

# 含多微网的配电网协调运行控制体系构建

韦 磊<sup>1, 2</sup>, 陈星莺<sup>2</sup>, 朱 红<sup>1</sup>, 赵新建<sup>1</sup>

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2. 河海大学, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 本文基于微电网运行控制基础理论, 分析多微电网网络结构, 提出了基于戴维南等效的电压稳定裕度孤岛划分方式, 基于 MGCC、MC、GC、LC 等控制器的含有多微网的配电网协调控制体系, 为含有多微网的配电网协调控制和优化运行提供支撑。

**关键词:** 多微网; 协调运行; 控制

## 0 引言

微电网作为一种分布式电源与多样性负荷在电网中灵活的构成和运行方式, 能够在最大化分布式能源接入率的同时, 作为电网与分布式电源的中间层, 通过有效的微网管理逻辑及配网与微网的协调控制体系, 弱化甚至消除分布式电源接入对电网运行的风险, 充分发挥微网接入下电网灵活高效运行的技术优势。作为智能配电网系统中重要的构成元件, 微网成为并网消纳和管理分布式电源的重要途径。满足分布式电源在配电网中的大规模接入, 含多微网的智能配电网优化调度问题近年来已成为电力系统研究的热点。

本文在典型配电网网络结构下, 分析含多微网的配电网典型运行模式, 提出了含多微网的配电网区域划分方法及适合推广的配电网中多微网协调运行控制模式, 在仿真验证基础上, 提出支撑含多微网的智能配电网协调控制体系。

## 1 微电网运行状态与控制模式

微电网通过一个公共连接点 (PCC) 与配电网相连, 公共连接点设置静态开关, 切换微网运行状态, 微网内单元通过电力电子接口 (PEI) 接入微网母线。微电网运行分为并网运行及离网 (孤岛) 运行两种状态。微网内分布式电源 (DG) 主要包括光伏发电、风力发电以及燃机发电三种形式。DG 一般直接接在用户端, 减少输送损失, 具体接入微网接入点标准参照 IEEE1547-2003 及《分布式电源接入系统典型设计》。微网内 DG 的运行受微源控制器的控制, 其主要运行方式有 PQ、VF 和下垂控制三种。微网运行模式包括并网运行、

孤网运行、并网切换至孤网以及孤网切换至并网, 模式切换逻辑如图1所示。

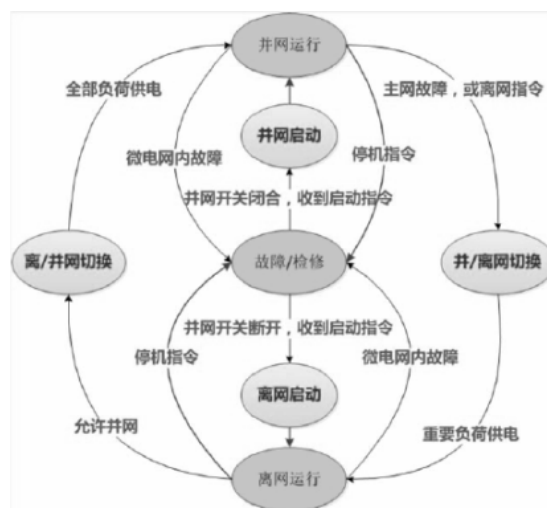


图1 微网运行模式切换逻辑图

当微网和配网都无故障, 电能质量符合要求时, 并网开关导通, 微网并入主网。网分布式电源运行在PQ控制模式。当主网发生故障、电能质量不符合要求或微网检修时, 并网开关与主网解列, 微网切换到孤网运行模式。电网中某一区域与配网断开后, 区域内的分布式电源仍会给负荷供电, 形成“孤岛”。微网从并网模式切换到孤网模式分为被迫断网与主动断网。被迫断网时, 首先检测到孤岛效应或电网故障, 微网发出断网请求, 然后各个控制器响应, 调整控制器工作模式, 使得微网能保证内部电压和频率在设定值允许误差范围内; 主动断网时, 控制器首先调节微网功率负荷平衡, 尽量减小与电网的潮流交换, 然后在PCC在电流过零点断开并网开关。微网从孤岛模式向并网模式的切换是一个检同期合闸的过

