

微电网系统建模的挑战

—“智能微电网与可再生能源系统的关键技术”专题(前言)

杨 苹^{1,2}, 陈敬峰¹, 彭嘉俊¹, 曾智基¹, 赵卓立¹, 梅生伟³

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458;

3. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

随着可再生和绿色分布式发电系统渗透率的不断提高, 含高渗透率分布式可再生能源的微电网成为智能电网发展的重要分支之一. 微电网系统是由负荷、分布式电源、电力电子变换器通过电气网络紧密集成的可控供电系统, 逐渐成为我国城镇化进程中重要的一种供电模式. 典型微电网系统通过电力电子变换器接入多种分布式电源, 其中风、光等分布式可再生能源接入比例较大, 这些发电单元大幅度随机变化、各单元动态特性各异、不同单元的变化呈现多个时间尺度, 使得微电网系统的整体建模与稳定特性分析面临巨大挑战. 目前在数学上无法精准建立随机大干扰环境下微电网系统的动态模型并求解其稳定控制域, 在实际微电网工程中, 一般会配置较大容量的储能以确保微电网系统在各种运行工况下的稳定性. 在此基础上, 针对每个具体的微电网工程建立仿真系统以确定其稳定控制策略, 导致微电网工程成为个性化和经验式的解决方案.

“智能微电网与可再生能源系统的关键技术”专题收录了从不同的角度研究含多种分布式能源的微电网关键技术的8篇论文, 集中展现微电网建模与分析、逆变器优化控制与设计、微电网运行控制与优化调度技术、分布式能源运营模式与规划的最新研究进展, 借此期待引起业内的专家、学者关注微电网系统的精准动态建模问题, 给出解决方案.

在微电网建模与分析方面, 针对包含LCL滤波电路整体的虚拟同步发电机逆变器完全等效为同步发电机建立的模型存在误差的问题, 合肥工业大学徐华电博士等学者提出一种虚拟同步发电机逆变器准确建模的等效方法; 华南理工大学赵卓立博士等学者针对可再生能源高渗透下多源多变换微电网系统典型运行特性和存在的稳定性问题, 给出了用于微电网动态稳定分析的特征值分析方法和基本步骤; 针对直流

微电网中大部分控制器在设计时未考虑通信延时对系统性能的影响, 中南大学杨建副教授等学者建立了直流微电网系统的时滞模型, 提出了一种针对时变时滞系统的全时滞稳定性判据. 在逆变器优化控制与设计方面, 针对虚拟同步发电机并联运行模式下通信复杂的问题, 青海大学陈来军副教授等学者提出了基于一致性的并联虚拟同步发电机分布式协同控制策略; 为进一步提高逆变器系统容量、效率和输出电能质量, 安徽大学胡存刚副教授等学者以三电平有源中点钳位型微网储能变流器为研究对象, 提出了一种有效控制中点电压平衡的优化控制策略. 在微电网运行控制与优化调度方面, 针对微电网可再生能源比重大以及其固有间歇性和随机性等问题, 华南理工大学陈皓勇教授等学者建立了基于极限场景法的微网日前鲁棒经济调度模型; 针对含单相混合相序的多微网新型拓扑, 许志荣博士等学者提出一种考虑三相不平衡度约束的多微电网黑启动策略. 在分布式能源运营模式与规划方面, 针对目前对分布式能源项目进行整体效益分析, 缺乏各类潜在价值的综合量化系统研究及市场竞争分析, 对电网企业参与的可行运营模式探索甚少等问题, 华南理工大学廖志伟副教授等学者提出分布式能源的能效分享及节能发展空间模型.

下面针对典型微电网系统架构描述其精准暂态建模面临的挑战, 对其中的典型发电单元进行独立的动态建模, 对微电网系统中多个发用电单元不同的时间响应特性进行描述, 给出微电网系统整体建模遇到的关键问题, 以及针对外界随机扰动、多时间尺度特性、稳定域求解等关键问题的思考.

1 微电网系统动态建模问题的提出

微电网系统是将负荷、分布式电源、储能单元、电力电子变换器通过电气网络紧密集成的可控的供电系统, 通过执行源-荷-储协调控制策略, 能实现自我

保护、自我控制和管理,既可以孤网自主运行,也可以通过单一接口与大电网并网运行^[1-3]。由于其投资建设的便捷性,在远离大电网的边远山庄、哨所、海岛,或者负荷密度不高、投资大电网建设不经济的地区,微电网成为一种重要的供电模式^[4]。即使在负荷密集的工商业园区,基于本地的风光资源进行就地供电、并能够保障重要负荷24小时不停电的微电网系统也逐渐有了良好的投资价值。因此,微电网系统逐渐成为分布式供电的一种重要模式。

