

基于物理背景的微网总体模型

鞠 平¹, 蔡昌春^{1,2}, 曹相芹¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 计算机与信息学院(常州), 江苏 常州 213022)

摘要: 微网是集分布式电源、负荷和储能设备的小型电网, 通过公共耦合点与大电网相连, 与大电网之间的功率可双向流动, 需对微网进行建模以研究微网接入。从微网基本元件出发, 分析了微网负荷、电源元件模型与传统电力系统元件模型之间的联系, 借鉴负荷建模理论, 提出了微网整体建模的思路, 将微网中静态负荷与外部表现为静态特性的电源等效为等效静态模型, 推荐采用幂函数模型; 将风力发电机、电动机等动态元件等效为等效电机模型, 并从理论上推导了等效电机的通用模型。

关键词: 电力系统; 微网; 总体模型; 电机模型; 静态模型; 元件模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0007-08

0 引言

分布式发电系统以其环保、节能等特点备受关注, 特别是光伏、风电等可再生能源的利用, 有效地缓解了能源压力, 提高了供电可靠性, 已成为电力系统的有力补充。随机性强的风能、太阳能等分布式电源的大量接入, 给电网的安全稳定运行带来了很多问题。对此, 研究人员提出了一种新的分布式系统组织形式——微网, 微网的本质是小型电力系统, 为分布式电源的接入提供了新的方式^[1-4]。

作为独立的电力系统, 微网能够独立稳定运行; 作为电力大系统的一部分, 微网和大电网相连运行。从电力系统的角度而言, 微网可以看成为一个节点。微网与大电网之间的功率流动是双向的, 即功率可以从大电网流向微网也可以从微网流向大电网, 功率流动受到各种因素的影响, 如微电源容量、负荷容量、运行经济性等。联网运行时, 微网表现为特殊的负荷或者电源, 当微网接入的数量较多时, 对配网潮流及稳定性势必带来影响。要分析微网接入电网之后的动态过程, 需要建立其模型。

本文从微网内部元件模型结构出发, 分析了元件模型之间的相似性和共同点, 提出了微网接入的整体建模思路, 并就具体模型结构从理论上进行了分析和讨论, 对于微网接入的模型研究有重要意义。

1 微网概述

1.1 微网概念

随着分布式电源的大量接入, 传统由发电-输电-配电一体式电力供应模式发生了变化, 配电网由单纯的受端系统演变为具有一定电源出力能力的现代配电系统。分布式电源以其分散、灵活的特点满

足了分散电力需求和资源分布的需求, 但是大量分布式电源的接入, 对于配电网乃至输电网的影响是不可忽视的问题^[5]。传统大电网已具备完善运行控制能力, 当大量分布式电源接入, 由于其分散、灵活等特性, 对于大电网而言是一个不可控源, 会给大电网的安全稳定运行带来不可控因素, 使得分布式电源的接入受到一定的限制和约束^[6]。

为了充分利用分布式电源, 发挥其效益, 微网的概念随即被提出。微网本身是一个小型的电力系统, 由分布式电源、负荷、储能系统等设备组成, 其容量较小(一般在数兆瓦以下), 同时通过公共耦合点 PCC(Point of Common Coupling)接入大电网, 微网具备独立运行和联网运行的能力。大多数情况下, 微网联网运行, 相对于大电网, 是一个集成的负荷或者电源。因此, PCC 的潮流是双向的, 微网可以向大电网输送电能, 也可以从大电网吸收电能。故障时, 微网将和大电网自动分离, 微网通过内部电源控制, 独立运行。微网的发展备受 IEEE 和 CIGRE 等组织的关注, 其相关标准也在制定和完善中, 为微网规划、运行和控制提供技术依据。

1.2 微网控制

微网控制是决定微网能否安全稳定运行的关键技术。目前微网的控制模式主要有分散控制和集中控制 2 种^[7-8], 其中分散控制由于其电力电子设备控制的灵活性越来越受到关注, 其发展符合微电源即插即用的功能要求。分散控制指分布式电源通过电力电子设备检测网络和自身运行状况对微网运行模式的变化作出相应的调整, 以满足微网内部安全稳定运行以及联网运行的要求, 包括电压稳定、频率稳定、功率平衡等。分散控制方法有基于功率的下垂控制、有功无功控制(PQ 控制)、电压频率控制(U/f 控制)等^[9-10]。分散控制大大增强了微网控制的灵活性和控制性能。集中控制主要是通过控制中心对微网

的运行状态进行监视,根据网络运行情况,控制中心对所有电源进行统一调度,对负荷进行统一控制。

2 微网的元件模型

微网内部主要由大量分布式电源和负荷元件组成,由于分布式电源类型和负荷类型不同,其接入方式也不尽相同。如光伏电池、燃料电池等分布式电源,储能设备都是通过电力电子设备接入,风力发电、小型燃气轮机等一般直接接入微网^[11]。电源特性、网络特性、负荷特性对于微网的安全稳定运行至关重要,因此研究微网独立运行和并网运行需要了解微网内部元件的模型。

