

多源多变换微电网系统建模与动态稳定分析方法

赵卓立[†], 杨 苹, 许志荣, 王月武

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 511458;

华南理工大学 风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 511458)

摘要: 微电网内部电力电子变换器接口型分布式电源广泛存在. 电力电子接口微源具备与传统电力系统电源拓扑结构、控制方法和动态特性的差异性, 控制方法的多样性、电力电子接口微源高渗透率将给低惯量微电网的协调控制和安全稳定运行带来严峻的挑战. 多类型微源、多类型负荷在微电网内混合共存, 可能引发源源耦合交互、负荷间交互以及源荷交互, 不同特性的设备间相互作用将重新塑造区别与传统电力系统的动态响应特性, 并诱发稳定性问题. 本文首先归纳总结可再生能源渗透率不断提升下多源多变换微电网典型运行特性和存在的稳定性问题, 详细阐述了含风光柴储多源多变换接口的微电网模块化动态建模方法. 在此基础上, 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. 以珠海东澳岛多源多变换智能微电网为对象, 基于提出的动态建模方法和动态稳定分析方法, 给出建模与分析讨论结果. 论文对多源多变换微电网系统动态稳定分析方法的论述可为微电网的广泛推广和应用提供建模和分析理论基础.

关键词: 微电网; 多源多变换; 分布式电源; 电力电子变换器; 动态建模; 动态稳定性分析

中图分类号: TM71 文献标识码: A

Modeling and dynamic stability analysis method of microgrids with multiple energy resources and multiple conversions

ZHAO Zhuo-li[†], YANG Ping, XU Zhi-rong, WANG Yue-wu

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology,

Guangzhou Guangdong 511458, China;

National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control and Integration Technology,

South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 511458, China)

Abstract: Power-electronic-converter (PEC) based distributed generations (DGs) are widespread in microgrids, and they differs significantly from the conventional synchronous generators in control schemes and dynamic characteristics. The diversity of DG control methods and the increasing penetration of PEC DGs are leading to various challenges in coordinated control and stable operation of low-inertia microgrids. The coexistence of heterogeneous microsources and loads within the microgrid may result in interactions among the DGs and loads. The coupling among the devices with different characteristics reshape the dynamic responses of the microgrids and induce stability issues. In this paper, firstly, typical operating characteristics and stability issues of the microgrids with increasing penetrations of renewable energy resources are summarized. The modularized dynamic modeling method of microgrid with multiple energy resources and multiple conversions interface is described in detail. On this basis, the eigenvalue analysis method and basic steps for dynamic stability analysis of microgrid are given. Furthermore, the proposed dynamic modeling and dynamic stability analysis method are adopted to model and analyze the Dongao Island smart microgrid. The discussion of the dynamic stability analysis method of the multiple energy resources and multiple conversions microgrid system can provide the theoretical foundation for the modeling and analysis of the microgrid extension and application.

Key words: microgrids; multiple energy resources and multiple conversions; distributed generation; power electronic converters; dynamic modeling; dynamic stability analysis

收稿日期: 2016-10-09; 录用日期: 2017-05-22.

[†]通信作者. E-mail: zhuolisucut@gmail.com; Tel.: +86 15918509923.

本文责任编辑: 梅生伟.

国家高技术研究发展计划项目 (“863”计划)(2014AA052001), 广东省科技计划项目 (2012B040303005), 南方电网科学研究院科技项目 (SEPRI-K143003), 广州市南沙区科技计划项目(2013P005), 国家留学基金管理委员会资助联合培养博士研究生项目(201406150017)资助.

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (“863” Program) (2014AA052001), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2012B040303005), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Electric Power Research Institute (SEPRI-K143003), Science and Technology Planning Project of Nansha District, Guangzhou (2013P005) and Joint Ph.D. Scholarship of China Scholarship Council (201406150017).

1 引言(Introduction)

传统电网在集中供电模式下的脆弱性、其运行的不可控和不可观以及信息孤岛等多种问题,使得人们重新审视现有电力系统的结构. 可再生和绿色分布式发电系统渗透率的不断提高,将促进发电方式、输配电方式和电能使用方式出现新的变革. 作为实现智能电网中主动配电网的有效方式,微电网有利于引入大量可再生能源发电,减少太阳能、风能等强波动性/间歇性能源的接入对大电网造成冲击,在中低压层面上有效解决分布式电源高渗透率运行时的问题,同时降低电网脆弱性,使电力系统更可靠、安全、清洁和经济^[1-2].

微电网是由分布式电源 (distributed generations, DGs)、分布式储能 (distributed storages, DSs)、能量转换装置、相关负荷,联合协调控制保护装置和智能调度系统组成的小型发电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统^[3-4]. 微电网运行分为并网运行及离网(孤岛)两种运行模式. 正常状况下,微电网通过公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 与主网相连,微电网与主网配网系统进行电能交换,共同给微电网中的负荷供电;当监测到主网故障或电能质量不能满足要求时,或应用于偏远地区和海岛供电时,微电网需孤岛运行,由微电网内的分布式电源给微电网内关键负荷继续供电,保证负荷的不间断电力供应,维持微电网自身供需能量平衡,从而提高了供电的安全性和可靠性. 微电网中央控制器 (microgrid central controller, MGCC) 需要根据实际运行条件的变化实现两种模式之间的平滑切换^[5].

传统电力系统稳定性分析架构体系建立在同步发电机理论上,功角稳定、频率稳定与电压稳定及其对应的小干扰与暂态稳定、短期和长期等稳定性问题均与同步发电机的动态特性密切相关^[6]. 而微电网

内部分布式电源以电力电子变换器接口微源而广泛存在,电力电子接口微源具备与传统电力系统电源拓扑结构、控制方法和动态特性的差异性,控制方法的多样性、电力电子接口微源高渗透率将给微电网的协调控制和安全稳定运行带来严峻的挑战,经过数十年建立并完善的传统电力系统的控制与稳定性分析方法在微电网中很可能不再直接适用,这也成为智能微电网推广和普及的基础理论和技术瓶颈.

近年来,针对微电网稳定性问题得到了广泛的研究. 然而,由于微电源接口类型、微电网类型、运行方式、控制策略、网络参数等具有多种形式,微电网稳定运行特性也会随之改变. 为应对微电网的大规模发展,全面深入揭示微电网的稳定运行机制,在多源多变换微电网的建模与稳定性分析方面亟待进一步探讨与研究. 本文针对微电网大规模发展的需求,归纳总结了可再生能源渗透率不断提升下微电网中存在的动态稳定问题,给出了多源多变换微电网动态稳定分析的一般化概念与方法. 以珠海东澳岛多源多变换智能微电网为对象,基于提出的动态建模方法和动态稳定分析方法,给出建模与分析讨论结果. 论文对多源多变换微电网系统动态稳定分析方法的论述可为微电网的广泛推广和应用提供建模和分析理论基础.

2 多源多变换微电网典型特征与动态稳定问题 (Typical characteristics and dynamic stability issues of microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

2.1 微电源接口类型和控制方法 (Interface types and control methods for microsources)

图1给出了一个典型的微电网系统框图,系统代表了不同类型的微电源和负荷形式的整合. 微电源类型、负荷、网络拓扑参数、控制架构随着不同的应用场合、需求和实际条件而变化.