典型微电网系统可通过电力电子变换器接口接入多种分布式电源,其中风力发电、光伏发电等分布式可再生能源接入比例较大,这些发电单元大幅度随机变化、各单元动态特性各异、不同单元的呈现多个时间常数的动态随机变化,使得微电网系统的稳定特性分析与传统电力系统有实质性区别。在传统的大型电力系统中,任何一个风电场、光伏电站的波动,或者一个负荷的变化,对于大型电力系统而言都是一个极小的扰动;而在微电网系统中,任何一台风机出力的变化、光伏阵列出力的变化,以及用电负荷的波动,都是微电网系统中的大扰动,需要足够容量的主电源(一般是储能单元)进行快速动态调整以达到发用电的瞬时平衡。在主电源的调节控制中,不但需要考虑源-荷的随机大干扰,还需要考虑这些随机大干扰的不同时间尺度的快动态与慢动态的更迭变化。为实现整个微电网系统的稳定控制与优化调度,必须建立精准的随机大干扰环境下的微电网系统动态模型。

目前,针对微电网系统建立的数学模型主要是约定条件下简化的小信号模型^[5]和大信号模型^[6],尚未有相关文献对考虑随机大扰动的微电网系统多时间尺度动态建模展开研究。其中,微电网系统小信号模型的研究较多,其核心思路是首先建立微电网系统的微分方程,然后在某一个平衡点线性化,得到微电网系统的小信号状态空间模型,在此基础上通过状态矩阵的特征根进行分析^[7]。小信号模型对微电网单元的响应特性进行静态处理,而这种处理是假定在慢变量变化期间快暂态不激励或已衰减。虽然目前已有学者提出应用小信号概率模型来表征风光随机特性并获得小信号稳定判据^[8-11],但依然无法描述微电网系统中不同发电单元的不同时间常数的大幅度随机变化过程。微电网系统大信号建模通常采用时域仿真法和李雅普诺夫直接法^[12]。其中,时域仿真法是通过逐步积分求得系统状态变量和代数变量随时间变化曲线,并根据发电机转子摇摆曲线和负荷端电压曲线来

判别系统在大扰动下能否保持同步和电压的稳定,这一方法虽能通过仿真方法描述系统暂态全过程,但只能针对每一个具体的工程案例进行仿真,并存在仿真耗时长、无法评估系统稳定裕度的缺点。李雅普诺夫直接法通过构造微电网系统的能量函数,计算其临界能量,从而快速地判断系统的暂态稳定性并得到系统的稳定裕度,然而针对微电网系统所构造的能量函数基于多种理想化假设,且没有考虑微电网系统各个单元的多时间常数的动态响应特性,其稳定控制域是不准确的。

以上针对微电网系统的建模,都无法在数学上精准建立随机多时间尺度大干扰环境下的微电网系统模型,也无法计算其稳定控制域。原因在于随机波动的光风资源既是微电网系统的主要能源来源,又是微电网系统的随机大扰动,这类大幅度随机扰动的多时间尺度特性使得微电网系统的动态建模与稳定域求解十分困难。在实际的微电网工程中,一般会配置较大容量的储能以确保微电网系统在各种运行工况下的稳定性。在此基础上,针对每个具体的微电网工程建立仿真系统以确定其稳定控制策略,导致微电网工程的实现成为个性化的经验式解决方案。因此,对随机大干扰环境下的微电网系统进行精准的动力建模已迫在眉睫。

2 微电网系统单元建模

为对微电网系统进行精准的动力建模,首先需要为对微电网系统的典型单元进行动力建模。不过,微电网系统的结构各异,其发电单元的组成及其容量,与负荷的组成及其特性有关系,也与本地的可再生能源资源有关系,还与建设地点的实施条件有关系。本前言针对最常见的典型微电网系统结构和典型的微电网单元进行建模探索。

典型微电网系统拓扑结构如图1所示。该微电网系统通过交流母线引出多条馈线用以连接风力发电单元、光伏发电单元、储能单元以及负荷,馈线一般配置有静态断路器,整个网架呈辐射状结构。根据并/离网控制开关的开合状态可切换微电网的并/离网运行状态。微电源单元并网方式主要包括同步发电机并网、异步发电机并网以及电力电子变换器并网方式,不同并网方式的微电源单元在微电网中呈现不同的动态特性。因此分布式发电系统是一个由发电单元、负荷单元、储能单元及电力电子变换器和控制系统等环节相互耦合的强非线性系统,其不同时间常数的动态输出特性是各单元在不同时间尺度上的叠加。下面针对各发电单元和负荷单元并网接入微电网系统的动态特性进行建模。