2.1 负荷元件模型

传统电力系统负荷建模研究主要将负荷归并为动态负荷和静态负荷 2 部分,在微网负荷模型研究中采用类似的研究方法。

a. 静态负荷元件。静态负荷元件可以采用经典 ZIP 模型或者幂指数模型。ZIP 模型中负荷由恒阻抗、恒电流和恒功率 3 部分组成,各部分比例参数需要通过统计或者辨识的方法得到^[12]。幂指数模型中负荷有功、无功功率表现为系统电压和频率的指数关系。2 种模型本质上是一致的。在传统大电网中系统频率基本保持不变,因此往往可以忽略频率特性。但由于微网内部电源惯性小,微网在运行过渡过程中,由于频率得不到足够的支撑会发生较大的变化。因此,在微网负荷模型中频率是必须考虑的因素。

b. 动态负荷元件。动态负荷元件主要有异步电动机,异步电动机模型主要有考虑电磁暂态的五阶模型、考虑机电暂态的三阶模型和只考虑机械暂态的一阶模型,详见文献^[12]。还有少量同步电动机,可以采用同步电机模型。

2.2 电源元件模型

微网中的分布式电源,一部分通过电力电子设备接入,如光伏、燃料电池;另一部直接接入,其输出功率和输出电压由其自身的励磁系统控制,如风力发电机、燃气轮机。

a. 光伏、燃料电池元件。光伏和燃料电池是通过电力电子设备控制接入,控制方式主要有 PQ 控制和 U/f 控制。 PQ 控制目标是使电源输出功率保持恒定,一般情况下分布式电源输出功率为其最大输出功率,以发挥分布式电源的效益。 U/f 控制的控制目标是维持系统电压和系统频率稳定,通过改变电源的输出有功和无功功率调整系统电压和频率。微电源接入的控制方式和微网的运行模式有关,微网独立运行时系统电压和频率主要通过内部电源功率调整来维持,因此独立运行时微网电源主要以 U/f 控制为主^[13-14]。联网运行时,由于和大电网相连,微网的频率和电压主要由大电网维持,此时,分布式电源的接入以 PQ 控制为主。这类电源的特性可以采用代数方程加以描述。

b. 风力发电元件。微网中运行的风力发电机主要有双馈风力发电机和直驱式风力发电机,其模型结构包括风力机、异步发电机和传动 3 部分,在进行微网控制研究时风力机和传动部分可以忽略,异步发电机模型在文献^[15-17]中已有详细叙述,在此不再赘述。

c. 燃气轮机元件。微网中运行的燃气轮机,实际上就是一种微型同步发电机,可以采用同步发电机模型描述。

3 微网的总体模型

3.1 总体模型结构

微网中元件成千上万,如果要详细分析微网内部的特性,需要对每个元件都加以描述。但是,如果要分析微网接入电力系统之后的特性,要对每个元件都加以描述既不可能、也无必要。所需要的只是从电力系统侧向微网侧看进去的总体特性,并不关注微网内部元件个体的特性。所以,可以借鉴电力负荷总体建模的思路。但微网建模与电力负荷建模所不同的是,电力负荷只吸收功率,而微网则比电力负荷多了大量的电源元件,总体上既可能吸收功率,也可能输出功率。

根据第 2 节分析,微网中的元件可以分为 2 大类。一类是静态元件,既包括静态负荷元件,也包括燃料电池、太阳能光伏电池、储能设备等分布式电源。这些电源在微网并网运行时主要通过 PQ 控制接入微网,与静态负荷模型中的恒功率部分具有相似性。因此将这些分布式电源连同静态负荷等效为静态部分,其模型为静态的代数方程,描述有功功率、无功功率与电压、频率的关系。

微网中的动态元件主要包括异步发电机(如风力发电机)、同步发电机(如微型燃气轮机)和异步电动机、同步电动机。需要特别指出的是,无论是发电机还是电动机,同步电机和异步电机只是在稳态时的概念。而在动态过程中,同步电机并不是真正同步的,其转子和定子之间也有一定的转速差,体现出异步特性。为此,本文提出采用通用电机模型来描述微网中所有电机,后面将进一步推导具体模型。

微网的总体模型结构如图 1 所示,等效静态部分与等效电机部分并联在所接入的母线上,总功率为两者之和,然后通过 PCC 接入大电网。

下面分别研究等效静态部分和等效电机部分的通用模型。

3.2 等效静态模型

对于微网中的静态负荷,可以采用 ZIP 模型或者幂函数模型描述。但对于微网中的静态电源,有时难以采用 ZIP 描述。所以,本文推荐

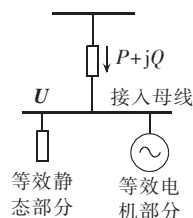


图 1 微网等效模型

Fig.1 Equivalent microgrid model

采用幂函数模型:

$$\begin{cases} P_s = P_{s0}(U/U_0)^{p_u}(f/f_0)^{p_f} \\ Q_s = Q_{s0}(U/U_0)^{q_u}(f/f_0)^{q_f} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 、 Q 、 U 分别为有功功率、无功功率、电压,下标 s 代表静态部分,下标 0 代表初始运行点, p_u 为有功电压特征系数, p_f 为有功频率特征系数, q_u 为无功电压特征系数, q_f 为无功频率特征系数。

