传统电网稳定性的定义来看，同步发电机的动态特性在电力系统稳定性问题分析中起着主导作用。

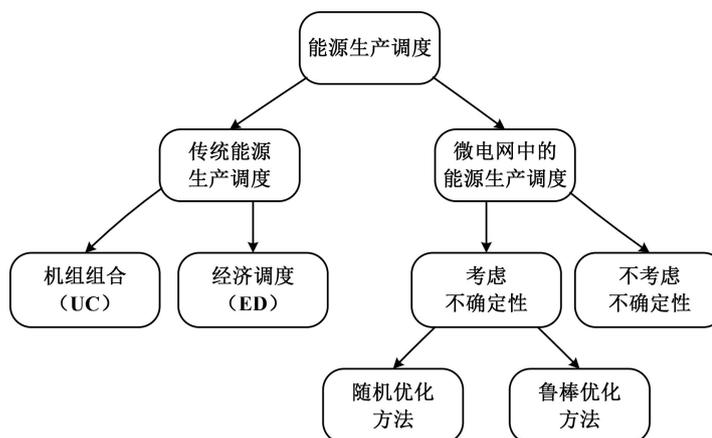


Figure 6. Microgrid energy production scheduling
图 6. 微电网能源生产调度

智能微网的分布式发电机(DG)是主要电源，分布式发电的动态特性决定微电网的动态行为特性，根据其接口模式，主要可分为两类[57]：1) 逆变器接口 DG；2) 分布式发电机直接连接到微网。如光伏发电，小型直驱风力涡轮机，微型燃气轮机，蓄电池，飞轮储能器和超级电容器等通过逆变器连接到微电网，而双馈感应发电机、柴油发电机都连接到无逆变器的微电网。微电网需尽可能应用可再生能源，因此逆变器接口在微电网中得到广泛应用，这一特点使得微电网的运行特性与传统电网完全不同，智能微电网的运行特点概括如下：

- 1) 智能微电网可在并网模式和孤岛模式下运行。并网模式下，微电网的功率流是双向的。孤岛模式下，微电网的供电必须满足负载的需求。
- 2) 智能微电网的结构多样化。由于分布式发电机(DG)的种类繁多，不同 DG 可以构成各种微电网结构，其运行模式多样化导致了微电网稳定问题多样化的特点。
- 3) DG 控制策略对微电网电压和频率的调节有显著影响，不同控制策略下的电压和频率调节特性差异很大。
- 4) 输出阻抗小，过流能力小。与同步发电机相比，逆变器接口的输出阻抗和过流能力非常小，因此这些 DG 的响应时间比同步发电机更快，导致微电网受到大扰动时的操作过程发生改变，是微电网的瞬态分析的重要特性之一。
- 5) 智能微电网的储能。直流电容器中存储的能量较小，当发生大的干扰时，DG 用来满足其不同的能量需求，使得储能系统保持稳定。

根据智能微电网运行模式，将其稳定性问题分为并网微电网稳定问题和孤岛微电网稳定问题进行描述，对智能微电网稳定性的分类如图 7 所示。

3.3.1. 并网微电网稳定性

当与公用电网并联时，电网的输出电压和频率由公用电网维持，通常不需要对具有小容量的分布式发电或微电网的稳定性进行深入研究。小扰动稳定性的研究主要集中在下垂增益和负载波动对微电网电压

稳定性的影响方面,通过对微电网的小信号稳定性分析,在维持微电网稳定的条件下选择最优下垂控制增益,当发生短路故障等大扰动时,通常针对不同类型分布式发电机的动态响应采取不同控制策略。与公用配电网相比,微网的容量非常小,微网中的扰动很少会影响电网的频率调节。因此,在并网微电网中不考虑频率和转子角度的稳定性。