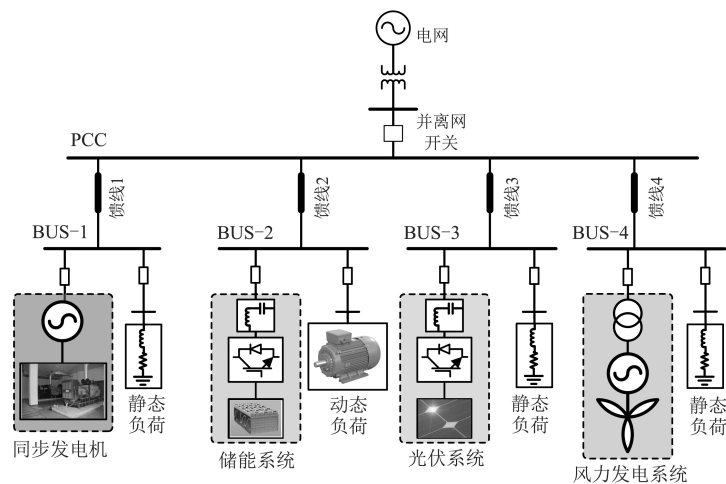


图1 典型微电网系统构架图

Fig. 1 Typical architecture diagram of microgrid system

分布式发电技术的差异化使得各种分布式电源具有不同的接口配置和对应的功率潮流控制方法。一般地,微电源可通过多种类型的微电源接口接入微电网:包括AC旋转电机和电力电子变换器接口。AC旋转电机接口一般连接具有较大惯性时间常数的分布式发电单元,对应响应速度较慢,如柴油发电机、小水电和定速风电机组等^[7];而电力电子变换器接口单元对应响应速度相对较快的分布式发电单元,如光伏发电系统、变速风电机组、燃料电池发电系统、能量型和功率型储能系统等^[8-9]。除少数直接并网的分布式电源外,大部分分布式发电通过电力电子变换器并网。因此分布式发电系统是一个由一次能源、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,其输出动态特性是各单元在各个时间尺度上特性的叠加^[10]。

根据微电网协调控制架构和运行控制的需求,电力电子变换器的功率潮流控制方法能够归类分为:电网跟随型、电网成型、电压源型电网支持和电流源型电网支持,如图2所示^[11-12]。

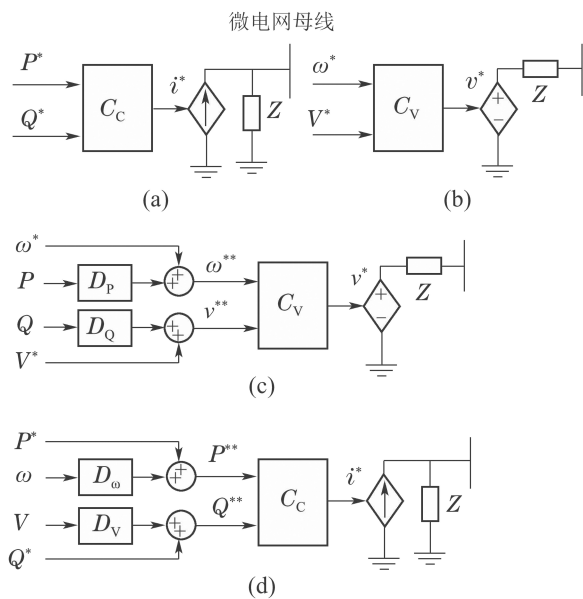


图2 微电网中微电源电力电子变换器4种基本功率潮流控制结构

Fig. 2 Four basic types of control structures of power converters in microgrids

电网跟随型电力电子变换器主要目标是向微电网输送特定的有功和无功功率,它们能够用连接到微电网中的理想电流源及其并联高阻抗表示。电网成型型电力电子变换器可控制作为微电网主电源,提供微电网电压和频率参考,该类变换器能够用并网的具有低输出阻抗的理想电压源等效。此外,电网支持型变换器可细分为电压源型和电流源型,可分别用理想电压源串联输出阻抗和理想可控电流源

并联输出阻抗等效表示;该类变换器能够通过调整输出功率间接或直接地参与微电网电压和频率调整。

2.2 多源多变换微电网典型特征与动态稳定问题 (Typical characteristics and dynamic stability issues of microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

分布式电源的广泛应用及微电网电力电子变换器高渗透率使得微电网运行特性与传统电力系统间存在较大区别。由于微电网整合低压配网中数量庞大、种类繁多、特性各异的分布式发电单元,同步、异步、电力电子接口等多类型微源混合共存;同时,微电网由于靠近用户负荷末端,阻感类、电机类、电力电子接口型有源负荷就近接入微电网。因此,多类型微电源间可能引发源源耦合交互、多类型负荷间可能导致负荷间交互、微电源与负荷间产生源荷交互,不同特性的设备间相互作用将重新塑造区别与传统电力系统的动态响应特性,并诱发稳定性问题。

微电网动态稳定是指微电网遭受小扰动后恢复到稳定运行状态的能力。微电网时刻经受着小的干扰,如微电网内风电机组、光伏阵列和其他可再生能源发电受气候和天气变化影响导致输出功率波动,负荷在小范围内切换变化以及部分参数的缓慢变化等。这些类型的小范围功率波动事件十分频繁,时刻影响微电网的运行状态。由第2.1小节分析可知,通过电力电子变换器接口接入微电网的分布式电源,其运行和控制较为灵活,当受到外部扰动时,由于惯性缺失或低惯量特性,更容易发生振荡失稳。因此,一个设计良好的微电网系统,首先必须是小干扰稳定的,否则,即使在稳态工况下,系统也无法正常运行。保证微电网在小扰动工况下动态稳定的鲁棒性,是确保微电网可靠运行的关键。

一般地,微电网动态稳定性取决于初始运行状态、系统内各元件联系的紧密程度以及各控制装置的特性等。而影响微电网动态稳定性相关因素主要包括:微源与微源间的交互作用^[13-14]、微源与负荷间的交互作用^[15]、运行点变化^[16]、通讯延迟^[17]、AC/DC网络交互作用^[18]和多微电网互联交互。微电网中多种类型不同动态特性的微电源共存,同时分布式电源之间电气距离较近,联系紧密,单个微电源受到的扰动容易耦合到其他分布式电源。微源和微源、微源和负荷等单元间强耦合作用严重恶化微电网动态稳定问题,可能引发系统低频振荡、电力电子变换器接口微电源过载、稳定裕度降低和高频振荡等问题。

3 多源多变换微电网系统动态建模(Dynamic modeling for microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

动态稳定性分析研究在多机电力系统中已经有一段较长的历史, 尤其是用于分析和预防大规模互联电网的低频振荡现象的发生^[19]. 微电网动态稳定性分析主要用于预测参数等发生改变时系统的动态行为, 为控制参数的选择、微电网系统配置、运行控制策略的制定等提供理论依据和参考.

不失一般性地, 如图1所示的多源多变换微电网系统将用于研究微电网的动态稳定性. 动态建模方法将整个系统动态模型分成5个主要的子系统: 储能系统(battery energy storage system, BESS)、光伏发电系统(photovoltaic, PV)、风力发电系统(wind turbines, WT)、柴油发电机组(diesel-generator set, DGS), 以及包含负荷的网络. 多源多变换微电网子系统的动态模型将分别在以下各小节建立. 应当指出的是, 提出的模块化建模方法能够方便地扩展至包含更多数量和种类的分布式电源和负荷. 注意所有子系统将分别在本地参考坐标系中代表, 在建立微电网动态模型之前, 所有接口状态变量需要基于图3和式(1)定义的变换转换至全局参考坐标系(dq)下.

如图3所示, 微电网全局参考坐标系(dq)以 ω_e 角频率旋转, 定义在母线(BUS)1的电压矢量上; $d_D q_D$, $d_B q_B$, $d_P q_P$ 和 $d_I q_I$ 分别是DGS, BESS, PV和WT的本地参考坐标系, 分别锁定在DGS 转子, BUS-2, BUS-3和BUS-4上; 对应的旋转速度分别为 ω_D , ω_B , ω_P 和 ω_I .

