

DOI: 10.7667/PSPC201662

# 分布式电源高渗透率的微电网快速稳定控制技术研究

易永辉<sup>1</sup>, 任志航<sup>1</sup>, 马红伟<sup>1</sup>, 牛志雷<sup>1</sup>, 杨蕴华<sup>2</sup>

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014)

**摘要:** 通过分析分布式电源高渗透率微电网的运行特性及其给配电网运行带来的影响, 提出了一种基于三层控制架构设计多态多时间尺度的微电网综合稳定控制方法。从微电网电力电子设备快速稳定控制、微电网暂态稳定控制、微电网动态稳定控制、微电网稳态稳定控制四个层面构成了多态多时间尺度稳定控制的技术体系, 以实现微电网内功率快速调节、扰动快速平抑、故障快速隔离、运行效率提高、稳定水平趋优等控制目标。重点研究了微电网内电力电子设备参与微电网稳定运行控制的实现方法。相关工程实践表明, 该方法效果良好。

**关键词:** 高渗透率; 微电网; 多态稳定; 多时间尺度

## Study on fast stable control technology of high permeability micro-grid with distributed generation

YI Yonghui<sup>1</sup>, REN Zhihang<sup>1</sup>, MA Hongwei<sup>1</sup>, NIU Zhilei<sup>1</sup>, YANG Yunhua<sup>2</sup>

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

**Abstract:** Operating characteristics of high permeability distributed generator (DG) in micro-grid (MG) is analyzed firstly, and special operation problems of distribution network brought about high permeability DG in MG is also described, on this basis, the multi time scale MG stable control method based on the design of three layer control architecture is proposed. This method is composed of four aspects, including the fast stable control by MG power electronics equipment, transient stable control of MG, dynamic stable control of MG and steady state stable control of MG. This method can complete power rapid adjustment, disturbance quickly stabilization, fault rapid isolation, operation efficiency improvement, and stable level optimization. This paper focuses on the research of realization method of fast stable control which is participated by power electronic equipment. Related engineering applications show that the above method is effective.

**Key words:** high permeability; micro-grid; multi time scale stability; multi time scale

## 0 引言

将分布式电源(DG)以微电网(MG)的形式接入配电网, 是利用分布式电源有效的方式之一<sup>[1-2]</sup>。近年来国内外微电网方面一些关键共性技术得到了广泛的研究, 研究热点主要集中在微电网运行控制、供电可靠性及电能质量改善、经济运行及安全机制、仿真分析及工程建设等方面, 均取得了较为明显的成果<sup>[2]</sup>。

微电网对电网的高渗透改变了电网中能量传递的单向性, 随着分布式电源及含分布式电源微电网在比例不断增加, 给配电网的安全稳定运行、经济调度、控制保护等也带来了一系列的问题。文献[3-4]研究了微电网的稳定控制问题, 文献[3]借助仿真软件, 以12母线测试系统为对象, 建立了主同步

发电机及逆变型分布式发电机的动态模型, 着重探讨了DG对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响, 但是未能提出提高DG高渗透率微电网系统稳定运行水平的控制方法。文献[4]构建了微电网的虚拟分区和控制设备的逻辑分区, 提出了基于虚拟分区实现局部稳定, 继而完成整体快速稳定的控制方法。该方法需要依赖于复杂的高速数据通信网络建立逻辑分区, 并且其微电网稳定控制模型建模复杂, 不能进行灵活扩展。文献[5]分析了预测误差对可再生能源高渗透率微电网经济调度的影响, 提出了一种由日前计划和实时调度两层组成的可再生能源高渗透率条件下考虑预测误差的微电网经济调度模型, 其需要微电网所配置的储能系统有足够的备用容量且配置有分布式发电功率预测功能, 方能有效平抑微电网内部功率波动, 保证其稳定经济运行, 在保