3.3 等效电机模型

下面从异步电机模型出发,建立系统坐标下通用的等效电机模型。各种坐标之间的关系如图 2 所示,其中 abc 为电机定子坐标, ABC 为电机转子坐标, $d-q$ 为转速为同步速 ω_s 的旋转坐标, $x-y$ 为转速为同步速 ω_s 的系统公共坐标。定子磁链旋转速度为 ω_s , 转子旋转速度为 ω_r 。假定在 0 时刻,定子 a 轴和 d 轴重合,则 t 时刻 d 轴领先于 a 轴角度为 $\theta_s = \omega_s t$, 转子绕组领先于定子绕组的角度为 $\theta = \omega_r t$, d 轴领先 A 轴 $\theta_r = (\omega_s - \omega_r)t$ 。

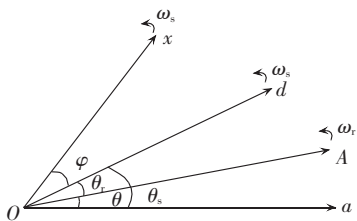


图 2 坐标空间向量图

Fig.2 Space vector diagram

定义滑差 $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$, 故

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = s\omega_s$$

利用 Park 变换,将定子 abc 轴上变量转换到 $d-q$ 坐标中,变换方程为

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{A} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 120^\circ) & \cos(\theta_s + 120^\circ) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 120^\circ) & -\sin(\theta_s + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

将转子 ABC 各量转换到 $d-q$ 坐标中的变换方程为

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{B} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - 120^\circ) & -\sin(\theta_r + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

经过 Park 变换得到在 $d-q$ 坐标中的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = p\psi_{ds} - \omega_s \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = p\psi_{qs} + \omega_s \psi_{ds} - R_s i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{dr} = p\psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} - R_r i_{dr} \\ u_{qr} = p\psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} - R_r i_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

由此可见,电压由 3 部分组成,第 1 部分为电磁感应引起的绕组电压,第 2 部分为速度电动势,第 3 部分为欧姆电压项。其中,转子电压中比同步电机多出了速度电动势,此速度电动势是由于转子速度与同步速的相对运动引起的。如果转子转速也为同步速时,此项即消失。在传统电机模型中,同步发电机的转子电压为零,异步发电机的转子电压不为零。

由于电机定子时间常数一般很小,所以在电力系统暂态分析计算中通常忽略电机的定子暂态,即令:

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \frac{d\psi_{qs}}{dt} = 0$$

定义:

$$\begin{cases} E'_d = -\frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{qr}, E'_q = \frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{dr} \\ L = L_{ss}, L' = L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}}, T'_0 = \frac{L_{rr}}{R_r} \\ u'_{dr} = \frac{L_m}{L_{rr}} u_{dr}, u'_{qr} = \frac{L_m}{L_{rr}} u_{qr} \end{cases} \quad (6)$$

经过推导(此处略),可得出等效电机的通用实用模型方程。

a. 暂态电动势方程:

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = (\omega_s - \omega_r) E'_q - u'_{qr} - \frac{1}{T'_0} [E'_d - (L - L') i_{qs}] \\ \frac{dE'_q}{dt} = -(\omega_s - \omega_r) E'_d + u'_{dr} - \frac{1}{T'_0} [E'_q + (L - L') i_{ds}] \end{cases} \quad (7)$$

b. 定子电压方程:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_s L' i_{qs} + \omega_s E'_d \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_s L' i_{ds} + \omega_s E'_q \end{cases} \quad (8)$$

c. 转矩方程:

$$\begin{aligned} T_e &= -(E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs}) \\ T_m &= T_{m0} \omega_r^m \end{aligned} \quad (9)$$

需要特别指出的是,在实用变量的定义中,以往的文献^[15-18]将频率计入其中,据此获得的模型方程中实际上忽略了频率的变化。而本文定义实用变量时则没有计及频率,而是在模型方程中计及频率,这是为了计及频率的变化和影响。由于微网内部分布式电源惯性小,扰动时频率的波动有可能较大。所以,从物理特性和物理现象出发,考虑频率对电机动态性能的影响是必要的。采用标么值时, $\omega_s = f$ 。

3.4 系统坐标下模型

微网接入系统示意图如图 3 所示。

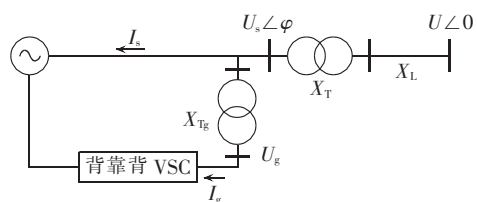


图 3 单机无穷大系统

Fig.3 A single-machine infinite-bus system

为了使微网等效模型与系统模型能够进行联立求解,需要将 $d-q$ 坐标下的模型转换到统一坐标 $x-y$ 下。由图2可见, $x-y$ 坐标和 $d-q$ 坐标之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, φ 为微网接口电压与系统参考电压($x-y$ 坐标)之间的夹角, $d-q$ 坐标采用同步转速坐标时,该角度恒定不变;但采用转子转速坐标时,该角度变化,需要做相应的处理。本文 $d-q$ 坐标采用同步速,因此, φ 为恒定值。