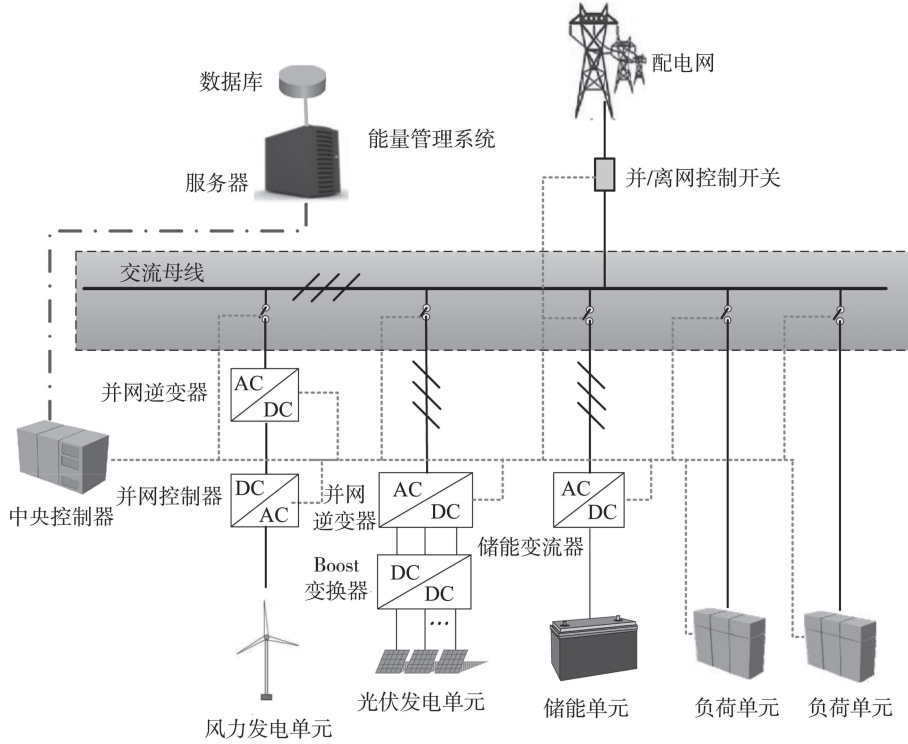


图1 典型微电网系统拓扑结构

2.1 光伏发电单元

光伏发电单元以分布式方式分组灵活接入微电网系统中,是微电网系统中最常见的可再生能源发电单元.针对光伏发电单元建模,需要重点考虑其影响系统稳定的两个因素:1)光照强度至少存在两个时间尺度的大幅度变化过程,一个是一天从早到晚的光照强度缓慢变化规律,另一个是云彩遮挡造成的瞬间光照强度变化.云彩遮挡造成的光照强度大幅度随机性变化对整个微电网系统造成巨大冲击,此时光伏发电单元输出功率快速下降,要求微电网系统的主电源在这一工况下具备快速功率爬升和下调的空间与能力.2)系统主电源的响应速度,一定要比从光伏发电单元的输出功率变化速度更快.

一般地,微电网系统中光伏发电单元采用PQ恒功率策略,接受微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC)的实时调度与控制.考虑光伏发电系统模型的输入变量为MGCC有功功率指令 $P_{\text{ref}}^{\text{pv}}$,MGCC无功功率指令 $Q_{\text{ref}}^{\text{pv}}$;其干扰变量为光伏阵列吸收的光照强度 G^{pv} ;输出变量为光伏有功功率测量值 P^{pv} 和无功功率测量值 Q^{pv} .假定光照强度 G^{pv} 可分解为 n^{pv} 种不同时间尺度的叠加,即 $G^{\text{pv}} = [G_1^{\text{pv}}, G_2^{\text{pv}}, \dots, G_i^{\text{pv}}, \dots, G_{n^{\text{pv}}}^{\text{pv}}]$,描述光照强度多时间尺度的状态方程如下所示:

$$\epsilon^{\text{pv}} \dot{G}^{\text{pv}} = f^G(G^{\text{pv}}; X^G; t), \quad (1)$$

式中: X^G 为影响光照强度 G^{pv} 的随机因素变量组,包括云团特征、太阳入射角度、灰尘等因素变量; ϵ^{pv} 为描述光照强度时间尺度的参量向量组, $\epsilon^{\text{pv}} = [\epsilon_1^{\text{pv}}, \epsilon_2^{\text{pv}}, \dots, \epsilon_i^{\text{pv}}, \dots, \epsilon_{n^{\text{pv}}}^{\text{pv}}]$, ϵ_i^{pv} 为某时间尺度参量, ϵ_i^{pv} 越小,则表示对应的 G_i^{pv} 时间尺度越小.