证其运行调度经济性的同时，忽略了微电网建设成本的经济性。文献[6-7]中分析了大量分布式电源接入配电网后，造成的配电线路电压抬升及微电网并网转离网过程中暂态过电压问题，其中文献[7]提出了一种基于 P/U 下垂调节的微电网电压自动调节控制方法，但是其未就因负荷突然增大或者分布式发电出力突然减少造成的电压突降问题，给出有效的控制调节措施。文献[8]通过分析线路阻抗差异、输出电压幅值不等以及微电网复杂结构等因素对传统下垂控制方法造成的影响，提出了一种改进下垂控制策略。文献[9-10]指出因微电网在电源、负荷、能源转换单元、储能和运行状态等方面的多样性，分布式电源的间歇性和随机性，大电网和微电网之间的高渗透率等原因造成微电网的电能质量问题比传统大电网的电能质量问题严重得，其中文献[10]提出一种多功能电能质量控制器，一定程度上可以抑制微电网谐波高渗透率，需要指出的是其结构复杂，容量有限，无法形成大规模工程应用。文献[11]将基于微电网的需求侧响应定义进行了延伸，指出将电动汽车充电桩作为需求侧响应的主要可控负荷更具可行性，但是未就具有时空特性的柔性负荷虚拟储能展开深入探讨。

针对目前微电网发展所需要首要解决的快速稳定控制问题，本文开展了相关研究工作，提出了一种基于三层控制架构设计的多态多时间尺度微电网快速稳定控制方法，并在某海岛微电网工程中得到实践验证。

### 1 微电网多态多时间尺度稳定控制方法

随着未来微电网技术的不断发展深入，未来配电网将形成如图 1 所示的多层级、交直流混连的微电网架构，在不同层级中均存在运行稳定控制问题。

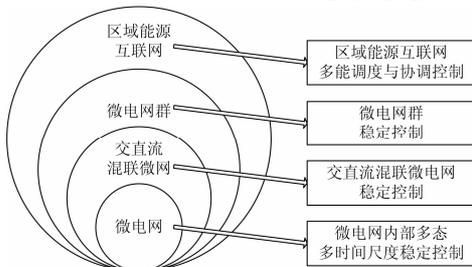


图 1 不同层级微电网稳定控制

Fig. 1 Micro grid stability control at different levels

鉴于分布式电源高渗透率微电网在运行过程中给配电网带来的双向功率潮流、配网电压偏差，微电网自动并网切网、微网功率调度与柔性负荷控制等全新课题。结合工程实践，本文提出了一种

基于三层控制架构设计的多时间尺度多态稳定控制的微电网综合稳定控制方法，如图 2 所示。

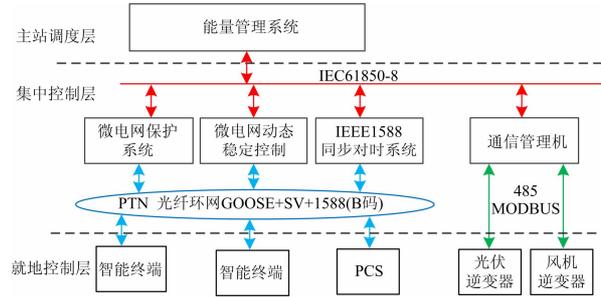


图 2 微电网三层控制架构

Fig. 2 Three layer control system of micro grid

主站调度层实现微电网与上级电网调度间的互动；微电网集中控制层实现微电网监控与能量优化管理控制；就地控制层实现设备信息采集与本地自动控制。按照控制响应的的时间尺度不同，把分布式电源高渗透率微电网系统稳定控制划分为以下四个不同的时间尺度。

1) 0~50 ms 的快速功率调节及运行控制，由具备调节功能、适用于微电网应用场景的微电网内部各电力电子装置自身完成控制。

2) 20~100 ms 的微电网暂态稳定控制，由微电网内部保护、并网点保护、电源点保护装置完成，实现微电网故障的快速识别与隔离，保证故障切除后的剩余部分微电网可以快速恢复稳定运行。