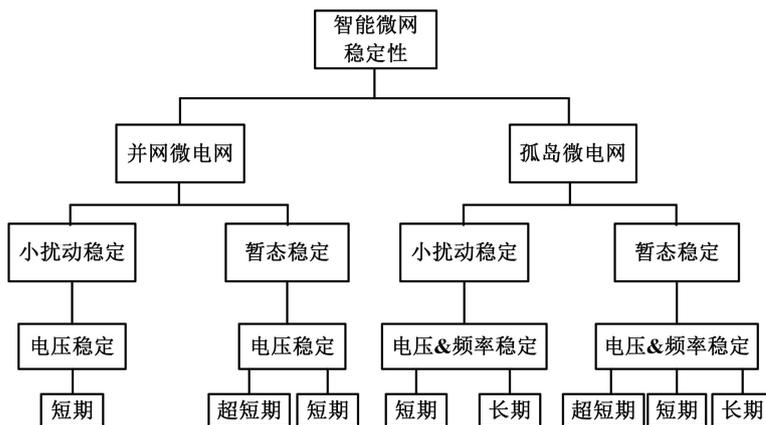


Figure 7. Microgrid stability classification

图 7. 微电网的稳定性分类

小信号稳定性通常不考虑逆变器接口的切换过程,因此被归为短期现象[58]。而当分布式发电机受到较大扰动(如短路故障)时,故障期间的涌入电流可能会在几毫秒内威胁逆变器的安全性,因此并网微电网的暂态稳定性分为超短期现象和短期现象。

3.3.2. 孤岛微电网稳定性

微电网在孤岛模式下运行时应保持电源和负载变化的平衡,不同类型的稳定性对于微电网的合理设计和运行至关重要。根据微电网运行特点,孤岛微电网的稳定性主要取决于微电网的结构,储能源的容量,分布式发电的控制策略等。光伏、风电、微型燃气轮机等能源的响应速度较慢,但输出功率通过逆变器接口进行调节,并且通常与储能源一起使用,当负载波动发生时,储能源对稳定性有重要影响。储能源的动态过程与涉及转子角问题的同步发电机的机械旋转过程并不相似,因此与传统电网不同,孤岛微电网的稳定性分为电压稳定性和频率稳定性。

与并网微电网稳定性分析类似,对孤岛微电网小信号稳定性的研究主要集中在控制增益、负载波动和线路阻抗变化对输出电压和频率的影响。孤岛微电网的暂态稳定性主要由微电网运行过程中的短路故障,开路故障,分布式电源和负载损耗等大扰动的影响所构成。在微电网中,逆变器接口的时间帧是几毫秒,而能源的响应时间可能是几秒钟,因此与并网微电网不同,孤岛微电网的信号稳定性分为短期现象和长期现象,暂态稳定性分为超短期现象,短期现象和长期现象。

4. 展望

4.1. 能源优化问题

微电网的研究过程考虑到系统中存在能量储存或将剩余能量出售给外部公用电网的情况。对于前一种情况,储能系统将自行承担成本,同时也可在一定程度上缓解可再生能源波动引起的不确定性问题,特别是存储容量足够大时的不确定性。至于储能系统的最佳容量,主要取决于能量需求的波动和微电网系统的规模。对于后一种情况,可能必须考虑一些其他条件,例如电价,不同微电网之间的竞争等,这

两种不同情况下的优化问题还值得进一步去研究。

可再生能源存在资源可变性,不可预测性和天气依赖性,都成为可再生能源发电与主电网集成的主要挑战,因此这些能源的功率输出可能发生突变,甚至频繁地发生变化,给维持微电网稳定性带来挑战。此外,增加的可再生能源份额或许会导致配电网网络拥塞问题,还会有可再生能源发电的间歇性,缺乏调度能力等问题发生。对于微电网中能源生产调度问题,可再生能源发电的统计特性需要更详细的研究,通过分析大量的历史数据验证可再生能源发电的单峰概率密度函数。此外还可以进一步考虑更实际的情况,即能量存储的有限性,这种有限性会导致能源生产的调度策略发生变化,以及如何确定能量存储装置的合适尺寸等其他问题。

传统的能源生产调度方案通常基于对未来需求的完美预测,但微电网的小规模需求难以预测且可再生能源高度波动,因此无法预测需求。此外,尽管热电联产发电机的整合可以通过同时生产有用的热能和电力输出为微电网带来巨大经济效益,从而提高整体效率并带来环境效益,但调度问题却带来新的不确定性:热需求呈现出新的随机模式,使预测整体能源需求变得更加困难。我们考虑用新的灵活的不确定性模型来捕捉净需求和热需求的波动性,主要就是提取参考分布作为有用参考,并允许净需求和热需求的实际分布围绕其参考变化。