经过推导(此处略),得到系统公共坐标系下的通用实用模型方程。

a. 暂态电动势方程:

$$\begin{cases} \frac{dE'_x}{dt} = s\omega_s E'_y - u'_{yr} - \frac{1}{T'_0} [E'_x - (L-L')i_{ys}] \\ \frac{dE'_y}{dt} = -s\omega_s E'_x + u'_{xr} - \frac{1}{T'_0} [E'_y + (L-L')i_{xs}] \end{cases} \quad (11)$$

b. 电压方程:

$$\begin{cases} u_{xs} = -R_s i_{xs} + \omega_s L' i_{ys} + \omega_s E'_x \\ u_{ys} = -R_s i_{ys} - \omega_s L' i_{xs} + \omega_s E'_y \end{cases} \quad (12)$$

c. 转矩方程:

$$\begin{aligned} T_e &= -(E'_x i_{ys} + E'_y i_{xs}) \\ T_m &= T_{m0} \omega_r^m \end{aligned} \quad (13)$$

d. 转子运动方程:

$$T_j \frac{ds}{dt} = \text{sgn}(s_0) (T_m - T_e) \quad (14)$$

其中, s_0 表示初始滑差,对于电动机为正、发电机为负。 $\text{sgn}(s_0)$ 表示符号函数,如果初始滑差为正则 $\text{sgn}(s_0)$ 为1;如果初始滑差为负,则 $\text{sgn}(s_0)$ 取为-1。这样,可以自动区分等效电机是处于发电机还是电动机状态。

e. 励磁调节方程:

$$\begin{cases} \Delta u'_{xr} = G_{dp}(s) \Delta P + G_{du}(s) \Delta U \\ \Delta u'_{yr} = G_{qp}(s) \Delta P + G_{qu}(s) \Delta U \end{cases} \quad (15)$$

同步发电机和异步发电机在正常运行情况下,其励磁电压可以通过励磁调节器得到,电动机在正常运行情况下没有励磁。因此,为了提高模型的适应性,模型中考虑励磁电压的作用。

对于异步发电机, d,q 轴均有励磁:

$$u'_{dr} \neq 0, u'_{qr} \neq 0, u'_{xr} \neq 0, u'_{yr} \neq 0$$

对于同步发电机, d 轴有励磁, q 轴无励磁:

$$u'_{dr} \neq 0, u'_{qr} = 0, u'_{xr} \neq 0, u'_{yr} \neq 0$$

对于电动机,励磁电压为0:

$$u'_{xr} = 0, u'_{yr} = 0$$

在模型计算过程中,各量都取非零。而调节器传递函数 $G_{dp}(s)$ 、 $G_{du}(s)$ 、 $G_{qp}(s)$ 、 $G_{qu}(s)$ 分别为一阶或者线性关系,视模型的要求而定。

4 结论

微网的大量接入对配电网乃至大电网会产生一

定的影响,因此必须建立微网模型。本文从微网的元件建模出发,分析元件模型的共性,从电力系统的角度提出一种等效模型结构,推导了统一的等效电机模型,该模型具有广泛的适应性。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):100-107.
- [2] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009,33(11):6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009,33(11):6-11.
- [3] 黄伟,孙超群,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18,34.
HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system [J]. Power System Technology, 2009,33(9):14-18,34.
- [4] 张佳佳,陈金富,范荣奇. 微网高渗透对电网稳定性的影响分析[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(1):25-29.
ZHANG Jiajia, CHEN Jinfu, FAN Rongqi. Investigation of the influence of microgrids high large penetration rations on power network stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009,24(1):25-29.
- [5] IEEE. IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distribution resources with electric power systems[S]. New York, USA:IEEE,2003.
- [6] 肖朝霞,王成山,王守相. 含多微型电源的微网小信号稳定分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):81-85.
XIAO Zhaoxia, WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(6):81-85.
- [7] 姚玮,陈敏,牟善科,等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):77-80,94.
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(6):77-80,94.
- [8] LASSETER R H, PIAGI P. Microgrid: a conceptual solution[C] //Proceeding of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: [s.n.], 2004:4285-4290.
- [9] NIKDS L S, STAVROS A P, NIKOS D H. A stability algorithm for the dynamic analysis of inverter dominated unbalanced LV microgrids[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 294-304.
- [10] NAGARAJU P, MILAN P, TIMOTHY C G. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [11] CHARLES K S, PETER W L. Control and power management of converter fed microgrids[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3):1088-1098.
- [12] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2008:39-46.
- [13] CONTI D, GRECO A M, MESSINA N, et al. Generators control systems in intentionally islanded MV microgrids[C] //Proceeding of SPEEDAM Symposium 2008. Ischia, Italy: [s.n.], 2008: 399-405.
- [14] SHAHABI M, HAGHIFAM M R, MOHAMADIAN M, et al. Micro-grid dynamic performance improvement using a doubly fed in-

duction wind generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009,24(1):137-145.

- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京:中国电力出版社,2001:298-305.
- [16] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:286-290.
- [17] WU F,ZHANG X P,GODFREY K,et al. Small signal stability and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IET Gener Transm Distrib,2007,1(5):751-760.
- [18] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:83-89.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

鞠平(1962-),男,江苏靖江人,副校长,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail:pju@hhu.edu.cn);

蔡昌春(1981-),男,浙江乐清人,讲师,博士研究生,主要研究方向为电力系统建模(E-mail:flood_cai@163.com);

曹相芹(1985-),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统建模(E-mail:cxqwagd@126.com)。

General microgrid model based on physical background

JU Ping¹,CAI Changchun^{1,2},CAO Xiangqin¹

(1. College of Energy and Electric,Hohai University,Nanjing 210098,China;

2. College of Computer and Information(CZ),Hohai University,Changzhou 213022,China)

Abstract: Microgrid is a small power system,composed of loads,DG(Distributed Generators) and storage devices, and connected to the power network via common coupling point. Power flows bidirectionally between microgrid and power system. It is necessary to build the microgrid model for studying its connection to power network. The relation between the load and DG models of microgrid and the element models of traditional power system is analyzed and the general microgrid model is developed based on the load modeling theory. The static elements of load and DG with static exterior characteristic are represented as the equivalent static model,for which the exponential function model is recommended,and the dynamic elements of synchronous generator,wind generator and motor load as the equivalent machine model,for which the universal equivalent machine model is theoretically derived.

This work is supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars(50725723).

Key words: power system; microgrid; general model; motor model; static model; element model

附: 访电力系统建模研究专家鞠平教授

电力系统仿真计算不但是电力系统动态分析与安全控制的基本工具,也是电力生产部门用于指导电网运行的基本依据。不恰当的电力系统模型会使得仿真计算结果不能“仿真”,或偏“乐观”,或偏“保守”,从而构成系统的潜在危险或造成不必要的浪费。我国电力生产部门采用传统的电力系统仿真模型指导电力生产时,已经发现互联电网的稳定水平达不到预期目标,造成电能传输的瓶颈,通过修改电力系统模型和参数有时能够提高传输功率极限达25%左右。所以,建立合适的电力系统模型,能够提高传输能力,或者消除安全隐患,具有显著的经济和社会效益。为此,我们与电力系统建模专家鞠平教授进行了访谈。

鞠平,男,德国洪堡学者、中国国家杰出青年科学基金获得者。1988年6月在浙江大学获得博士学位,其后一直在河海大学任教。1994年1月至1995年10月在德国Dortmund大学从事研究工作。现任河海大学教授、博士研究生导师、副校长,兼任中国电机工程学会电力系统专业委员会副主任委员、江苏省电工技术学会副理事长等。出版专著4部、教材1部,发表论文160余篇,获得国家级教学成果二等奖1项、省部级科技进步一、二等奖8项。获得“做出突出贡献的中国博士学位获得者”、“全国留学回国人员成就奖”等荣誉。



◎记者:我们知道,您主要从事电力系统建模与控制方向的研究,您能否先为我们介绍一下电力系统建模包括哪些方面的内容?

鞠教授:传统上,人们经常谈到电力系统建模的

“四大参数”,即:励磁系统及其调节器参数、原动机及其调节器参数、同步发电机参数、电力负荷参数。对于前面两者,国内外已经有比较成熟的方法,并且已经颁布有关的建模导则。而对于后面两者,尤其是电力负荷建模,还需要深入研究,在此基础上制定有关建

模导则。

除此之外,电力系统建模还包括输电线路建模、动态等值建模、动力系统建模等。随着可再生能源发电的发展,风电发电系统建模等方兴未艾。随着分布式发电和微网的研究,微网建模也被提上议事日程。

◎记者:同步发电机是电力系统中最重要元件之一,它的建模研究进展如何?

鞠教授:同步发电机的运行行为对电力系统的各个方面都产生或大或小的影响。但是由于同步发电机是一种集旋转与静止、电磁变换与机械运动于一体,实现电能与机械能变换的元件,其结构及动态性能十分复杂。因此,同步发电机的模型及参数一直是电力系统建模研究中的重要内容。由于缺少实际参数,目前电力系统分析计算仿真所用的同步发电机参数多采用厂家提供的数据或典型值,或不得已采用简化模型,造成计算仿真所得结果与实际动态过程有较大出入,严重影响了计算的准确度和可信度,这些情况已为国外的一些文献所证实。

人们针对同步发电机提出了不同详细程度的模型,不同的模型对应着不同的参数,模型和参数是否唯一对应,各参数是否独立,涉及到同步发电机参数可辨识性问题,是同步发电机参数辨识的理论基础。以前,一般认为在研究分析中使用更加复杂详细的模型会得到更加好的结果。然而,NPCC (Northeast Power Coordinating Council)指出,在稳定分析中使用精确的电机参数一般来说比使用详细的模型更加重要。有些研究表明在同样使用不够精确参数的情况下,用详细的同步发电机模型不一定比用稍微简单的发电机模型结果要好。

确定发电机参数主要有下列 4 种方法。

(1)数值计算法。在电机设计阶段,通过对电机电磁性能分析可以较为精确地得到所需的发电机参数,分析发电机在不同出力、励磁等条件下的特性即可得到参数变化情况。常用的方法有有限元方法和磁路磁导法。