3) 100~500 ms 的微电网动态稳定控制，采用大电网中的稳定控制理念，由微电网动态稳定控制装置实现微电网频率、电压分区稳定控制。

4) 1 s~1 min 的微电网稳态稳定控制，由微电网能量管理系统根据系统运行采集信息及上层调度信息，完成微电网内部多源互补经济优化调度、交换功率控制、离网能量平衡控制、黑启动控制等功能。

### 2 微电网内电力电子单元快速稳定控制技术

微电网内各电力电子单元控制包括分布式电源控制、储能调节控制、柔性负荷调度与控制，其共同构成了不依赖于通信手段的微电网源网荷储快速自协调稳定控制，是分布式电源高渗透率微电网系统稳定控制的重要一环，其有效发挥作用，可以有效提高分布式电源的利用效率，减小微电网后续稳定控制的压力，提高微电网系统的稳定、高效、协调、经济运行水平。

#### 2.1 分布式电源电力电子单元快速稳定控制技术

分布式电源电力电子单元参与微电网快速稳定控制手段主要包括 DG 自动电压控制、新型 MPPT

跟踪技术、分布式电源自同步并网检测技术、虚拟同步发电机技术等。

### 2.1.1 DG 自动电压控制技术

DG 无约束接入会对配电网电压造成电压偏差和波动, 甚至可能会造成分布式电源脱网。DG 自动电压控制技术是一种基于最大发电量渗透率特性的随机性电源自调节技术。DG 逆变器采用基于 P-U 下垂调节方法来抑制过电压, 改善因大量分布式电源高渗透率接入造成的配电网电压偏差问题。

图 3 中横轴为公共连接点电压, 纵轴为分布式电源有功功率限值, 区间①内进行 MPPT 跟踪, 区间②内停止 MPPT 跟踪, 区间③表示 P-U 下垂分段调节。对于不同的电压偏差水平, 采用不同的电压 P-U 下垂系数。下垂系数取值不宜过大也不宜过小, 取值过大, 则光伏 DG 出力变化大, 能量损失多, 系统稳定性受到影响; 若取值过小, 则调节速度过慢, 逆变器可能在标准要求的异常电压响应时间内不能及时将电压调节到正常范围而导致逆变器保护停机。因此下垂系数的取值可以通过仿真研究确定其合理取值。

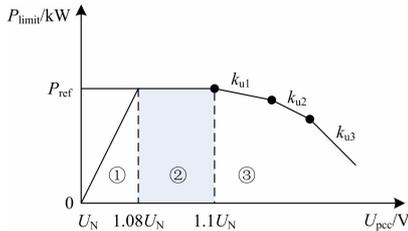


图 3 DG 逆变器 P-U 下垂控制

Fig. 3 DG inverter P-U droop control

### 2.1.2 新型 MPPT 跟踪技术

光伏阵列由光伏模块串并联连接组成。串联连接时, 光伏模块一般并联旁路二极管以防止热斑效应, 串联后经过防逆流二极管并联。光强均匀分布时 P-V 特性曲线上只有一个最大功率点。但光强不均匀、局部遮挡或者光伏组件特性不一致时, 由于旁路二极管和防逆流二极管的存在使得 P-V 曲线呈现多极值的特性, 如图 4 所示。

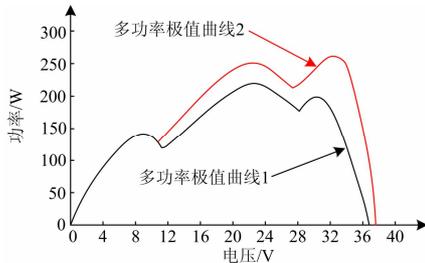


图 4 光伏组件多功率极致现象

Fig. 4 PV module multi power extreme phenomenon

研究可以辨识和补偿环境变化带来功率变化的新型 MPPT 功率跟踪算法, 解决传统 MPPT 跟踪控制算法中存在的问题, 解决光伏电池局部被遮挡或特性不一致带来的多功率极值功率跟踪问题, 提升分布式电源的发电效率, 节省度电成本, 提高其经济性, 促进分布式电源投资建设。