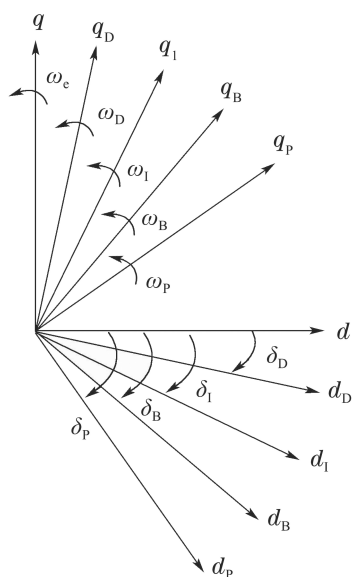


图3 微电网系统全局及本地旋转参考坐标系
Fig. 3 Global and local reference frames of the microgrid system

$$\begin{bmatrix} \Delta f_q^n \\ \Delta f_d^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_n^o & -\sin \delta_n^o \\ \sin \delta_n^o & \cos \delta_n^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_q^g \\ \Delta f_d^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f_d^{no} \\ f_q^{no} \end{bmatrix} \Delta \delta_n, \quad (1)$$

式(1)中: δ_n ($n=D, B, P, I$)是第 n 个子系统对应的本地参考坐标系与全局参考坐标系之间的角度差; $[\Delta f_q^n \ \Delta f_d^n]^T$ 与 $[\Delta f_q^g \ \Delta f_d^g]^T$ 分别是对应本地参考坐标系和全局参考坐标系下的状态变量.

3.1 微电源动态建模(Dynamic modeling for microsources)

3.1.1 储能系统动态模型(Dynamic model of BESS)

如图4所示, 微电网中储能单元由电池组、功率电路和双向变流系统组成. 控制系统包括: 1) 下垂控制环, 用于设定有功功率和无功功率参考以主动参与微电网频率和电压的调整; 2) 功率控制环, 用于跟踪输出功率的动态特性; 3) 内环电流控制环, 负责控制滤波电感电流并限制逆变器故障电流. 需要指出的是, BESS系统采用集中式控制方式, 能确保微电网系统中多BESS的优化运行. 如图4所示, 分配至单独BESS系统的有功功率和无功功率指令为

$$P_{Brefi} = C_{P_i} P_{Bref}, \quad (2)$$

$$Q_{Brefi} = C_{Q_i} Q_{Bref}. \quad (3)$$

P_{Brefi} 和 Q_{Brefi} 分别是产生的第 i 个BESS单元的有功和无功功率指令; P_{Bref} 和 Q_{Bref} 分别是MGCC计算的总有功/无功功率指令; C_{P_i} 与 C_{Q_i} 是第 i 个BESS单元的参与系数, 参与系数根据SoC和储能单元的容量整定.

这样, BESS单元的动态模型可由控制系统和功率电路子模块组成, 分别推导如下:

1) 控制系统.

描述 f/P 频率下垂和 V/Q 电压下垂特性的下垂控制器能够用式(4)–(5)线性化表示:

$$\Delta P_{Bref1} = K_{fP} \Delta f_B + \Delta P_{MEMS}^B, \quad (4)$$

$$\Delta Q_{Bref1} = K_{VQ} \Delta V_{rms}^B + \Delta Q_{MEMS}^B, \quad (5)$$

其中: P_{Bref1} 与 Q_{Bref1} 是有功和无功功率的输出参考值; P_{MEMS}^B 与 Q_{MEMS}^B 是微电网上层能量管理系统提供的稳态设定功率值; K_{fP} 是频率下垂增益; K_{VQ} 是电压下垂增益; f_B 是微电网频率; V_{rms}^B 是BUS-2的电压有效值.

BESS单元的瞬时输出功率线性化形式可表达为

$$\Delta P_{OUT} = \bar{V}_d^{B0} \Delta \bar{i}_d^B + \Delta \bar{V}_d^{B0} \bar{i}_d^B + \bar{V}_q^{B0} \Delta \bar{i}_q^B + \Delta \bar{V}_q^{B0} \bar{i}_q^B, \quad (6)$$

$$\Delta Q_{OUT} = \bar{V}_d^{B0} \Delta \bar{i}_q^B + \Delta \bar{V}_d^{B0} \bar{i}_q^B - \bar{V}_q^{B0} \Delta \bar{i}_d^B - \Delta \bar{V}_q^{B0} \bar{i}_d^B, \quad (7)$$

其中: (i_d^B, i_q^B) 和 (V_d^B, V_q^B) 分别是变流器在 $d_B q_B$ 坐标系下的输出电流和电压;“-”代表滤波分量。

基于下垂控制器产生的功率参考值,功率控制器的输出能够表达为

$$i_{dref}^B = K_{pp}(P_{Bref1} - P_{out}) + K_{ip} \int (P_{Bref1} - P_{out}) dt, \quad (8)$$

$$i_{qref}^B = K_{pq}(Q_{Bref1} - Q_{out}) +$$

$$K_{iq} \int (Q_{Bref1} - Q_{out}) dt, \quad (9)$$

其中: K_{pp} 与 K_{pq} , K_{ip} 与 K_{iq} 分别是功率控制器的比例和积分增益; i_{dref}^B 和 i_{qref}^B 是变流器输出电流的参考值;这样,内环电流控制器的模型可描述为

$$V_{cdref}^B = -K_{p1}(i_{dref}^B - \bar{i}_d^B) - K_{i1} \int (i_{dref}^B - \bar{i}_d^B) dt + \omega_B L_f \bar{i}_q^B + \bar{V}_d^B, \quad (10)$$

$$V_{cqref}^B = -K_{p2}(i_{qref}^B - \bar{i}_q^B) - K_{i2} \int (i_{qref}^B - \bar{i}_q^B) dt - \omega_B L_f \bar{i}_d^B + \bar{V}_q^B, \quad (11)$$

其中: K_{p1} 与 K_{p2} , K_{i1} 与 K_{i2} 分别是电流控制器的比例和积分增益; V_{cdref}^B 和 V_{cqref}^B 变流器输出电压参考值。