(2)实验测试方法。有一整套的试验规程,常规的电机实验有:三相稳态短路试验、低转差法、电压恢复法等,这些试验的特点是从参数的物理意义出发去做测量,方法成熟,有一定的适应性,这些测试不是实际的工作状态,而是物理上相似的模拟状态,试验的条件与实际工况仍有较大差异,所得参数还是不能真实地反映电机在实际运行过程中所受到的饱和、电机老化、电磁力等因素的影响。早在 20 世纪 70 年代,美国电力科学研究院 (EPRI)就强调“电机参数与运行方式密切相关”,并提出“要用新型的在线测试技术进行参数测量”。利用在线测试和系统辨识相结合的方法成为获取同步电机参数的另一有效途径,其显著特点是:直接计及了电机在运行中所受到的各种因素的影响,一旦辨识成功,即包含了各种因素的效应,计算简单,不用附加过多的假设条件,不影响电机的正常运行,所得参数能很好地反映电

机动态行为。

(3)频域响应法。频域响应法测量同步电机参数在 20 世纪 50 年代就已应用,并在 70~80 年代形成高潮,其测试原理是首先在待测系统上施加一定频带的扰动信号,并录取其频率响应,然后在计算机上利用动态拟合程序求取传递函数,并进一步得到电机参数。频域响应法可细分为 3 种,即直流衰减法、静态频域法 (SSFR)和在线频域法 (OLFR)。OLFR 方法更加能够反映实际运行工况,更适用于动态稳定的研究。频域响应法在计算方法上比较成熟,算法稳定性好,且具有一定的滤波能力,但存在几个缺陷:一是以线性系统为基础的,用它来测算同步发电机非线性参数仍感困难,同时需要严格的试验条件;二是由于需要进行频响分析,对输入扰动信号的波形、幅值大小及其相关性要求严格,难以利用电机动态过程本身的扰动作为输入信号;三是频响分析建立在线性系统的基础上,不能反映动态过程中参数非线性变化的特点。频域法用于在线辨识时,不易产生不同频率、不同幅值的信号来进行动态测试,导致参数适应范围有限。

(4)时域响应法。一是抛载试验法 (Load Rejection),传统方法需要分别进行 d 、 q 2 次特殊状态下的试验,最近我们课题组提出了一次任意抛载试验法;二是励磁电压扰动试验法,该试验易于激发发电机的动态过程,对于联网运行的发电机影响不大,且发电机的励磁电压调节方便,因而励磁电压扰动试验成为同步发电机参数在线辨识的首选试验方法。

◎记者:同步发电机建模今后的发展趋势如何?

鞠教授:综观近年来同步发电机建模领域的研究,可以看出几点发展趋势。

(1)对于同步发电机参数随工况变化的研究渐成热点。在同步发电机的模拟中,存在 2 类非线性问题,一类称之为结构性的非线性,这类非线性由同步发电机本身几何结构决定,在我们熟知的非线性模型 (基于 Park 变换的同步发电机模型)中,结构非线性得到了较好的处理,如采用功角的正弦、余弦函数将定子变量归算到转子侧;另一类称之为非结构性的非线性,这类非线性在通常的同步发电机模型中没有考虑,比如,转子、定子铁心部分的磁饱和问题,虽然有文献针对磁饱和问题试图定义一些新的模型结构,但由于饱和曲线与发电机运行状态有关,新模型结构仍难以反映所有实际情况,事实上没有一种唯一的非线性模型可以描述实际发电机在运行条件剧烈变化时整个系统的动态行为。为了达到在一定程度上考虑非结构非线性的目的,大体有 2 类方法,一类方法不需要知道模型结构,也不估计物理参数,只是将输入数据集和输出数据集对应起来;另一类方法假设模型结构已知,利用在线测量对物理参数进行估计,通过对参数变化的研究达到研究非结构非线性的目的。后一类方法由于可以获得有明确物理意义的参数深受广大电力工程师欢迎。随着对同步发电机参数问题研究

的深入,人们还发现除正常工况范围内,同步发电机参数会随运行工况变化而变化外,对于异常运行状态 and 极限运行状态,同步发电机参数会发生较大变化。

(2)对同步发电机阻尼问题的研究成为难点。系统阻尼不足容易引发系统振荡,严重危及系统稳定,而同步发电机阻尼正是系统阻尼的一个重要组成部分,电力系统的许多低频振荡事故就是由于发电机出现了弱阻尼甚至负阻尼而引起的。同步发电机阻尼主要来自3个方面,一是转子运动方程中摩擦和汽滞引起的机械阻尼,二是电机阻尼回路产生的阻尼,三是发电机励磁绕组和系统产生的阻尼。这些阻尼有一定联系,采用不同的同步发电机模型,阻尼系数所包含的意义也不一样,取值可以相差很大。