该技术可以实现分布式电源功率的最大化输出, 并且每个光伏组串都可以实现快速高精度功率跟踪, 配合上节的自动电压控制技术, 在负荷需要时最大限度满足负荷需求, 在微电网系统有功功率剩余时, 可以有效快速停止 MPPT 跟踪, 维持系统电压稳定。

### 2.1.3 微电网自同步并网检测技术

微电网离网运行时, 主电源工作在 V/f 控制模式下, 输出稳定的电压和频率为微电网中其他分布式电源提供电压和频率参考。在收到离网转并网运行命令, 或者自动检测到外电网电压恢复, 需要自动离网转并网运行时, 由于微电网侧和系统侧的电压幅值、相位存在差异, 如果直接并网会产生较大的冲击。另外, 不采用自同步控制逼近, 两侧频率可能保持相对无差的运行状态, 这样经过较长时间也无法满足同期并网条件, 造成同期并网失败。

采用微电网自同步并网检测技术, 在收到微电网离网转并网运行指令后, 根据实时检测到的微电网侧相位和大电网侧相位, 计算其相位差, 如果相位差满足要求则随时可以进行并网合闸操作, 否则如果微电网侧相位超前大电网侧电压相位, 则减小微电网侧电压相位, 反之加大微电网侧电压相位, 使得两者之间的相位差逐步逼近, 直至最终满足同期并网所要求的相位差, 如图 5 所示。

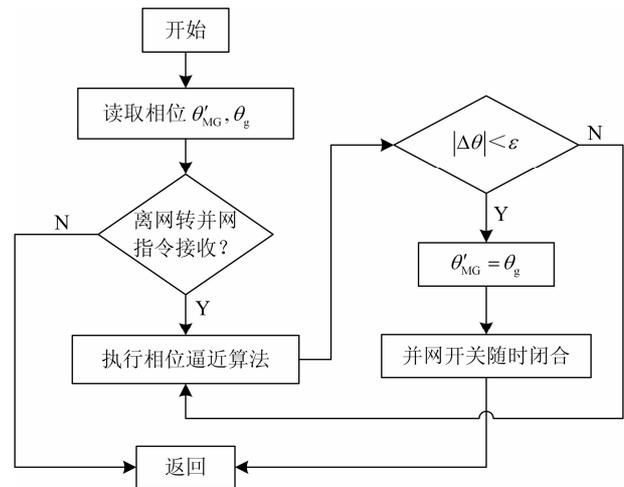


图 5 自同步并网相位逼近流程图

Fig. 5 Flow chart of self synchronous grid connected

相位逐步逼近修订算法所采用的公式为

$$\begin{cases} \theta'_{MG} = \theta_{MG} - \text{step} \cdot \text{sign} \\ \theta_{MG} = \theta'_{MG} \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\text{sign} = \begin{cases} 1, & \Delta\theta > 0 \\ -1, & \Delta\theta < 0 \\ 0, & \Delta\theta = 0 \end{cases} \quad (2)$$

收到离网转并网的指令后,利用电力电子设备的灵活性,采用幅值和相位逐步逼近的预同期并网技术,保证微电网离网转并网运行时的“零冲击”并网与微电网稳定控制。

#### 2.1.4 虚拟同步发电机技术

DG 并网一般采用并网逆变器,常规并网逆变器响应速度快,几乎没有转动惯量,难以参与电网调节,无法为含分布式电源的主动式配电网提供必要的电压和频率支撑。图 6 所示为微虚拟同步发电机控制示意图。