以双级式光伏发电系统为例,考虑光照强度的多时间尺度的光伏发电单元状态方程组和输出方程组如下所示^[13]:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^{\text{pv}} \\ \epsilon^{\text{pv}} \dot{G}^{\text{pv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^{\text{pv}}(X^{\text{pv}}; P_{\text{ref}}^{\text{pv}}, Q_{\text{ref}}^{\text{pv}}; G^{\text{pv}}; t) \\ f^G(G^{\text{pv}}; X^G; t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} P^{\text{pv}} \\ Q^{\text{pv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{\text{pv}}(X^{\text{pv}}; P_{\text{ref}}^{\text{pv}}, Q_{\text{ref}}^{\text{pv}}; G^{\text{pv}}; t) \\ f_2^{\text{pv}}(X^{\text{pv}}; P_{\text{ref}}^{\text{pv}}, Q_{\text{ref}}^{\text{pv}}; G^{\text{pv}}; t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: X^{pv} 为光伏发电单元的状态变量向量组, $X^{\text{pv}} = [i^{\text{pv}}, u_{\text{dc}}^{\text{pv}}, i_{\text{ld}}^{\text{pv}}, i_{\text{lq}}^{\text{pv}}, u_{\text{d}}^{\text{pv}}, u_{\text{q}}^{\text{pv}}, x_{\text{id}}^{\text{pv}}, x_{\text{iq}}^{\text{pv}}, x_{\text{ud}}^{\text{pv}}, x_{\text{uq}}^{\text{pv}}]$. 其中: i^{pv} 表示Boost电路的输入电流, $u_{\text{dc}}^{\text{pv}}$ 表示Boost电路的输出电压, $i_{\text{ld}}^{\text{pv}}, i_{\text{lq}}^{\text{pv}}$ 分别表示逆变器出口处的电流 dq 轴分量, $u_{\text{d}}^{\text{pv}}, u_{\text{q}}^{\text{pv}}$ 分别表示逆变器滤波后的电压 dq 轴分量, $x_{\text{id}}^{\text{pv}}, x_{\text{iq}}^{\text{pv}}$ 分别表示逆变器功率控制外环的状态变量, $x_{\text{ud}}^{\text{pv}}, x_{\text{uq}}^{\text{pv}}$ 分别表示逆变器电流控制内环的状态变量.

2.2 风力发电单元

在风资源较好的地区,风力发电单元也是常见的微电网系统发电单元.针对风力发电单元建模,也

需要重点考虑两个影响因素: 1) 风向风速存在多个时间尺度的大幅度变化过程, 既有较为平稳的变化过程, 也有阵风的快变化过程. 风向风速的大幅度随机变化对微电网系统的冲击, 要求系统主电源具备快速功率爬升和下调的能力. 2) 系统主电源的响应速度, 一定要比从风向风速的变化经过叶片主轴等机械部分平滑传递到风力发电单元的输出功率变化的响应速度更快.

假定风速 v^{wt} 可分解为 n^{wt} 种不同时间尺度的叠加, 即: $v^{\text{wt}} = [v_1^{\text{wt}}, v_2^{\text{wt}}, \dots, v_i^{\text{wt}}, \dots, v_{n^{\text{wt}}}^{\text{wt}}]$, 描述风速多时间尺度的状态方程如下所示:

$$\epsilon^{\text{wt}} \dot{v}^{\text{wt}} = f^v(v^{\text{wt}}; X^v; t), \quad (4)$$

式中: X^v 为影响风速 v^{wt} 的随机因素变量组, 包括温度、湿度、气压、位势高度等因素变量; ϵ^{wt} 为描述风速时间尺度的参量向量组, $\epsilon^{\text{wt}} = [\epsilon_1^{\text{wt}}, \epsilon_2^{\text{wt}}, \dots, \epsilon_i^{\text{wt}}, \dots, \epsilon_{n^{\text{wt}}}^{\text{wt}}]$, ϵ_i^{wt} 为某时间尺度参量, ϵ_i^{wt} 越小, 则表示对应的 v_i^{wt} 时间尺度越小.

对于微电网中风力发电单元, 其模型对应的输入变量为MGCC有功功率指令 $P_{\text{ref}}^{\text{wt}}$, MGCC无功功率指令 $Q_{\text{ref}}^{\text{wt}}$; 其干扰变量为风速 v^{wt} ; 输出变量为风电机组有功功率测量值 P^{wt} 和无功功率测量值 Q^{wt} . 以永磁直驱风力并网发电系统为例, 描述风力发电单元的方程组如下所示^[14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^{\text{wt}} \\ \epsilon^{\text{wt}} \dot{v}^{\text{wt}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^{\text{wt}}(X^{\text{wt}}; P_{\text{ref}}^{\text{wt}}, Q_{\text{ref}}^{\text{wt}}; v^{\text{wt}}; t) \\ f^v(v^{\text{wt}}; X^v; t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} P^{\text{wt}} \\ Q^{\text{wt}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{\text{wt}}(X^{\text{wt}}; P_{\text{ref}}^{\text{wt}}, Q_{\text{ref}}^{\text{wt}}; v^{\text{wt}}) \\ f_2^{\text{wt}}(X^{\text{wt}}; P_{\text{ref}}^{\text{wt}}, Q_{\text{ref}}^{\text{wt}}; v^{\text{wt}}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: X^{wt} 为储能单元的状态变量向量组,

$$X^{\text{wt}} = [\omega_{\text{M}}^{\text{wt}}, x_{\text{Mud}}^{\text{wt}}, x_{\text{Muq}}^{\text{wt}}, x_{\text{Miq}}^{\text{wt}}, x_{\text{NIud}}^{\text{wt}}, x_{\text{NIuq}}^{\text{wt}}, x_{\text{NIld}}^{\text{wt}}, i_{\text{NIuq}}^{\text{wt}}, i_{\text{NIq}}^{\text{wt}}, u_{\text{Nd}}^{\text{wt}}, u_{\text{Nq}}^{\text{wt}}].$$