4.2. 供需匹配问题

微电网比传统集中式电网方法更具有鲁棒性且成本效益高,但仍需适当关注电力供需负载的有效管理,这相当于匹配发电和消耗概况。具体而言,微电网中使用的发电机或微电源通常是可更新的或非传统的分布式能源,纳入这些可再生资源带来巨大的环境效益的同时也带来了新的挑战:与传统的具有可控发电机的电力系统不同,在具有波动且依赖气候的可再生能源微电网中的发电调度必须应对各种不确定性。微电网中考虑采用分层或分散的需求控制方案,分散控制方案有利于大型复杂系统的分布式控制和管理,这种控制在实施之前需要大量的实验,可能会引入新的安全挑战。分层控制由负责匹配生成和负载的主控制器执行,需求资源在干扰发生下受到控制时的策略通常称为直接负载控制,在直接控制程序中,根据中央控制器和客户之间的协议,控制器可以远程控制家中某些设备的操作。

4.3. 成本优化问题

设想利用控制器和能源消费者场所之间可以进行实时通信的情况来处理微电网系统中央控制器(MGCC)面临的基本问题,即实现电力需求与供应之间的良好匹配,从而优化微电网系统的能源成本。具体而言,发电方面,在每个时间段内,操作员控制器接收具有不同功率级要求,持续时间和时间弹性水平的消费者功率需求,MGCC需要通过按照用户设定的要求优化每个设备的运行时间来最大限度地降低发电成本。在供电方面,MGCC必须集中精力有效管理发电,以便与用户负荷相匹配并保持系统可靠性,考虑利用一种新的不确定性模型来捕捉可再生能源的波动性。具体而言,参考经验分布方法,允许可再生能源的实际分布围绕其变化,开发易于处理的鲁棒优化方法解决问题,从而来降低微电网系统的能源成本。

4.4. 保护问题

微电网的保护是重要的挑战之一,设计一个适合主电网和微电网故障的适当保护系统并不容易,主要原因是系统中的故障电流大小取决于微电网的运行模式,且在并网和孤岛运行模式之间可能会存在很大差异。传统的电力系统已经设计和构建了径向分配系统的单向故障电流,但将分布式电源与微电网并入主电网将会使得故障电流从单向流动到双向流动,微电网通过快速静态开关与主电网系统相连接,从

而保护微电网在两种运行模式下都能抵御不同类型的故障。

在低压配电网的保护方面,其馈线是径向的,沿着它们被抽出的负载通常由单向功率流所设计,并具有基于电流辨识能力的过流(OC)继电器。新的标准规定在PCC(公共耦合点)进行测量的强制性电压和频率跳闸设置,微电网控制系统由于电网中的故障而与常规电网分离时由PCC接收/发送的信息应该是快速且可靠的。此外,出现无法正确判别是否处于“非故障条件”情况,电压降容差将与电网分开,因此分析低压保护装置在连接到电网和孤岛模式过程需谨慎。

5. 结论

智能微网概念已经从愿景逐渐演变为正在慢慢实现的目标。随着技术的发展,设备和系统能够支持更加智能化的形成,具体的能源政策也促进了各国对智能微网的规划。智能微网的固有特性是在需要时提供从电网连接/断开的灵活性,微网的这一特点对提高可靠性、降低投资成本,减少排放,提高电能质量起着重大作用,并可降低配电网的电力损耗。

本文对现有智能微网的技术发展现状进行了描述,并对其结构体系及建模方法进行了介绍。对多种能源的管理调配方法进行了分析。在对智能微网的运行特性描述的基础上,进一步对并网和孤岛形式下的微网稳定性进行了研究。在智能微网中,对发电、预测技术、数据传输和监测技术的控制,被视为智能微网的功能。使用这些功能可以更好完善和提高智能微网技术,但这些功能仍然无法解决所有问题。最后,讨论了实现智能微网技术过程中的一些其它重要问题:能源优化问题,供需匹配问题,成本优化问题,保护问题,以及解决这些障碍的可能性。电力系统面临着向客户提供高效、可靠能源的挑战。主要挑战之一是增加能源需求,而主要能源供应受到限制,需要由分布式能源提供更多的发电。由此带来新问题,如发电不确定和间歇性,这个问题也要求存储单元提供更好的电能质量。解决能源需求问题,可再生能源不确定和不可持续发电问题的更好方法是采取小型子系统方法来满足需求和供应平衡,这是微电网发展和扩张的关键动力。