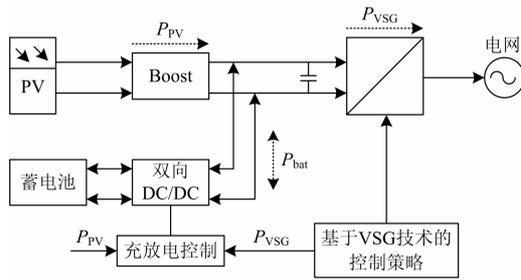


图 6 虚拟同步发电机控制示意图  
Fig. 6 Schematic control diagram of VSG

借助配备的储能环节,并采用适当的并网逆变器控制算法,使基于并网逆变器的分布式电源从外特性上模拟出同步发电机的频率及电压控制特性。

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

式中:  $J$  表示虚拟转动惯量;  $D$  表示虚拟阻尼系数;  $T_m$  表示负荷等效机械阻力矩;  $T_e$  表示分布式发电等效电磁力矩。

虚拟转动惯量  $J$  使得微电网的频率变化及功率波动趋于平缓,虚拟阻尼  $D$  使微电网系统在受外界干扰时的暂态过程缩短,使得分布式电源在电网的暂态过程中具有 VSG 特性,进而对电网稳定性做出贡献,从而改善分布式系统的稳定性。

#### 2.2 储能系统电力电子单元快速稳定控制技术

储能系统参与微电网快速稳定控制的调节手段主要包括分布式电源出力平滑控制、多储能主电源并联运行时的下垂控制,微电网突然离网时的储能

系统工作模式快速切换控制。

##### 2.2.1 分布式电源出力平滑控制技术

在因风光资源波动出现分布式发电出力波动时,可以通过快速调节储能系统充放电功率,来实现分布式发电功率波动的快速平抑,减少系统功率波动、频率波动及电压波动中的高频变化分量,并且维持系统频率在合格范围内。从而改善高渗透率微电网中的电能质量,提高分布式电源高渗透率微电网中用户的高质量可靠用电体验。

分布式电源的实时功率输出因天气原因会出现大范围频繁波动。采用类似于一阶惯性环节低通滤波原理,利用储能电力电子单元可以进行快速充放电调节的优势,来平抑分布式电源的大范围波动,使得由分布式电源和储能系统构成的微电网系统内其总功率波动相对平缓。

低通滤波控制平滑出力计算公式为

$$T \frac{\partial P_{out}}{\partial t} + P_{out} = P_{in} \quad (4)$$

式中:  $P_{in}$  为分布式电源的实时功率输出;  $P_{out}$  为经过一阶惯性环节滤波后分布式电源和储能系统的功率输出和;  $T$  为一阶惯性滤波环节时间常数,时间常数  $T$  参数选取需综合考虑微电网系统承受功率波动的水平,以及所配置的储能系统在充放电控制时对功率调节的响应能力。经过离散化后,可得到储能系统在分布式电源波动平抑过程中,需要实施调节的储能参考输出功率计算值如式(5)所示。

$$P_{sc} = \frac{T}{T+1} (P_{out}(k-1) - P_{in}(k)) \quad (5)$$

图 7 展示的是储能系统对分布式电源出力波动平抑后的微电网功率波动比较。

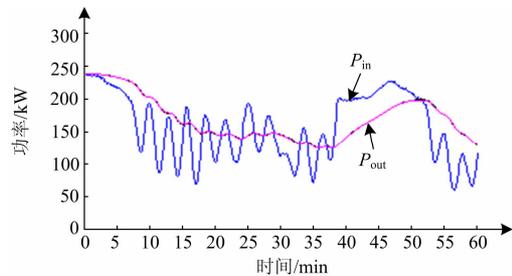


图 7 分布式电源出力平滑控制  
Fig. 7 DG output smoothing control

##### 2.2.2 储能 PCS 下垂控制技术

利用储能系统下垂控制特性,实现不依靠通信互联,根据就地信息自动调节自身出力来平抑负荷波动。考虑到下垂控制为有差控制,也可以采用下垂控制和倒下垂控制相结合的方案,下垂控制逆变

器作为主电源为微电网系统提供动态的频率和电压参考, 倒下垂控制逆变器可以通过调节出力, 维持系统频率、电压在合理区间内, 保证微电网运行能量自平衡及频率电压稳定控制, 实现微电网长期稳定离网运行。

在下垂控制策略中可以实时检测电池组的 SOC 状态及端电压, 根据储能 SOC 状态的大小自适应的改变频率调整系数, 采用多下垂斜率控制对储能进行功率调节, 这种控制方法可以兼顾储能的容量和微电网稳定控制的功率增减需求, 如图 8 所示。