其中: $\omega_{\text{M}}^{\text{wt}}$ 表示永磁同步发电机的电角频率, $x_{\text{Mud}}^{\text{wt}}$, $x_{\text{Muq}}^{\text{wt}}$ 分别表示机侧变流器电流内环 dq 轴状态变量, $x_{\text{Miq}}^{\text{wt}}$ 表示机侧转速控制环的状态变量, $x_{\text{NIud}}^{\text{wt}}$, $x_{\text{NIuq}}^{\text{wt}}$ 分别表示网侧变流器电流内环 dq 轴状态变量, $x_{\text{NIld}}^{\text{wt}}$ 表示网侧变流器直流电压的电压环状态变量, $i_{\text{NIuq}}^{\text{wt}}$, $i_{\text{NIq}}^{\text{wt}}$ 分别表示网侧变流器的输出电流 dq 轴分量, $u_{\text{Nd}}^{\text{wt}}$, $u_{\text{Nq}}^{\text{wt}}$ 分别表示并网侧变流器滤波后的并网电压 dq 轴分量. 风电机组的动态特性受其风轮和发电机转子机械响应速度以及风速变化的综合影响. 风电机组的功率升降特性将显著影响微电网系统的稳定控制策略的设计和参数整定.

2.3 储能单元

储能单元常常作为主电源来调节微电网系统的

功率平衡, 一般采用 v/f 恒频恒压控制策略维持系统电压和频率稳定. 储能单元的输入变量(控制变量)为 $u_{\text{ref}}^{\text{ess}}$, $f_{\text{ref}}^{\text{ess}}$, 输出变量为 u^{ess} , f^{ess} , 系统可用两输入两输出状态表示^[15]:

$$\dot{X}^{\text{ess}} = f^{\text{ess}}(X^{\text{ess}}; u_{\text{ref}}^{\text{pv}}, f_{\text{ref}}^{\text{pv}}; t), \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} u^{\text{ess}} \\ f^{\text{ess}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{\text{ess}}(X^{\text{ess}}; u_{\text{ref}}^{\text{pv}}, f_{\text{ref}}^{\text{pv}}; t) \\ f_2^{\text{ess}}(X^{\text{ess}}; u_{\text{ref}}^{\text{pv}}, f_{\text{ref}}^{\text{pv}}; t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $X_{\text{Id}}^{\text{ess}}$ 为储能单元的状态变量向量组,

$$X_{\text{Id}}^{\text{ess}} = [i_{\text{Id}}^{\text{ess}}, i_{\text{Iq}}^{\text{ess}}, u_{\text{d}}^{\text{ess}}, u_{\text{q}}^{\text{ess}}, \theta_{\text{ref}}^{\text{ess}}, x_{\text{id}}^{\text{ess}}, x_{\text{iq}}^{\text{ess}}, x_{\text{iq}}^{\text{ess}}, x_{\text{uq}}^{\text{ess}}].$$

其中: $i_{\text{Id}}^{\text{ess}}$, $i_{\text{Iq}}^{\text{ess}}$ 分别表示逆变器出口处的电流 dq 轴分量, $u_{\text{d}}^{\text{ess}}$, $u_{\text{q}}^{\text{ess}}$ 分别表示逆变器滤波后的电压 dq 轴分量, $\theta_{\text{ref}}^{\text{ess}}$ 表示电压参考相位, $x_{\text{id}}^{\text{ess}}$, $x_{\text{iq}}^{\text{ess}}$ 分别表示逆变器功率控制外环的状态变量; $x_{\text{iq}}^{\text{ess}}$, $x_{\text{uq}}^{\text{ess}}$ 分别表示逆变器电流控制内环的状态变量.

容量足够的储能单元以毫秒级的响应速度确保能够快速应对微电网系统中发/用电单元的随机波动, 使微电网系统稳定.

2.4 负荷单元

微电网系统中负荷组成多样, 呈现出时变性、随机性、分布性、不连续性、多时间尺度等复杂的动态特性, 不恰当的负荷单元建模会使得微电网系统稳定性分析结果与实际情况不相一致, 因此负荷单元同样是影响微电网动态过程的关键环节.

假定负荷功率随机影响因素 l^{load} 可分解为 n^{load} 种不同时间尺度的叠加, 即 $l^{\text{load}} = [l_1^{\text{load}}, l_2^{\text{load}}, \dots, l_i^{\text{load}}, \dots, l_{n^{\text{load}}}^{\text{load}}]$, 描述负荷功率影响因素多时间尺度的状态方程如下所示:

$$\epsilon^{\text{load}} \dot{l}^{\text{load}} = f^l(l^{\text{load}}; t), \quad (9)$$

式中: ϵ^{load} 为描述负荷功率多时间尺度的参量向量组, $\epsilon^{\text{load}} = [\epsilon_1^{\text{load}}, \epsilon_2^{\text{load}}, \dots, \epsilon_i^{\text{load}}, \dots, \epsilon_{n^{\text{load}}}^{\text{load}}]$, ϵ^{load} 为某时间尺度参量, ϵ^{load} 越小, 则表示对应的 l^{load} 时间尺度越小.