参考文献

- [1] Vasudevan, J., Sekkappan, K., Yashwant, K., Jay, D. and Swarup, K.S. (2012) Research Issues in Smart Grid-Application to Automation, Renewable Energy Sources and Demand Response. <https://doi.org/10.1109/INDCON.2012.6420787>
- [2] Mohamed, M. and Eltamaly, A. (2018) Modeling and Simulation of Smart Grid Integrated with Hybrid Renewable Energy Systems. Springer International Publishing, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64795-1>
- [3] Planas, E., Andreu, J., Gárate, J.I., Martínez de Alegría, I. and Ibarra, E. (2015) AC and DC Technology in Microgrids: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **43**, 726-749. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.067>
- [4] Ambia, M.N., Hasanien, H.M., Durra, A.A. and Muyeen, S.M. (2015) Harmony Search Algorithm-based Controller Parameters Optimization for a Distributed-Generation System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **30**, 246-255. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2358940>
- [5] Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R. and Marnay, C. (2007) MicroGrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, **5**. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>
- [6] Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A. and Bahrarad, S. (2015) State of the Art in Research on Microgrids—A Review. *IEEE Access*, **3**, 890-925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>
- [7] Boicea, V. (2014) Energy Storage Technologies—The Past and the Present. *Proceedings of the IEEE*, **102**, 1777-1794. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2359545>
- [8] Brando, G., Di Noia, L.P., Del Pizzo, A., Dannier, A. and Pisani, C. (2016) Grid Connection of Wave Energy Converter in Heaving Mode Operation by Supercapacitor Storage Technology. *IET Renewable Power Generation*, **10**, 88-97. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0093>
- [9] Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W.H.J., Guerrero, J.M. and Vasquez, J.C. (2014) Microgrids: Experiences, Barriers and Success Factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 659-672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>