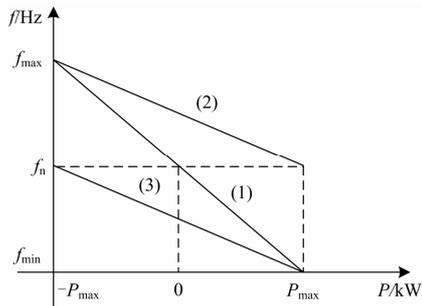


图 8 储能 PCS 多下垂系数 P-f 控制

Fig. 8 Multi-droop rate P-f control of PCS

### 2.2.3 储能 PCS 超高速工作模式切换技术

储能 PCS 通常具有 V/F 控制模式, 并网充电模式、并网放电模式, 下垂控制等多种模式, 在并网运行转换为离网主电源运行时, 以及离网主电源运行转为并网运行时需要进行工作模式切换, 其切换速度直接影响了微电网并网转换的时间, 快速切换工作模式可以有效缩短切换时间, 能够减少模式切换对微电网及电力电子器件带来的冲击, 保证储能 PCS 的良好运行, 增加其使用寿命。

### 2.3 柔性可控负荷快速稳定控制技术

柔性负荷参与微电网快速稳定控制手段指基于柔性负荷和需求侧响应虚拟储能控制。

需求侧响应作为一种新的灵活源, 近年来受到了学术界和工业界的重视, 需求侧响应中的直接负荷控制技术具备快速响应的特点, 配合具备储能特性的负荷(例如空调负荷蓄热蓄冷、电热水器蓄热、电动汽车蓄电等)参与供需平衡, 节省储能设备的建设成本。利用空调、热水器类柔性负荷能量转移时间跨度大、调整范围宽等优势, 实现微电网中富余功率的转移。研究柔性负荷、直接负荷控制虚拟储能技术, 依靠其虚拟储能容量消纳强随机性风、光新能源所发电量, 减少储能设备的配置, 降低成本提高配电系统经济性, 兼顾储能设备减少对用户的影响。在微电网功率出现缺口时, 减少或切除柔性负荷, 实现功率平衡, 通过柔性负荷的虚拟储能控