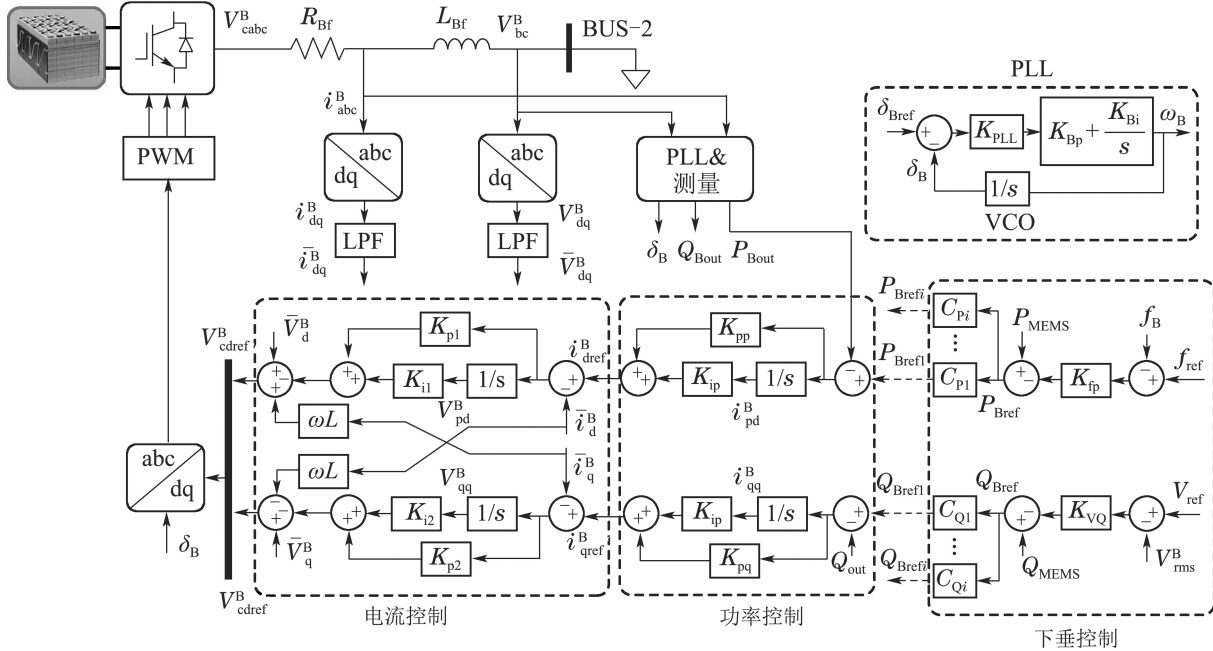


图4 储能系统功率电路和控制架构接口

Fig. 4 Power circuit and control structure interface of BESS

由图4可见,用于微电网同步的锁相环(phase-locked loop, PLL),其数学模型可表达为

$$\Delta \dot{\omega}_B = -\Delta \omega_B K_{PLL} \left(K_{Bp} + \frac{K_{Bi}}{s} \right), \quad (12)$$

其中: K_{PLL} 为PLL调节器的相角误差增益, K_{Bp} 和 K_{Bi} 是PI控制器增益。

2) 功率电路。

功率电路由代表串联AC侧滤波器和接口变压器的集总等值电阻 R_{Bf} 和电感 L_{Bf} 组成,其动态模型可线性化表示为

$$\Delta \dot{i}_d^B = -\frac{R_{Bf}}{L_{Bf}} \Delta i_d^B + \omega_b \Delta i_q^B +$$

$$\frac{1}{L_{Bf}} (\Delta V_d^B - \Delta V_{cd}^B), \quad (13)$$

$$\Delta \dot{i}_q^B = -\frac{R_{Bf}}{L_{Bf}} \Delta i_q^B - \omega_b \Delta i_d^B +$$

$$\frac{1}{L_{Bf}} (\Delta V_q^B - \Delta V_{cq}^B). \quad (14)$$

dq 坐标系下BESS单元状态空间模型包含控制系统和功率电路模型,可分别由方程(2)–(12)以及式(13)–(14)联立构造如下:

$$\Delta \dot{x}_{B,c}^g = A_{B,c} \Delta x_{B,c}^g + B_{B,c} \Delta x_{B,p}^g + B_{B,c}^u \Delta u_B + B_{B,c}^V \Delta V_B^g, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_{B,p}^g = & \\ & A_{B,p} \Delta x_{B,p}^g + B_{B,p} \Delta x_{B,c}^g + \\ & B_{B,p}^u \Delta u_B + B_{B,p}^V \Delta V_B^g + B_B^\omega \Delta \omega_B. \end{aligned} \quad (16)$$

在式(15)–(16)中:

$$\begin{aligned} \Delta x_{B,c}^g = & [\Delta \bar{V}_q^B \ \Delta \bar{V}_d^B \ \Delta \bar{V}_{cq}^B \ \Delta \bar{V}_{cd}^B \ \Delta i_{qq}^B \\ & \Delta i_{pd}^B \ \Delta i_q^B \ \Delta i_d^B \ \Delta V_{qq}^B \ \Delta V_{pd}^B \ \Delta \omega_B]^T, \\ \Delta x_{B,p}^g = & [\Delta i_{Bq}^g \ \Delta i_{Bd}^g]^T, \\ \Delta u_B = & [\Delta Q_{MEMS}^B \ \Delta P_{MEMS}^B]^T, \\ \Delta V_B^g = & [\Delta V_{Bq}^g \ \Delta V_{Bd}^g]^T \end{aligned}$$

需要指出, Δi_{qq}^B , Δi_{pd}^B , ΔV_{qq}^B 和 ΔV_{pd}^B 是代表功率和电流控制器的积分状态变量.

3.1.2 光伏发电系统动态模型 (Dynamic model of PV system)

光伏发电系统通过电力电子变换器接口接入微电网, 其动态模型可参照第3.1.1小节推导如下:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_{P,c}^g = & A_{P,c} \Delta x_{P,c}^g + B_{P,c} \Delta x_{P,p}^g + B_{P,c}^u \Delta u_P + \\ & B_{P,c}^V \Delta V_P^g, \quad (17) \\ \Delta \dot{x}_{P,p}^g = & A_{P,p} \Delta x_{P,p}^g + B_{P,p} \Delta x_{P,c}^g + B_{P,p}^u \Delta u_P + \\ & B_{P,p}^V \Delta V_P^g + B_P^\omega \Delta \omega_P. \quad (18) \end{aligned}$$

在式(17)–(18)中:

$$\begin{aligned} \Delta x_{P,c}^g = & \\ & [\Delta \bar{V}_q^P \ \Delta \bar{V}_d^P \ \Delta \bar{V}_{cq}^P \ \Delta \bar{V}_{cd}^P \ \Delta i_{qq}^P \\ & \Delta i_{pd}^P \ \Delta i_q^P \ \Delta i_d^P \ \Delta V_{qq}^P \ \Delta V_{pd}^P \ \Delta \omega_B]^T, \\ \Delta x_{P,p}^g = & [\Delta i_{Pq}^g \ \Delta i_{Pd}^g]^T, \\ \Delta u_P = & [\Delta Q_{MEMS}^P \ \Delta P_{MEMS}^P]^T, \\ \Delta V_P^g = & [\Delta V_{Pq}^g \ \Delta V_{Pd}^g]^T. \end{aligned}$$

3.1.3 风力发电机组动态模型 (Dynamic model of wind turbine generator)

风力发电机组WT的动态模型由以下子系统组成: 1) 感应发电机电气系统; 2) 风力机空气动力学模型; 3) 旋转轴系. 感应发电机电气系统模型在本地同步旋转参考坐标系 d_1q_1 下表达为

$$W \Delta \dot{i}^I = Y \Delta i^I + \Delta v^I, \quad (19)$$

其中: $i^I = [i_{Wqs}^I \ i_{Wds}^I \ i_{Wqr}^I \ i_{Wdr}^I]^T$, $v^I = [v_{Wqs}^I \ v_{Wds}^I \ v_{Wqr}^I \ v_{Wdr}^I]^T$ 分别是定子(W_{qs} , W_{ds})和转子(W_{qr} , W_{dr})的电流和电压矢量. 矩阵 W 和 Y 的推导见文献[20].

风力发电机组电磁转矩可描述为

$$\begin{aligned} \Delta T_{eI} = & X_{MA} (i_{Wdro}^I \Delta i_{Wqs}^I + i_{Wqso}^I \Delta i_{Wdr}^I - \\ & i_{Wqro}^I \Delta i_{Wds}^I - i_{Wdso}^I \Delta i_{Wqr}^I), \quad (20) \end{aligned}$$

其中 X_{MA} 是励磁电抗.