考虑负荷功率多时间尺度的负荷状态方程与输出方程如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^{\text{load}} \\ \epsilon^{\text{load}} \dot{l}^{\text{load}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^{\text{load}}(X^{\text{load}}, P^{\text{load}}, Q^{\text{load}}, l^{\text{load}}; t) \\ f^l(l^{\text{load}}; X^l; t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} P^{\text{load}} \\ Q^{\text{load}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{\text{load}}(X^{\text{load}}, P^{\text{load}}, Q^{\text{load}}, l^{\text{load}}) \\ f_2^{\text{load}}(X^{\text{load}}, P^{\text{load}}, Q^{\text{load}}, l^{\text{load}}) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

3 微电网系统建模亟待解决的关键问题

在大电网中,波动性可再生能源占比不大,单个负荷的随机变化组合成为省级负荷的用电曲线后符合一定的统计规律,省级调度根据省级负荷的变化曲线对统调发电厂进行统一调度,从而实现大电网的发用电功率平衡和稳定控制.然而,在微电网系统中,其发电侧与用电侧同时存在不同时间常数的随机性大幅度扰动,如何在微电网系统建模中加以表达,形成一个完整的微电网系统的动态模型,用于求解其稳定控制域,是微电网领域的工程人员面临的最大挑战.

3.1 多时间尺度随机大扰动下微电网系统的动态建模

建立能准确反映多时间尺度随机大扰动下微电网系统的大信号模型,是求解其稳定控制域的基础.传统大型电力系统的多时间尺度特性被归结为系统内部动态元件的不同动态响应速度,多类型多时间尺度的相对小幅度扰动被忽略,这种简化对大型电力系统是可行的.但是,微电网系统总规模较小,每一个发电单元和用电单元的随机性变化对于微电网系统而言都是大幅度冲击,必须在建模时充分考虑风光等各种随机大扰动对微电网系统的影响.其中,风速的随机性变化表现为风力发电单元输出功率的随机性变化,而风速的变化存在多个时间尺度,包括日周期、小时周期、分钟周期以及秒周期变化,于是,风电功率的变化也包括日周期、小时周期、分钟周期以及秒周期的变化;光照强度的随机性变化对于光伏发电单元输出功率的影响也类似.这些多时间尺度的变化往往表征为各种不同时间常数的扰动迭代而成,为平衡微电网系统的发用电功率,维系微电网系统的电压、频率、功角稳定,需要配置合适的调节主电源来实时响应各种时间尺度的扰动,否则系统电压频率将偏离正常范围,甚至导致系统不稳定.

针对图1所示的典型风光储微电网系统,考虑风速、光照强度的多时间尺度变化,微电网系统的联立方程应该有如下的形式:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X; y; t) \\ \epsilon \dot{y} = g(y; X^y; t) \end{cases}, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} X &= [X^{\text{pv}}, X^{\text{wt}}, X^{\text{ess}}, X^{\text{load}}], \\ y &= [G^{\text{pv}}, v^{\text{wt}}, l^{\text{load}}], \\ \epsilon &= [\epsilon^{\text{pv}}, \epsilon^{\text{wt}}, \epsilon^{\text{load}}], \\ X^y &= [X^{\text{G}}, X^{\text{v}}]. \end{aligned}$$

微电网系统包含了特性各异、控制模式不同的风力发电单元、光伏发电单元、储能单元和负荷单元.从控制的角度看,风和光属于自然能源,既是微电网系统中不断反复变化的大幅度随机干扰,却又是风力发电单元和光伏发电单元的能源来源.在风和光都存在多个时间尺度的随机变化的情况下,风力发电单元和光伏发电单元的功率输出将呈现为多个时间尺度的快中慢动态的叠加,在负荷用电也在不断变化的情况下,如何调节主电源(储能或者柴油发电机等)以应对风、光、负荷的不同时间尺度的大幅度随机变化,使得微电网系统达到功率平衡,实现微电网系统的稳定控制?要完成这个任务,需要建立考虑风/光/负荷多个时间尺度的大幅度随机干扰的微电网系统动态模型,并在模型中解决以下几个方面的问题:

1) 风、光、负荷的大幅度变化,其多个时间尺度的干扰,以及对应的微电网系统的多个时间常数的响应,如何在微电网系统的联立方程中统一表征?是通过实验测算不同单元的快慢动态变化速度,获取其干扰的时间尺度与对应响应的时间常数,然后以其中的一个单元为基准做整体描述,还是通过理论推导,将每一种干扰的时间尺度及其响应的时间常数与其他干扰的时间尺度及其响应的时间常数做对比后,放在统一的时间尺度下做描述?