- [10] Arulampalam, A., Barnes, M., Engler, A., Goodwin, A. and Jenkins, N. (2004) Control of Power Electronic Interfaces in Distributed Generation Microgrids. *International Journal of Electronics*, **91**, 503-523. <https://doi.org/10.1080/00207210412331289023>
- [11] Mehra, M., Poursmaeil, E., Mehrjerdi, H., Jørgensen, B.N. and Catalão, J.P.S. (2015) Control Technique for Enhancing the Stable Operation of Distributed Generation Units within a Microgrid. *Energy Conversion and Management*, **97**, 362-373. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.078>
- [12] Vandoorn, T.L., Van de Vyver, J., Meersman, B., Zwaenepoel, B. and Vandeveld, L. (2015) Phase Unbalance Mitigation by Three-Phase Damping Voltage-Based Droop Controllers in Microgrids. *Electric Power Systems Research*, **127**, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.013>
- [13] Linuer, A., Muti, A., Qin, C., Erxun Yi Bulayin, T.U. and Jianchun, L.U.O. (2013) Application of Fuzzy Control for the Energy Storage System in Improving Wind Power Prediction Accuracy. *American Journal of Energy Research*, **1**, 54-58. <https://doi.org/10.12691/ajer-1-3-3>
- [14] Tan, X., Li, Q. and Wang, H. (2013) Advances and Trends of Energy Storage Technology in Microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **44**, 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.015>
- [15] Ao, M. and F, M. (2016) Comparison of Different Control Strategies for Energy Storage Devices. *Power Systems Computation Conference*, 1-7.
- [16] Zeng, A., Xu, Q., Ding, M., Yukita, K. and Ichianagi, K. (2015) A Classification Control Strategy for Energy Storage System in Microgrid. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **10**, 396-403. <https://doi.org/10.1002/tee.22099>
- [17] Strogatz, S.H. (2001) Exploring Complex Networks. *Nature*, **410**, 268-276. <https://doi.org/10.1038/35065725>
- [18] Perez-Ibache, R., Silva, C. and Yazdani, A. (2018) Linear State-Feedback Primary Control for Enhanced Dynamic Response of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1**. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2818624>
- [19] Wang, Y.Y., Frank, P.M. and Clements, D.J. (1993) The Robustness Properties of the Linear Quadratic Regulators for Singular Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **38**, 96-100. <https://doi.org/10.1109/9.186315>
- [20] Srivastava, A.K., Zamora, R., Schulz, N.N., Ravikumar, K.G. and Mohan, V.M. (2012) Real Time Modeling and Control of SmartGrid Systems. *Green Energy & Technology*, **96**, 1-26.
- [21] Balog, R.S., Weaver, W.W. and Krein, P.T. (2012) The Load as an Energy Asset in a Distributed dc Smart Grid Architecture. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 253-260. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167722>
- [22] Nunes, M.V.A., Lopes, J.A.P., Zurn, H.H., Bezerra, U.H. and Almeida, R.G. (2004) Influence of the Variable-Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **19**, 692-701. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832078>
- [23] Hatziargyriou, N., Hatziargyriou, N., Dimeas, A. and Tsikalakis, A. (2005) Centralized and Decentralized Control of Microgrids. *Energy Resources*, 197-212.
- [24] Lopes, J.A.P., Moreira, C.L. and Madureira, A.G. (2005) Control Strategies for MicroGrids Emergency Operation. *International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, 18 November 2005, 6. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204226>
- [25] Piagi, P. and Lasseter, R.H. (2006) Autonomous Control of Microgrids. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 18-22 June 2006, 18-22. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1708993>
- [26] Morstyn, T., Hredzak, B. and Agelidis, V.G. (2016) Control Strategies for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems—An Overview. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **9**, 3652-3666. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2637958>
- [27] Phuangpornpitak, N. and Tia, S. (2013) Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System. *Energy Procedia*, **34**, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.756>
- [28] Gaviano, A., Weber, K. and Dirmeier, C. (2012) Challenges and Integration of PV and Wind Energy Facilities from a Smart Grid Point of View. *Energy Procedia*, **25**, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.016>
- [29] Ayompe, L.M., Duffy, A., McCormack, S.J. and Conlon, M. (2010) Validated Real-Time Energy Models for Small-Scale Grid-Connected PV-Systems. *Energy*, **35**, 4086-4091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.021>
- [30] Crow, M.L., McMillin, B., Wang, W. and Bhattacharyya, S. (2010) Intelligent Energy Management of the FREEDM System. *Power and Energy Society General Meeting*, Providence, 25-29 July 2010, 1-4. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589992>
- [31] Kohsri, S. and Planklang, B. (2011) Energy Management and Control System for Smart Renewable Energy Remote Power Generation. *Energy Procedia*, **9**, 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.021>
- [32] Qian, L.P., Zhang, Y.J.A., Huang, J. and Wu, Y. (2013) Demand Response Management via Real-Time Electricity Price Control in Smart Grids. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **31**, 1268-1280.