(3)PMU可以测量同步发电机功角,这些新技术为同步发电机参数辨识搭建了新的平台,此外,新的辨识方法将使同步发电机参数辨识精度的进一步提高成为可能。

◎记者:电力负荷具有时变性、随机性、分布性、多样性、非连续性等特点,电力负荷建模是电力系统建模的难点之一,请您为我们介绍一下这方面的进展。

鞠教授:不同的电力系统稳定问题,负荷的影响是不一样的。即使对于相同的电力系统稳定问题,负荷模型究竟是“乐观”还是“保守”可能与运行状态有关。所以必须建立“实际”的负荷模型,这里的“实际”是指:负荷模型必须反映负荷的实际情况,既不“保守”也不“乐观”。

几十年来,人们提出了多种负荷模型:(1)静态负荷模型,常用的有多项式和幂函数模型,另外还有在这2种模型基础上的变形或组合;(2)物理动态负荷模型,主要是静态负荷加感应电动机的综合负荷模型,又分为直接和间接考虑配电网2种,对于感应电动机采用三阶模型就能很好地反映感应电动机的性能;(3)非物理动态负荷模型,包括线性动态模型、非线性动态模型和人工神经网络模型等。往往要根据应用者关心的主要方面,选择一种合适的负荷模型。

电力负荷建模方法可以归纳为统计综合法、总体测辨法和故障仿真法。我认为,总体测辨法比较适合于微观定量,统计综合法比较适合于中观定性,故障仿真法比较适合于宏观校验。

在负荷参数辨识研究中人们常常发现:即使同一试验,负荷参数有时变化较大,但不同参数模型的动态响应却相差不大,而且与实测的结果也吻合甚好。这证明该模型能够描绘负荷动态行为,但可能不唯一。人们在根据测量数据进行参数辨识的过程中自然很关心能否成功地辨识出来,当模型本身的结构决定了参数不能唯一地辨识出来,则仅通过测量数据来辨识参数多半是不会成功的。因此,电力负荷模型的可辨识性问题应该得到深入的研究和广泛的重视。

电力负荷辨识方法大体可以分为线性和非线性2大类。线性类方法包括最小二乘估计、卡尔曼滤波

等方法,对于参数线性模型通常是行之有效的。但对于参数非线性模型,容易产生不准确及收敛性等问题。非线性模型的参数辨识方法目前大都以优化为基础。优化搜索方法从其原理上来说,大体有3种,即梯度类方法、随机类搜索方法和模拟进化类方法。

负荷建模的研究是一个既具有理论深度又直接面向实际应用的课题。由于负荷的大量性、分散性、时变性,而且与用户人群的行为密切联系的,所以负荷特性与所在地区的气候、资源、经济发展情况、生活水平、生活习惯等有关,这就造成了不同地区之间负荷模型及参数的差异。只有深入、持久地开展现场测量和应用研究,才能获得适合于该地区的负荷模型和参数。目前,各省地电网公司纷纷开展或者准备开展负荷建模项目,如东北、西北、河南、江苏、福建、湖南、海南、新疆、浙江、上海及南方电网等。

◎记者:电力负荷建模今后的发展趋势又将如何呢?

鞠教授:综上所述,国内外在电力负荷建模方面取得了不少重要的成果。但是,电力负荷建模是一个研究时间很长而始终没有解决的难题,今后还有很长一段路要走。展望电力负荷建模研究,有几点发展趋势。

(1)从节点负荷建模向广域负荷建模发展。从负荷建模的规模来看,以往有关负荷建模的研究基本上都是节点规模,即针对一个变电站(主要是220 kV、110 kV电压等级)供电的负荷区域,建立其负荷模型。随着电力系统规模的扩大,广域电力系统的负荷建模自然需要深入研究。

(2)从纯粹负荷建模向广义负荷建模发展。从负荷建模的内涵来看,以往的负荷建模都是指负荷区域中是纯粹的负荷。但在当前的部分系统中尤其是未来的电力系统中,负荷区域却可能包含有电源,比如地方电厂、分布电源、新能源等等。这种包含有电源、但依然以负荷为主的区域被称之为广义电力负荷,这里“负荷为主”意味着纯负荷明显大于电源、负荷区域总的功率主要还是由外部供给。一般来说,广义电力负荷是枢纽变电站供电下的一个区域。特殊情况下,也可以将经过西电东送工程形成全国联网以后东部电力系统的全部或者部分区域看作为“广义电力负荷”,这时的问题将非常复杂。广义电力负荷建模是对传统负荷建模的突破和拓展,需要大力开展相关内容的研究工作,包括模型结构、参数确定等。

(3)从小范围负荷建模向广谱负荷建模发展。目前的负荷模型及其参数只适用于小范围,一方面指电压(以及频率)在额定值附近的小范围波动,比如电压在0.7~1.2 p.u.;另一方面指时间范围为暂态,一般为秒级。广谱负荷建模是指,电压(以及频率)大范围波动、时间范围是中长期动态过程下的负荷建模。

(4)从单个数据源向综合利用各种数据发展。从负荷建模的数据源来看,以往的负荷建模中,数据来

源大都单一。目前,所有电网都有 SCADA 系统,大部分电网已经安装了故障信息系统,部分电网开始安装 PMU/WAMS 系统。所以,我建议充分地、综合地利用现有的各种数据,开展负荷建模工作。比如,利用 SCADA 中很容易获得的日负荷曲线,获得负荷构成特征数据,甚至进行负荷静态特性建模。再如,利用 PMU 数据或故障录波数据辨识动态特性参数,工作量小、投资也少。还有,利用 WAMS 数据,进行负荷模型的仿真校核。

◎记者:在中国,新能源发电事业近年来发展迅猛,大规模新能源发电系统的建模情况如何?