风力发电机组旋转轴系模型可用两质量块模型代表如下:

$$\frac{2H_I}{\omega_b} \frac{d\omega_{Ir}}{dt} = K_{ss} \theta_{ss} - D_I \omega_{Ir} - T_{eI}, \quad (21)$$

$$\frac{2H_{Tur}}{\omega_b} \frac{d\omega_W}{dt} = T_{mW} - K_{ss} \theta_{ss} - D_W \omega_W, \quad (22)$$

$$\frac{d\theta_{ss}}{dt} = \omega_b (\omega_W - \omega_{Ir}), \quad (23)$$

其中: H_I , H_{Tur} , D_I 和 D_W 分别是感应电机转子和风力机转子的惯性常数和阻尼系数; ω_{Ir} 和 ω_W 分别是感应电机转子和风力机转子的机械角速度; K_{ss} 是轴系刚度; T_{mW} 是风轮输入机械转矩; θ_{ss} 是轴系扭转角度. 风力机风能捕获机制能够用式(24)–(25)描述:

$$T_{mW} = \frac{\rho_A \pi C_W(\lambda, \beta) R_W^2 V_W^3}{2\omega_W}, \quad (24)$$

$$\lambda = \frac{\omega_W}{V_W} R_W, \quad (25)$$

其中: ρ_A 是空气密度, R_W 是风轮桨叶长度, V_W 是风速, λ 是叶尖速比, $C_W(\lambda, \beta)$ 是功率系数, 为 λ 和桨距角 β 的函数^[21]. 这样, 基于式(19)–(25), 全局参考坐标系下风力发电机组线性化动态模型可推导为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_{SCIG}^g = & A_{SCIG} \Delta x_{SCIG}^g + B_{SCIG}^u \Delta u_{SCIG} + \\ & B_{SCIG}^V \Delta V_{SCIG}^g, \quad (26) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta x_{SCIG}^g = & \\ & [\Delta i_{Wqs}^g \ \Delta i_{Wds}^g \ \Delta i_{Wqr}^g \ \Delta i_{Wdr}^g \\ & \Delta \omega_{Ir} \ \Delta \omega_W \ \Delta \theta_{ss}]^T, \\ \Delta u_{SCIG} = & [\Delta v_{Wqr}^I \ \Delta v_{Wdr}^I \ \Delta T_{mW}]^T, \\ \Delta V_{SCIG}^g = & [\Delta v_{Wqs}^g \ \Delta v_{Wds}^g]^T. \end{aligned}$$

3.1.4 柴油发电机组动态模型 (Dynamic model of diesel generator set)

柴油发电机组系统由以下模块组成: 1) 凸极同步发电机电气系统; 2) 旋转机械系统; 3) 调速器和励磁控制系统. 同步发电机电气系统模型在转子旋转参考坐标系 d_Dq_D 下可表达为

$$M \frac{d}{dt}(i^D) = Ni^D + v^D, \quad (27)$$

其中:

$$i^D = [i_{Sqs}^D \ i_{Sds}^D \ i_{kq1}^D \ i_{fd}^D \ i_{kd}^D]^T, \\ v^D = [v_{Sqs}^D \ v_{Sds}^D \ v_{kq1}^D \ e_{fd}^D \ v_{kd}^D]^T$$

分别是定子绕组(Sqs, Sds), 励磁绕组(fd)和阻尼绕组($kq1, kd$)的电流和电压矢量. 矩阵 M 和 N 的推导过程可参见[20].

同步发电机的旋转运动方程为

$$\frac{2H_S}{\omega_b} \frac{d\omega_{Dr}}{dt} + \frac{K_{DS}}{\omega_b} \frac{d\delta_D}{dt} = T_{mS} - T_{eS}, \quad (28)$$

其中: H_S, K_{DS} 分别是惯性常数和阻尼系数; ω_{Dr} 是转子旋转角速度; T_{mS} 和 T_{eS} 分别是机械和电磁转矩.

$$T_{eS} = -i_{Sds}^D(-i_{Sqs}^D + i_{kq1}^D)X_{mq}i_{Sqs}^D + \\ (-i_{Sds}^D + i_{kd}^D + i_{fd}^D)X_{md}, \quad (29)$$

其中 X_{mq} 和 X_{md} 是励磁电抗.

值得指出的是, T_{mS} 和 e_{fd}^D 分别是调速和励磁系统输出, 其对应模型见IEEE工作组^[22-23]. 为此, 基于式(27)–(29)可推导柴油发电机组本地参考坐标系下的动态模型; 进一步地, 基于式(1), 全局参考坐标系下柴油发电机组动态模型可整合为

$$\Delta \dot{x}_{DGS}^g = A_{DGS} \Delta x_{DGS}^g + B_{DGS}^u \Delta u_{DGS} + \\ B_{DGS}^V \Delta V_{DGS}^g, \quad (30)$$

其中:

$$\Delta x_{DGS}^g = [\Delta i_{Sqs}^g \ \Delta i_{Sds}^g \ \Delta i_{kq1}^D \ \Delta i_{fd}^D \ \Delta i_{kd}^D \\ \Delta \omega_{Dr} \ \Delta \delta_D]^T, \\ \Delta u_{DGS} = [\Delta e_{fd}^D \ \Delta T_{mS}]^T, \\ \Delta V_{DGS}^g = [v_{Sqs}^g \ v_{Sds}^g]^T.$$

3.2 网络建模(Modeling for network)

由图1所示, 网络动态可通过微电网线路电流与电压关系建模

$$V_{DGS}^g - V_{PCC} = R_1 i_{L1} + L_1 \dot{i}_{L1}, \quad (31)$$

$$V_{PCC} - V_B^g = R_2 i_{L2} + L_2 \dot{i}_{L2}, \quad (32)$$

$$V_{PCC} - V_P^g = R_3 i_{L3} + L_3 \dot{i}_{L3}, \quad (33)$$

$$V_{PCC} - V_{SCIG}^g = R_4 i_{L4} + L_4 \dot{i}_{L4}, \quad (34)$$

$$C_c \dot{V}_{PCC} = i_{L1} - i_{L2} - i_{L3} - i_{L4}, \quad (35)$$

其中: R_n 和 L_n ($n = 1, 2, 3, 4$)是线路 RL 分支的等值

阻抗; i_{Ln} 是对应的电流矢量; V_{PCC} 是PCC瞬时电压; C_c 是用于集中无功功率补偿的并联电容. 基于式(31)–(35), 微电网网络动态模型可推导为

$$\Delta \dot{x}_{NET}^g = A_{NET} \Delta x_{NET}^g + B_{NET}^{V1} \Delta V_{DGS}^g + \\ B_{NET}^{V2} \Delta V_B^g + B_{NET}^{V3} \Delta V_P^g + \\ B_{NET}^{V4} \Delta V_{SCIG}^g, \quad (36)$$

其中

$$\Delta x_{NET}^g = \\ [\Delta i_{qd}^{L1} \ \Delta i_{qd}^{L2} \ \Delta i_{qd}^{L3} \ \Delta i_{qd}^{L4} \ \Delta V_{qd}^{PCC}]^T.$$

3.3 负荷建模(Modeling for loads)

负荷动态线性化模型可基于含各负荷等值阻抗的电压方程表示为

$$\Delta V_{DGS}^g = D_{NET}^{11} \Delta x_{NET}^g + D_{NET}^{12} \Delta \dot{x}_{NET}^g + \\ E_{NET}^{11} \Delta x_{DGS}^g + E_{NET}^{12} \Delta \dot{x}_{DGS}^g, \quad (37)$$

$$\Delta V_B^g = D_{NET}^{21} \Delta x_{NET}^g + D_{NET}^{22} \Delta \dot{x}_{NET}^g + \\ E_{NET}^{21} \Delta x_{B,p}^g + E_{NET}^{22} \Delta \dot{x}_{B,p}^g, \quad (38)$$

$$\Delta V_P^g = D_{NET}^{31} \Delta x_{NET}^g + D_{NET}^{32} \Delta \dot{x}_{NET}^g + \\ E_{NET}^{31} \Delta x_{P,p}^g + E_{NET}^{32} \Delta \dot{x}_{P,p}^g, \quad (39)$$

$$\Delta V_{SCIG}^g = D_{NET}^{41} \Delta x_{NET}^g + D_{NET}^{42} \Delta \dot{x}_{NET}^g + \\ E_{NET}^{41} \Delta x_{SCIG}^g + E_{NET}^{42} \Delta \dot{x}_{SCIG}^g. \quad (40)$$