- <https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130710>
- [33] Fathi, M. and Bevrani, H. (2013) Adaptive Energy Consumption Scheduling for Connected Microgrids under Demand Uncertainty. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 1576-1583. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2257877>
- [34] Rad, A.H.M. and Garcia, A.L. (2010) Optimal Residential Load Control with Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1**, 120-133. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2055903>
- [35] Conejo, A.J., Morales, J.M. and Baringo, L. (2010) Real-Time Demand Response Model. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1**, 236-242. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2078843>
- [36] Wang, K., Ciucu, F., Lin, C. and Low, S.H. (2012) A Stochastic Power Network Calculus for Integrating Renewable Energy Sources into the Power Grid. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **30**, 1037-1048. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2012.120703>
- [37] Mohammadi, S., Soleymani, S. and Mozafari, B. (2014) Scenario-Based Stochastic Operation Management of Micro-Grid Including Wind, Photovoltaic, Micro-Turbine, Fuel Cell and Energy Storage Devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **54**, 525-535. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.004>
- [38] Bu, S., Yu, F.R. and Liu, P.X. (2011) Stochastic Unit Commitment in Smart Grid Communications. *Computer Communications Workshops*, Shanghai, 10-15 April 2011, 307-312.
- [39] Zhang, Y., Gatsis, N. and Giannakis, G.B. (2013) Robust Energy Management for Microgrids with Highpenetration Renewables. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4**, 944-953. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2013.2255135>
- [40] Chowdhury, B.H. and Rahman, S. (1990) A Review of Recent Advances in Economic Dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, **5**, 1248-1259. <https://doi.org/10.1109/59.99376>
- [41] Johnson, R.C., Happ, H.H. and Wright, W.J. (1971) Large Scale Hydro-Thermal Unit Commitment-Method and Results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **90**, 1373-1384. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1971.292941>
- [42] Pang, C.K., Sheble, G.B. and Albuyeh, F. (1981) Evaluation of Dynamic Programming Based Methods and Multiple Area Representation for Thermal Unit Commitments. *IEEE Power Engineering Review*, **1**, 32-32. <https://doi.org/10.1109/MPER.1981.5511316>
- [43] Zhuang, F. and Galiana, F.D. (1988) Towards a More Rigorous and Practical Unit Commitment by Lagrangian Relaxation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **3**, 763-773. <https://doi.org/10.1109/59.192933>
- [44] Carrion, M. and Arroyo, J.M. (2006) A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, 1371-1378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.876672>
- [45] Xu, J., Tan, S. and Panda, S.K. (2011) Optimization of Economic Load Dispatch for a Microgrid Using Evolutionary Computation. *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, 7-10 November 2011, 3192-3197. <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119821>
- [46] Chaouachi, A., Kamel, R.M., Andoulsi, R. and Nagasaka, K. (2013) Multiobjective Intelligent Energy Management for a Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60**, 1688-1699. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2188873>
- [47] Motevasel, M., Seifi, A.R. and Niknam, T. (2013) Multi-Objective Energy Management of CHP (Combined Heat and Power)-Based Micro-Grid. *Energy*, **51**, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.035>
- [48] Gupta, R.A. and Gupta, N.K. (2015) A Robust Optimization Based Approach for Microgrid Operation in Deregulated Environment. *Energy Conversion and Management*, **93**, 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.008>
- [49] Kuznetsova, E., Ruiz, C., Li, Y.F. and Zio, E. (2015) Analysis of Robust Optimization for Decentralized Microgrid Energy Management under Uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **64**, 815-832. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.064>
- [50] Wu, L., Shahidehpour, M. and Li, T. (2007) Stochastic Security-Constrained Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, 800-811. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.894843>
- [51] Tuohy, A., Meibom, P., Denny, E. and O'Malley, M. (2009) Unit Commitment for Systems with Significant Wind Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 592-601. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016470>
- [52] Ruiz, P.A., Philbrick, C.R., Zak, E., Cheung, K.W. and Sauer, P.W. (2009) Uncertainty Management in the Unit Commitment Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 642-651. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2012180>
- [53] Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S. and Siano, P. (2014) Integrated Scheduling of Renewable Generation and Demand Response Programs in a Microgrid. *Energy Conversion and Management*, **86**, 1118-1127. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.078>
- [54] Bertsimas, D., Litvinov, E., Sun, X.A., Zhao, J. and Zheng, T. (2013) Adaptive Robust Optimization for the Security

Constrained Unit Commitment Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 52-63.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2205021>

- [55] Jiang, R., Wang, J. and Guan, Y. (2012) Robust Unit Commitment with Wind Power and Pumped Storage Hydro. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 800-810. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2169817>
- [56] Bertsimas, D. and Sim, M. (2003) Robust Discrete Optimization and Network Flows. *Mathematical Programming*, **98**, 49-71. <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0396-4>
- [57] Majumder, R. (2013) Some Aspects of Stability in Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 3243-3252. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2234146>
- [58] Herrera, L., Inoa, E., Guo, F., Wang, J. and Tang, H. (2014) Small-Signal Modeling and Networked Control of a PHEV Charging Facility. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **50**, 1121-1130. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2272912>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org