鞠教授:从环境保护和新能源利用的角度考虑,希望尽量扩大新能源发电的规模。然而,新能源具有随机性、不可控性和多样性,对电网的电能质量以及安全稳定构成了严重的威胁,同时也给电网的研究带来巨大的挑战。

以往电力系统建模基本上都是针对传统电源的。随着大规模新能源的接入,需要考虑其自身的模型及其与电网模型的连接。国内外对于新能源电厂的建模已经开展了一些研究,但以往有关的研究成果都是以含单个新能源电厂的电网甚至是单个机组作为研究对象的,试图通过对单个新能源发电机组的建模来进行仿真计算。然而,实际电网中含有多个新能源电厂,各个新能源电厂通过电网相连,相互之间必然产生交互影响,进而影响整个电网的运行。随着越来越多的新能源电厂的接入,这种影响也会随之增加。而且,一个大规模新能源电厂中的发电机组可能多达数百个。因此,必须从整个电网着眼来研究含大规模新能源电厂及其接入电网之后的建模问题,既要满足精度要求,又不能够太复杂。

除此之外,核电厂虽然不属于新能源,但以往电力系统计算中对其模型研究的不多,也需要进一步加以研究和应用。

◎记者:我们知道,微网是一个新兴事物,它的建模研究进展如何呢?

鞠教授:微网是一个新兴事物,由大量分布式电源和负荷元件组成。为了研究微网独立运行和并网运行,需要了解微网内部元件的模型。如果要详细分析微电网内部的特性,需要对每个元件都加以描述。但是,微网中元件众多,如果要分析微电网接入电力系统之后的特性,要对每个元件都加以描述既不可能、也不必要。

我们开展微网建模的基本思路有如下几点。

(1)建模要注重总体性。对于微网接入电力系统的情况,人们所需要的只是从电力系统侧向微电网侧看进去的总体特性,并不关注微电网内部元件个体的特性。所以,我们可以借鉴电力负荷总体建模的思路。当然,微网建模与负荷建模既有相似之处,也有不同之处。

(2)模型要有机理性。因为电力系统是一个物理

系统,具有机理背景模型便于理解和应用。我们将微网分为等效静态部分与等效电机部分,相并联后接在母线上,然后通过 PCC 点直接接入大电网。

(3)模型要有适应性。微网中元件千差万别,如果按照传统思路,分别建模则很难处理。所以,我们提出采用通用电机模型来描述微网中所有电机,该模型具体广泛的适应性。

(4)模型要考虑随机性。微网中的电源具有比较强烈的随机性,比如风电、太阳能发电等。微网中的负荷同样具有随机性,由于规模和范围较小,其随机性要大于大规模和大范围地区的随机性。

◎记者:国内外关于电力系统建模方面有哪些导则可供研究者参考呢?

鞠教授:我国先后制定了电力系统模型有关的导则。1981 年和 2001 年颁布了《电力系统安全稳定导则》,2006 年颁布了《电力系统稳定器整定试验导则》,2006 年颁布了《同步发电机励磁系统建模导则》,即将颁布《同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则》。

IEEE 先后制定了电力系统模型有关的导则(Guide)。1991 年和 2003 年颁布了同步发电机建模方面的导则,1992 年颁布了励磁系统建模方面的导则,此外还颁布了一系列有关试验方面的导则等。

综上所述,四大参数中,励磁系统建模国内外已经有了导则,原动机及其调节系统国内即将出台导则,同步发电机建模国外已经有导则但国内还没有,电力负荷建模国内外均没有导则。

目前,我国各省地电网纷纷展开电力系统建模工作,但采用的模型和方法五花八门,急需进行规范和引导。因此,国家电网公司已经立项,由河海大学与中国电力科学研究院合作,正在结合我国电网实际研究制定《同步发电机建模导则》和《电力系统负荷建模导则》。

◎记者:您是我国电力系统建模方面的专家,我们得知,您撰写的《电力系统建模理论与应用》一书即将出版,能否先向我们的读者简单介绍一下这本书呢?

鞠教授:《电力系统建模理论与应用》一书已经完稿,今年即将由科学出版社出版。该书内容涵盖了电力系统建模的各个主要方面,首先介绍电力系统建模的理论基础和技术基础,然后重点介绍在学术上、应用上都十分重要的同步电机建模、电力系统动态等值建模以及电力负荷建模,最后介绍电力系统建模的其它方面,包括电力系统比较成熟的建模方面(比如输电线路、励磁系统建模、调速系统建模)和电力系统比较新颖的建模方面(比如风力发电建模、动力系统建模、微网建模)。对于每个建模问题,都是先介绍模型结构,再介绍建模方法,最后介绍工程应用。

◎记者:感谢鞠教授百忙之中接受我们的采访。

(李育燕)