3.4 整合多源多变换微电网动态模型(Integrated model for microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

如图5所示为将所有子系统整合, 建立多源多变换微电网动态模型的方框示意图. 值得指出的是, DG单元的输出电流 $\Delta i_{DGS}^g, \Delta i_B^g, \Delta i_P^g$ 和 Δi_{SCIG}^g , 是微电网网络模型的输入; 而可通过式(37)–(40)消去的母线电压矢量 $\Delta V_{DGS}^g, \Delta V_B^g, \Delta V_P^g$ 和 ΔV_{SCIG}^g , 是网络模型的输出和DG单元的输入. 因此, 联立式(15)–(18)(26)(30)(36), 建立多源多变换微电网整合状态空间模型为

$$\Delta \dot{x}_{MG} = A_{MG} \Delta x_{MG} + B_{MG} \Delta u_{MG}, \quad (41)$$

其中:

$$\Delta x_{MG} = [\Delta x_{DGS}^g \ \Delta x_{B,p}^g \ \Delta x_{B,c}^g \ \Delta x_{P,p}^g \\ \Delta x_{P,c}^g \ \Delta x_{SCIG}^g \ \Delta x_{NET}^g]^T,$$

$$\Delta u_{MG} = [\Delta u_{DGS} \ \Delta u_B \ \Delta u_P \ \Delta u_{SCIG}]^T.$$

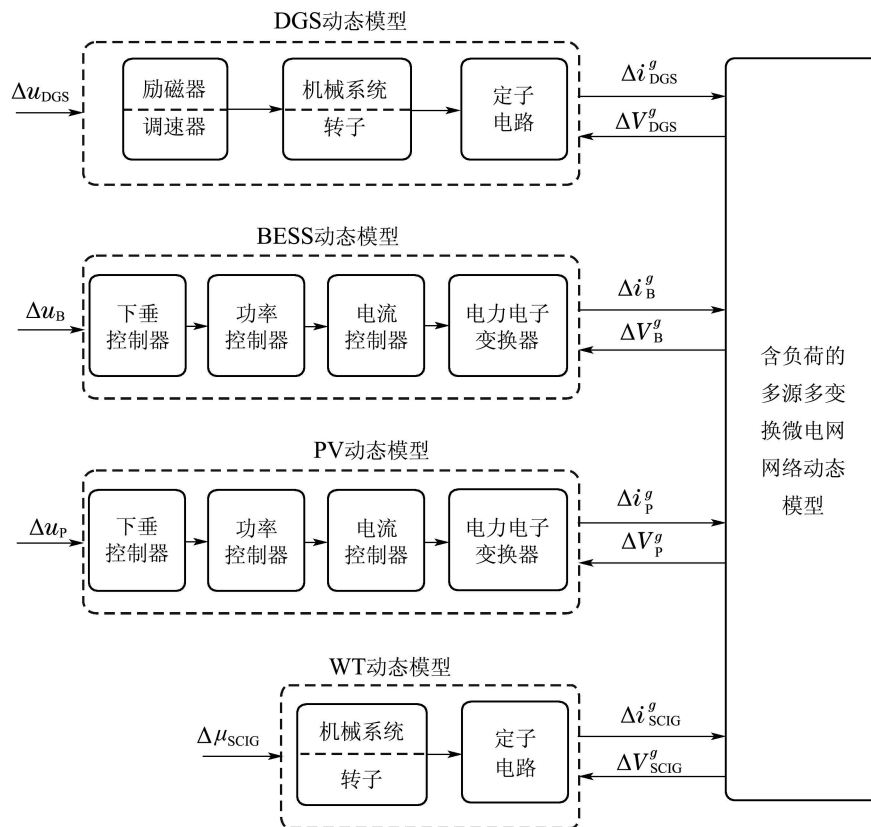


图 5 多源多变换微电网完全动态模型框图

Fig. 5 Block diagram of the dynamic model of the microgrid with multiple energy resources and multiple conversions

4 多源多变换微电网系统动态稳定分析的特征值分析法(Eigenvalue analysis method for dynamic stability analysis of microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

由微电网系统动态模型(41)可求解系统特征根 $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$, 实数特征值对应一个非振荡模式; 复数特征值以共轭对形式出现, 每一对对应一个振荡模式. 若 λ_i 均具有负实部, 则该微电网系统在相应稳态工作点上动态稳定的; 反之, 若有一个或多个根具有正实部, 则系统是不稳定的.

微电网工程应用中不仅需要判断系统是否稳定, 而且还希望知道微电网系统在小扰动下的系统过渡过程相关特征. 对于主要存在的振荡性过渡过程, 感兴趣的特征主要包括: 振荡频率、模态阻尼、相应振荡在系统中的分布(即反映各个状态量中振荡的幅值和相对相位)、振荡引起的原因、状态变量对振荡的贡献等等, 这些信息可为微电网全局和本地控制策略的最佳整定提供依据^[24]. 对于非振荡性过渡过程, 其对应的衰减时间常数及其与系统各状态变量间的相关性等特征, 可为微电网相应控制策略制定提供有用信息. 此外, 稳定裕度的计算也是重要的分析内容.

由于特征值分析法能够提供系统动态稳定的大

量重要信息, 因此成为微电网小干扰稳定性分析最有效的方法之一. 特征值分析方法和时域仿真法相结合, 可以使微电网系统在线性化模型下设计的控制策略进一步在大扰动工况和非线性系统模型下进行时域仿真校验, 这是目前微电网系统中控制策略设计和校验的科学方法与思路. 特征值分析方法的物理意义如第4.1–4.2节所述.

4.1 模态和特征向量(Modal and eigenvectors)

特征值实部给出了模式阻尼, 虚部给出了振荡频率. 由矩阵特征根理论, 对于任一特征值 λ_i , 右特征向量 ϕ_i (列向量)满足

$$A_{MG}\phi_i = \lambda_i\phi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (42)$$

其形式为 $\phi_i = [\phi_{1i} \ \phi_{2i} \ \dots \ \phi_{ni}]^T$; 同样地, 左特征向量 ψ_i (行向量)定义为

$$\psi_i A_{MG} = \psi_i \lambda_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (43)$$

其中 $\psi_i = [\psi_{1i} \ \psi_{2i} \ \dots \ \psi_{ni}]$; 对应的不同特征值的左右特征向量是正交的. 右特征向量 ϕ_i 的第 k 个元素测量了第 i 个振荡模式中状态变量 x_k 的活动, 而左特征向量 ψ_i 的第 k 个元素表示了这个活动对第 i 个振荡模式的权重.