2) 如何验证微电网系统的风、光、负荷等各个单元的干扰的时间尺度及其对应响应的时间常数描述的正确性?通过仿真系统搭建的模型,风光干扰的时间尺度及其响应的的时间尺度与真实的风光干扰的对标如何完成?

3) 在考虑了风、光、负荷各个单元干扰的时间尺度及其对应响应的的时间常数不一样的微电网系统联立方程中,应该配置多少个时间尺度的主电源?响应速度越快的主电源价格越贵,这将影响主电源的选型及其成本.

当风、光、负荷各个单元干扰的时间尺度及其对应响应的的时间常数得到精准描述,就可以建立涵盖输入、输出、随机大扰动的微电网多时间尺度动态模型,并探索模型降阶的条件,为微电网系统稳定控制域的精准求解打下基础.

3.2 微电网系统的稳定控制域求解

多时间尺度随机大扰动下微电网系统的动态建模,一个十分复杂的多时间尺度、非线性、大干扰的联立方程,采用什么方法对其进行求解,获得微电网系统的稳定控制边界,给出主电源的控制律及其多个时间常数的设计,是微电网工程领域十分重要

的关键问题。

目前, 求解这一类复杂系统稳定域的主流方法为李雅普诺夫稳定性分析方法, 该方法在传统大型电力系统中得到广泛应用, 取得了一定成果^[16-18]。也有学者将李雅普诺夫稳定性分析方法应用于求解微电网系统大信号干扰模型的稳定控制域, 其关键在于求解储能逆变器的能量函数, 已有一些成果: 文献[19]借助静电发电机理论, 寻找逆变器直流侧电容与静电机转子之间的联系, 建立起逆变器的运动方程, 并利用Popov理论得到逆变器单机并入无穷大母线模型的李雅普诺夫能量函数方程。文献[20]同样提出了逆变器单机接入无穷大母线模型的能量函数方程, 该模型的精准性基于以下假定: 1) 无穷大母线的电压、频率均不变化; 2) 逆变器输出的有功功率与无功功率解耦; 3) 电网络呈现电抗性质; 4) 有功功率调度在暂态过程中不产生变化。文献[6]指出仅关注微电网在小信号稳定性难以全面理解和分析微电网的稳定性, 应在大信号稳定性上加大研究力度, 并总结了上述两种求解微电网稳定控制域方法的优劣。文献[21]将微电网鲁棒下垂控制逆变器频率调节方程转化为转子运动方程, 形成等效惯性系统状态方程模型, 得到微电网能量函数并求解其稳定域。

但是, 应用李雅普诺夫方法进行多时间尺度随机大扰动下微电网系统动态模型的稳定控制域求解遇到如下困难:

1) 面对多时间尺度随机大扰动下微电网系统动态模型, 难以构建合适的李雅普诺夫能量函数: 李雅普诺夫能量函数没有固定统一的构建方法, 目前应用于大型电力系统的主流方法包括: 首次积分法、变量梯度法、绝对稳定Popov法、解微分方程的Zubov法等, 以上方法可以针对微电网系统的经典大信号干扰模型而构建满足工程应用需要的能量函数, 但这些方法无法直接移植到包含大量电力电子变换器接口、扰动幅度大且频繁、时间尺度特性复杂的多时间尺度随机大扰动下微电网系统动态模型中。此外, 为求解李雅普诺夫能量函数而限定了很多理想化假设, 对随机大扰动下微电网系统的实际多时间尺度动态特性过分的忽略, 导致稳定控制域的求解过程过于保守、亦或激进, 甚至错误。

2) 面对多时间尺度随机大扰动下微电网系统动态模型, 难以求解李雅普诺夫暂态能量函数临界值: 求解微电网系统的李雅普诺夫暂态能量函数临界值即计算稳定域边界上的主导不稳定平衡点处的暂态能量。主流方法包括: 基于稳定边界理论的主导不

稳定平衡方法 (boundary stability region based controlling unstable equilibrium point method, BUC)、势能界面法 (potential energy boundary surface, PEBS)、扩展等面积法 (extended equal area criteria, EEAC)。这些方法对于单机系统而言是有效的, 而微电网系统作为多机系统, 其不稳定平衡点众多, 且不平衡点与微电网系统的运行方式、扰动类型和扰动位置、发电单元的不同时间尺度的动态特性等因素均有关, 因此搜索系统的不稳定平衡点将非常困难。

如何利用或者借鉴李雅普诺夫稳定性分析方法, 以求解多时间尺度随机大扰动下微电网系统动态模型的稳定域? 如何准确表征多时间尺度随机大扰动下微电网系统的稳定控制边界? 这是微电网实际工程领域亟待解决的关键问题。

4 下一步期待

本文针对典型微电网系统架构进行精准暂态建模的思考, 对其中的典型发电单元及其大幅度随机性干扰的多时间尺度特性进行了描述, 对考虑了风、光、负荷各个单元不同时间尺度的干扰及其对应的不同时间常数响应的微电网系统, 其建模及其稳定控制域求解的困难进行了描述, 指出微电网系统整体建模与求解面临的挑战。针对这一挑战, 本文从实际应用的领域给出思考, 期待业内的专家学者为微电网工程应用中的精准动态建模与求解问题给出建议和解决方案。

最后, 对《控制理论与应用》编委们和编辑部提供的这次组织“智能微电网与可再生能源系统的关键技术”专刊的宝贵机会和辛苦工作表示由衷感谢, 对广大投稿作者的大力支持表示衷心感谢, 也非常感谢投身或关注于我国新能源与微电网领域研究的广大读者们!