制, 可以有效降低微电网中固有储能容量的配置, 从而降低项目投资, 提高系统的经济性。

## 3 工程实践

图 9、图 10 分别为某海岛独立微电网项目工程实际主接线图以及控制保护系统网络架构图。

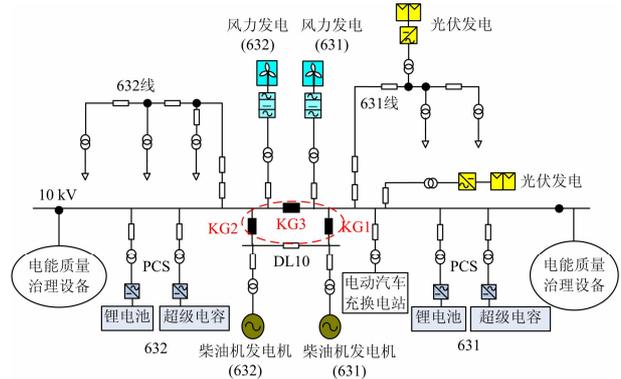


图 9 主接线示意图

Fig. 9 Main wiring diagram

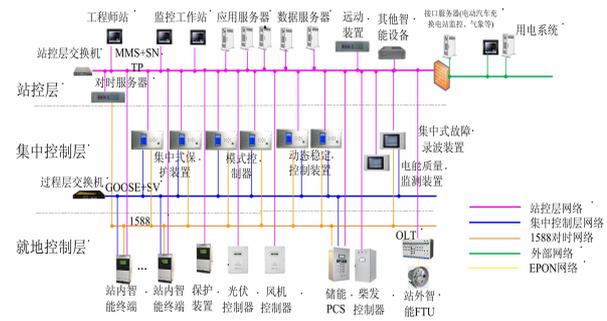


图 10 控制保护系统网络架构图

Fig. 10 Network diagram of control and protection system

该项目基于三层控制架构构建的微电网多态稳定控制体系可以有效地维持独立海岛系统的稳定。通过优化和完善微电网电力电子设备控制算法, 可以实现分布式清洁能源的最大化出力, 实现新能源出力波动的快速平抑; 风光柴储大微网运行模式时基于储能 PCS 下垂控制实现多储能主电源并列运行与电压自动控制; 通过自同步并网检测技术实现子微网分列运行到并列运行时的自动准同期控制。海岛微电网暂态稳定控制由基于网络化采样的双套集中式差动保护构成, 能够保证海岛微电网发生故障时快速定位与故障隔离。海岛微电网动态稳定控制由双套配置的动态稳定控制装置实时快速对电压、频率进行调整, 解决海岛微电网运行备用容量小, 可参与一次调整的调速器, 二次调整的调频器能力不够, 分布式电源与负荷波动对电网稳定威胁

大等问题；海岛微电网稳态稳定控制由微电网能量管理系统实现，解决海岛微电网系统容量小且含有大量不稳定的分布式电源，类型多样，其运行特征各异，需要统一协调控制与最优经济调度的问题。

#### 4 结语

本文从通过分析分布式电源高渗透率微电网系统的运行特点以及分布式电源高渗透率给微电网及配电网运行带来的问题，提出基于三层控制架构构建的多态多时间尺度微电网稳定性控制方法，研究了微电网内部电力电子单元自身的控制技术的进展与实现方法，分布式电源、储能系统、柔性负荷等一般通过电力电子装置接入微电网系统，通过挖掘电力电子单元在微电网稳定性控制方面的潜力，可以实现微电网内功率快速调节、扰动快速平抑、故障快速隔离、运行效率提高、稳定水平趋优等控制目标。

通过具体的工程实践验证了所提出方法的有效性和实用性，同时可以满足工程实践项目中对故障快速定位与隔离、实时快速电压、频率调整、微电网经济优化调度及多源协调控制的技术要求。

#### 参考文献

[1] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.  
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on micro-grid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.

[2] 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): 57-69.  
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-69.

[3] 庄慧敏, 巨辉, 肖建. 高渗透率逆变型分布式发电对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 84-89.  
ZHUANG Huimin, JU Hui, XIAO Jian. Impacts of inverter interfaced distributed generations with high penetration level on power system transient and voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 84-89.

[4] 杨湛晔, 马红伟, 毛建容, 等. 基于虚拟子微网的独立微电网快速稳定控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1907-1912.  
YANG Zhanye, MA Hongwei, MAO Jianrong, et al. Transient stability control strategy of island micro-grids based on virtual sub micro-grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1907-1912.

[5] 赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动

化, 2014, 38(7): 1-8.  
ZHAO Bo, XUE Meidong, CHEN Rongzhu, et al. An economic dispatch model for microgrid with renewable energy resource penetration considering forecast errors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 1-8.

[6] 李瑞生, 翟登辉. 光伏 DG 接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 62-68.  
LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Research on over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic source accessing to distribution network or microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 62-68.

[7] 王亚维. 高渗透率光伏发电系统中网源互动技术的研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2015.  
WANG Yawei. Research on interactive behavior between distributed PV generation system and distribution line with high penetration[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2015.

[8] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.  
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.

[9] 李达义, 秦毅, 康文杰. 高渗透率微网多功能电能质量控制器[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 103-109, 151.  
LI Dayi, QIN Yi, KONG Wenjie. Multifunctional power quality controller for microgrid with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 103-109, 151.

[10] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.  
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.

[11] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.  
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.

收稿日期: 2016-07-05

作者简介:

易永辉(1969-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为智能电网及智能微电网保护控制技术; E-mail: yyh6006@163.com

任志航(1973-), 男, 工程师, 从事保护自动化系统设计工作;

马红伟(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事微电网及分布式发电接入研究. E-mail: mahongwei.xjgc@qq.com

(编辑 葛艳娜)