$\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n]$ 和 $\psi = [\psi_1 \ \psi_2 \ \dots \ \psi_n]^T$ 为模态矩阵. 因此, 一对共轭复根对应的特征向量为振荡模态. 特征向量反映了在状态变量上观察相应

的振荡时相对相位关系和相对振幅大小。

4.2 特征值灵敏度与参与因子(Eigenvalue sensitivity and participation factor)

因为左、右特征向量的元素取决于状态变量相关的单位和比例. 参与矩阵结合了左、右特征向量, 作为状态变量和模式之间的度量:

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n], \quad (44)$$

其中

$$P_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i}\psi_{i1} \\ \phi_{2i}\psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni}\psi_{in} \end{bmatrix}, \quad (45)$$

元素 $p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik}$ 为参与因子, 表示第 i 个振荡模式中第 k 个状态变量的相对参与程度。

4.3 多源多变换微电网动态稳定分析的步骤 (Dynamic stability analysis steps for microgrids with multiple energy resources and multiple conversions)

根据上述特征值分析法的物理意义, 可采用特

征值分析法对微电网系统作动态稳定分析, 相应步骤如下:

- 1) 采用Gauss-Seidel等方法对微电网进行潮流计算, 计算稳态运行点和各状态变量初值;
- 2) 基于第3节建模方法建立多源多变换微电网系统的整合状态空间模型 $\Delta \dot{X} = A_{MG} \Delta X$;
- 3) 计算系统矩阵 A_{MG} 的全部特征根及相应的左右特征向量;
- 4) 根据研究实际问题的需要, 可选择计算某些感兴趣特征根的相关因子、参与因子和灵敏度; 计算微电网系统模式对关键控制参数、运行点、通讯延迟等的灵敏度;
- 5) 根据计算结果判断及分析微电网系统的稳定裕度和小扰动过渡过程的动态特性。

5 结果与讨论(Results and discussions)

如图6所示, 本文以珠海万山群岛新能源微电网示范项目—东澳岛多源多变换智能微电网为例, 基于第3节多源多变换微电网系统动态建模方法和第4节动态稳定分析的特征值分析法, 给出建模与分析讨论结果。

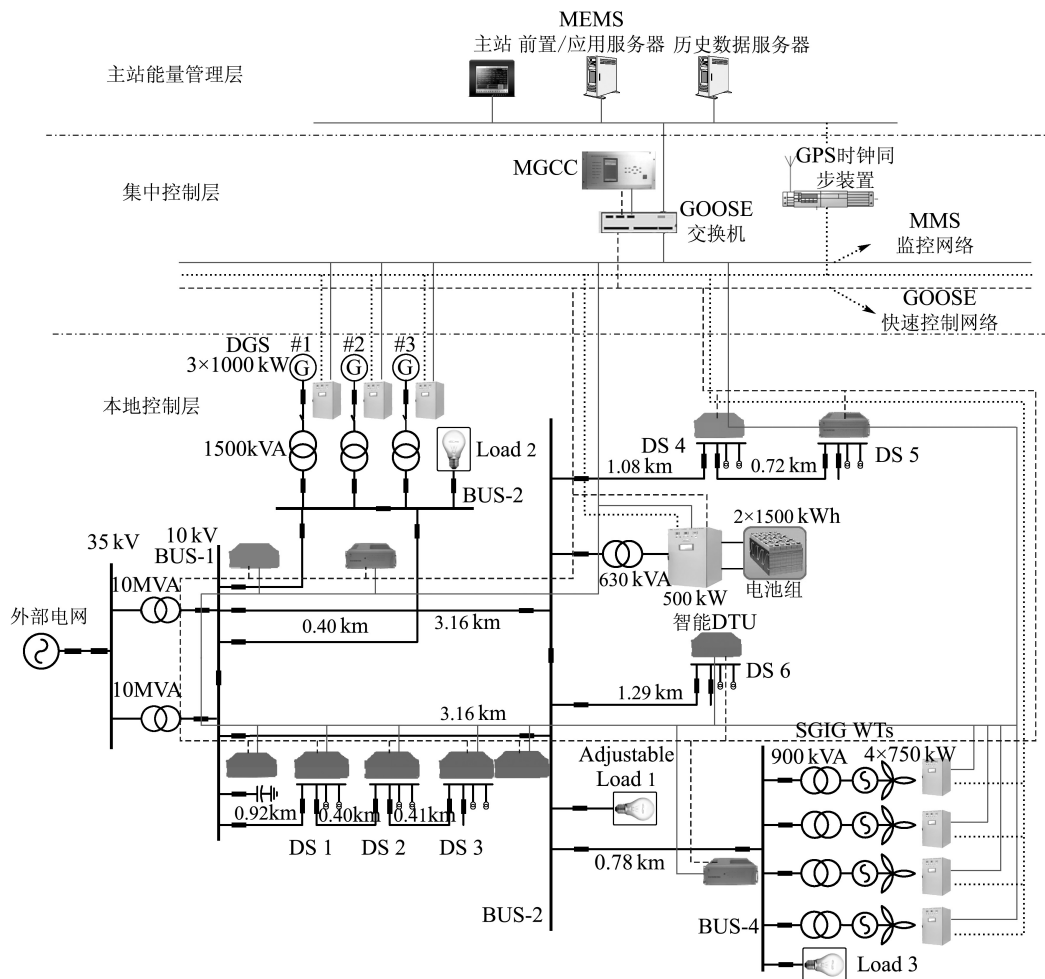


图6 东澳岛智能微电网单线图与分层控制架构

Fig. 6 Single-line diagram and hierarchical control structure of the Dongao Island microgrid

如表1所示,给出了东澳岛多源多变换微电网系统主要参数和潮流计算主要结果(初始稳态运行点),对应的微电网系统特征根谱(阻尼小于 -2000 s^{-1})如图7所示.微电网系统呈现12对共轭复根,对应12个系统振荡模式.由图7可见,低频模式被辨识为主导模式,是微电网动态稳定分析的关键.此外,多源多变换东澳岛微电网系统的动态特性受3对欠阻尼特征根显著影响,也就是(27, 28), (29, 30)和(33, 34).除去对应欠阻尼特征根的系统振荡模式,所有其他系统模式被辨识为高阻尼或处于高频区间,对扰动下微电网稳定性的动态特性塑造可忽略不计.

表 1 系统参数与潮流计算结果(运行点)

Table 1 System parameters and power flow results (operating condition)

元素	类型	额定功率	潮流计算结果 (运行点)
DGS	同步发电机	1020 kW/ 1275 kVA	488 kW/ 338 kVA _r
BESS	电流源型电网支持电力电子变换器	500 kW	200 kW
SCIG WT	异步感应发电机	750 kW	750 kW/ 382 kVA _r
Load 1	串联RL支路		1280 kW/ 100 kVA _r
Load 2	串联RL支路		100 kW/ 50 kVA _r
Load 3	串联RL支路		50 kW/ 50 kVA _r
Capacitor	并联电容器组		250 kVA _r

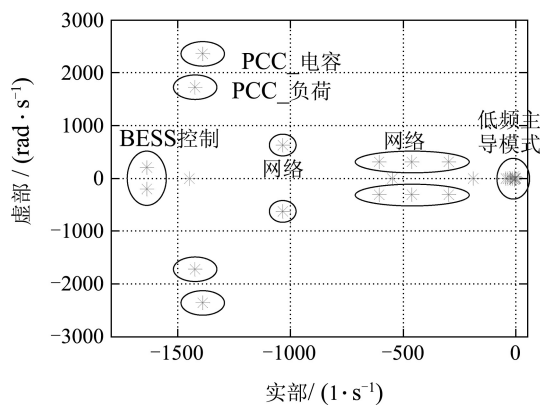


图 7 东澳岛微电网系统全局特征根谱

Fig. 7 Overall eigenvalue spectrum of the Dongao Island microgrid system

参与因子分析反映了系统状态对对应特征根的可控性与能观性.如表2所示,给出了东澳岛微电网系统状态变量对最主导振荡模式(对应阻尼小于 -30 s^{-1})的参与因子分析结果.由表2可见,特征根(27, 28)与(29, 30)代表了柴油发电机组DGS对微电网系统其余部分的振荡模式,而特征根(33, 34)代表了风力发电机组WT与其他DG单元间的电磁交互.需要指出的是,参与因子进行了规格化,同时不列出所有数值小于0.01的项.可观察得出,特征根(29, 30)辨识为微电网系统的机电模式,对应模式的振荡频率为1.76 Hz.