参考文献:

- [1] LASSETER R H. Microgrids [C] // *Power Engineering Society Winter Meeting*. New York: IEEE, 2002, 1: 305 – 308.
- [2] LASSETER R H. Smart distribution. Coupled microgrids [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(6): 1074 – 1082.
- [3] YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57 – 70. (杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57 – 70.)
- [4] MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 168 – 175. (马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168 – 175.)
- [5] WANG Shuya, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. A review on the small signal stability of microgrid [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2016, 11(7): 39 – 45.

- (王舒娅, 苏建徽, 杨向真, 等. 微电网小扰动稳定性研究综述 [J]. 电气工程学报, 2016, 11(07): 39 – 45.)
- [6] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 5(8): 2287 – 2295.
- [7] ZHAO Zhuoli, YANG Ping, ZHENG Chengli, et al. Review on dynamic stability research of microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(10): 111 – 122.
(赵卓立, 杨苹, 郑成立, 等. 微电网动态稳定性研究述评 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 111 – 122.)
- [8] LIU S, LIU P X, WANG X. Stochastic small-signal stability analysis of grid-connected photovoltaic systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1027 – 1038.
- [9] ZHOU Ming, YUAN Bo, ZHANG Xiaoping, et al. Stochastic small signal stability analysis of wind power integrated power systems based on stochastic differential equations [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1575 – 1582.
(周明, 元博, 张小平, 等. 基于SDE的含风电电力系统随机小干扰稳定分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1575 – 1582.)
- [10] XU Xialing, ZHA Xiaoming, LIN Tao. Probabilistic analysis of microgrid small signal stability [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(12): 3117 – 3122.
(徐遐龄, 查晓明, 林涛. 微电网小干扰稳定概率分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3117 – 3122.)
- [11] SU Zhan, XU Qian, SUN Liying, et al. Stochastic modeling and small signal stability analysis of power systems including DFIG [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(09): 2404 – 2410.
(苏展, 徐谦, 孙黎滢, 等. 含DFIG的电力系统随机建模及小干扰随机稳定分析 [J]. 电网技术, 2015, 39(09): 2404 – 2410.)
- [12] ZHAO Zhuoli, YANG Ping, XU Zhirong, et al. Review on large-disturbance transient stability research of microgrid with multiple energy resources and multiple conversions [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(07): 2200 – 2209.
(赵卓立, 杨苹, 许志荣, 等. 多源多变换微电网大扰动暂态稳定性研究综述 [J]. 电网技术, 2017, 41(07): 2200 – 2209.)
- [13] WANG Chengshan. *Analysis and Simulation Theory of Microgrids* [M]. Beijing: Science Press, 2013.
(王成山. 微电网理论与仿真分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.)
- [14] 芦思晨. 基于永磁直驱风力发电系统的微电网下垂控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [15] ZHENG Jinghong, WANG Yanting, LI Xingwang, et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switch [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(18): 17 – 24.
(郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17 – 24.)
- [16] LIU Sheng. Transient energy function analysis for power system stability [J]. *Power System Technology*, 1995, 19(2): 11 – 17.
(刘笙. 电力系统暂态稳定分析的能量函数方法 [J]. 电网技术, 1995, 19(2): 11 – 17.)
- [17] WAN Qiulan, SHAN Yuanda. Evaluation of the transient energy function methods for power system transient stability analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(6): 57 – 59.
(万秋兰, 单渊达. 对应用暂态能量函数法分析电力系统暂态稳定性的评价 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 57 – 59.)
- [18] WANG Xiaoming, LIU Dichen, WU Jun, et al. Energy function-based power system transient stability analysis [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8): 114 – 118.
(汪小明, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于能量函数法的电网暂态稳定性分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(8): 114 – 118.)
- [19] ANDRADE F, KAMPOUROPOULOS K, ROMERAL L, et al. Study of large-signal stability of an inverter-based generator using a Lyapunov function [C] // *Industrial Electronics Society*. Dallas, TX, USA: IEEE, 2015: 1840 – 1846.
- [20] HART P, LESIEUTRE B. Energy function for a grid-tied, droop-controlled inverter [C] // *North American Power Symposium*. Pullman, WA, USA: IEEE, 2014: 1 – 6.
- [21] 莫尚林. 微网鲁棒下垂控制及其稳定问题研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.