表 2 系统主导模式与系统状态参与因子分析

Table 2 System dominant oscillatory modes and participation factors of system states

系 统 状 态	特征根				
	$K_{fP} = K_{VQ} = -9$ (pu)	7,8	27, 28	29, 30	33, 34
	Real(1/s)	-1389.8	-8.3	-0.8	-0.8
	Im.(rad/s)	± 2354.4	± 33.1	± 11.1	± 0.8
DGS	定子	0.140	0.786	0.620	0.415
	励磁调节器	0.068	0.580	0.446	0.352
BESS	转子	0.066	0.425	0.326	0.065
	功率电路	0.049	0.011	0.10	0.026
SCIG WT	控制系统	0.076	0.023	0.21	0.039
	定子		0.061	0.105	0.474
Network	转子		0.093	0.172	0.627
	轴系				
Loads	Line 1	0.205			
	Line 2	0.161	0.015	0.013	
	Line 3	0.014			
RPC	负荷	0.443			
	电容器组	0.778			

表2获得的参与因子结果揭示了对应DGS定子电流分量的状态变量, Δi_{Sqs}^g 与 Δi_{Sds}^g 显著贡献了多源多变换微电网系统的大部分主导振荡模式.值得注意的是,在传统互联电力系统低频振荡建模分析中,通常忽略定子动态^[25].然而,由表2可见,在多源多变换微电网系统降阶稳定性分析中,忽略定子动态很可能将导致不可信的分析结果.此外,由表2可看出, BESS电流源型电网支持电力电子变换器的控制策略对微电网系统机电模式有明显影响.而且,参与因子分析结果显示,在多源多变换微电网系统中引入的风力发电机组WT将产生新的欠阻尼特征根,也就是(33, 34),并有效参与影响多源多变换微

电网系统振荡模式的塑造。

进一步地,可分析评价多源多变换微电网系统主导振荡模式对关键控制参数、运行点、通讯延迟等的灵敏度,根据计算结果判断及分析东澳岛微电网系统的稳定裕度和小扰动过渡过程的动态特性,为微电网全局和本地控制策略的最佳整定提供依据。

因此,在工程应用中,为整定东澳岛微电网系统关键控制参数,可针对影响东澳岛微电网系统动态稳定性的关键低频主导模式进行敏感度分析。图8给出了微电网系统主导特征根对应 f/P 下垂增益 K_{FP} 在 -0.01 到 -45 范围变化时的敏感度。由图8可见,主导特征根(29, 30)的轨迹显示 f/P 下垂控制环路显著影响机电模式。需要指出的是, f/P 大下垂增益能有效增强微电网系统的暂态响应特性。然而,由图8可见,随着 f/P 下垂增益 K_{FP} 的增加,主导模式(29, 30)趋向于移动至不稳定区域,这将导致振荡行为的加剧,甚至导致微电网系统失稳。

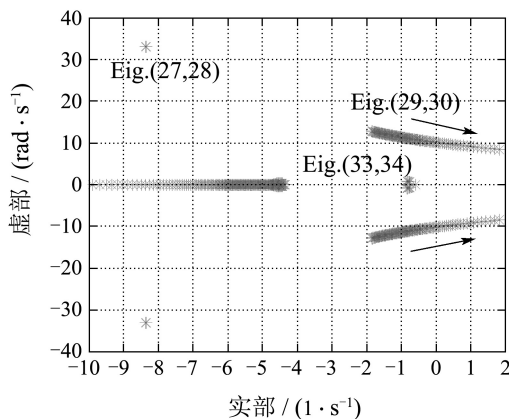


图8 振荡模式对频率下垂增益 K_{FP} 变化的敏感度

Fig. 8 Trace of the oscillatory modes as a function of frequency droop gain

6 结论(Conclusions)

多类型微源、多类型负荷在微电网内混合共存,不同特性的设备间相互作用将重新塑造区别与传统电力系统的动态响应特性,并诱发稳定性问题。本文在对微电源接口类型和控制方法进行梳理的基础上,总结了微电网典型运行特性,归纳了微电网存在的稳定性问题。微电网存在的动态稳定问题主要由微源和微源交互、微源和负荷交互、运行点变化、通讯延迟、AC/DC网络交互以及多微电网互联交互引起,通常归因于系统振荡阻尼不足。本文提出的模块化微电网动态建模方法能够方便地扩展至包含更多数量和种类的分布式电源和负荷;特征值分析法可预测小扰动下微电网系统的动态行为和稳

定裕度。以珠海东澳岛多源多变换智能微电网为对象,基于提出的动态建模方法和动态稳定分析方法,给出建模与分析讨论结果。论文对多源多变换微电网系统动态稳定分析方法的论述可为微电网控制参数的选择、系统配置、运行控制策略的制定等提供理论依据和参考。

参考文献(References):

- [1] LASSETER R H. Microgrids [C] // *Power Engineering Society Winter Meeting*. New York: IEEE, 2002, 1: 305 – 308.
- [2] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids [J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2007, 5(4): 78 – 94.
- [3] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(2): 916 – 924.
- [4] ZHAO Zhuoli, YANG Ping, CAI Zexiang, et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(10): 1 – 9.
(赵卓立, 杨苹, 蔡泽祥, 等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳定协同控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(10): 1 – 9.)
- [5] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158 – 172.
- [6] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1387 – 1401.
- [7] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4): 1821 – 1831.
- [8] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management [J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2008, 6(3): 54 – 65.
- [9] GU Y, LI W, HE X. Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 2328 – 2337.
- [10] WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 1 – 12.
(王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究 [J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 1 – 12.)
- [11] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4734 – 4749.
- [12] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al. Trends in microgrid control [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4): 1905 – 1919.
- [13] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 796 – 808.
- [14] ZHAO Z, YANG P, GUERRERO J M, et al. Multiple-time-scales hierarchical frequency stability control strategy of medium-voltage isolated microgrid [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(8): 5974 – 5991.
- [15] BOTTRELL N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Dynamic stability of a microgrid with an active load [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(11): 5107 – 5119.

- [16] MISHRA S, RAMASUBRAMANIAN D. Improving the small signal stability of a PV-DE-dynamic load-based microgrid using an auxiliary signal in the PV control loop [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(1): 166 – 176.
- [17] AHUMADA C, CÁRDENAS R, SAEZ D, et al. Secondary control strategies for frequency restoration in islanded microgrids with consideration of communication delays [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1430 – 1441.
- [18] RADWAN A A A, MOHAMED Y A R I. Assessment and mitigation of interaction dynamics in hybrid AC/DC distribution generation systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1382 – 1393.
- [19] UUDRILL J M. Dynamic stability calculations for an arbitrary number of interconnected synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, PAS-87(3): 835 – 844.
- [20] KRAUSE P C, WASYNCZUK O, SUDHOFF S D, et al. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] TABESH A, IRAVANI R. Small-signal dynamic model and analysis of a fixed-speed wind farm—a frequency response approach [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(2): 778 – 787.
- [22] DEMELLO F P. Dynamic-models for fossil fueled steam units in power-system studies [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6(2): 753 – 761.
- [23] IEEE Std 421.5-1992. IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies [S]. *IEEE Standard*.
- [24] NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. *Theory and Analysis of Dynamic Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
(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.)
- [25] KUNDUR P. *Power System Stability and Control* [M]. New York: EPRI/McGraw-Hill, 1994.

作者简介:

赵卓立 (1988–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为微电网协调控制与稳定性分析、新能源发电并网与控制技术、电力系统电力电子化动态问题等, E-mail: zhuoliscut@gmail.com;

杨苹 (1967–), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为新能源发电并网与控制技术、分布式发电与微电网技术、复杂系统建模与分析等, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

许志荣 (1989–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为多微电网协调控制与优化运行、新能源发电并网与控制技术、新能源电力系统, E-mail: 407849739@qq.com;

王月武 (1983–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为新能源发电并网与控制技术, E-mail: mythpluto@gmail.com.