程，为了减小冲击电流，需要调节微网电压以满足并网要求。

2 多微网网络结构

微网网络拓扑的设计需要考虑内部的电气接线网络结构、分布式电源和负荷类型位置、微网并网接口形式等重要信息。如表1所示。

表1 微网典型结构模式设计要素

基本要素	具体因素	对微网结构的影响
地理特点	1.地理位置	网架类型，网架中 DG 接口种类、数量、位置、微网规模、发电能力、微网运行方式的限制
	2.气象特点	
配电网	1.配电网网架	网架与配电网公共连接点位置，微网中分布式电源渗透率，微网运行方式的限制
	2.配电网容量	
	3.配电网保护	
DG	1.DG 类型	网架类型，网架中 DG 接口种类，单元微网网架结构
	2.DG 容量	
	3.DG 发电特性	
	1.负荷容量	
负荷	2.负荷增长速度	网架类型，网架中 DG 位置，单元微网网架结构，辅助电源接入
	3.对电能质量要求	
	4.对供电可靠性要求	
运行方式	1.并网运行	并网、孤岛控制策略，计划孤岛网架结构
	2.孤岛运行	
	3.两种方式间切换	
技术能力	1.能量管理	网架类型，微网网架复杂程度
	2.微网控制	
其他	1.投资	微网规模，技术实现
	2.运行及维护	

从微网网络拓扑结构来看，微网之间可能存在并联、串联以及嵌套的关系，如图2所示。并联微电网在馈线上横向分布分布式电源和负荷，母线通过公共连接点处静态开关与配网变压器相连，微电网的构建和扩容比较容易；串联式微电网则是将微电网中所有微源与负荷均接入一条馈线上，馈线始端接至微电网母线，适用于在一个负荷点含有多个微电网的场合；嵌套微电网表示某微网内部仍然包含一个或多个微电网结构，其结构更有层次，大多为中压或高压微电网。

图 3 为IEEE Std 1547.4<sup>TM</sup>标准中的广义微电网典型结构图，其将广义微网的典型结构扩展到配电网中，在典型配网支路中根据接入容量和构成方式的不同，定义了包括用户微电网、次级微电网、分支线微电网、配电线微电网、变电站母线微电网、变电站微电网、相邻配电线微电网等七种微网，具有多微网串并联及嵌套的各种互联关系。

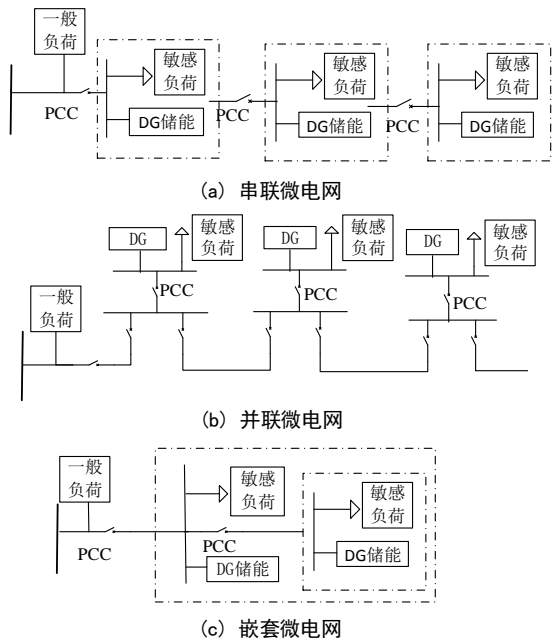


图2 微网典型结构

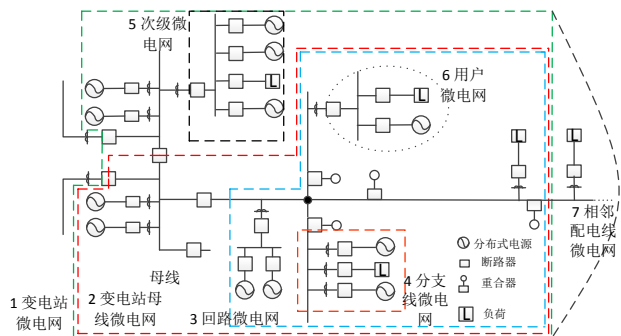


图 3 IEEE 多微网典型结构

3 配电网中的多微网区域划分

由于多微网中分布式电源具有位置分散、随机波动等特点，微网管控方式具有自主随机性，配电网由此从辐射网络变为具有双向潮流特点的多区域互联网络、从单纯的配电系统转换为电力交换系统。高渗透率微网接入对配电网电压、网络损耗、电能质量及继电保护配合产生了一定的影响。为抑制多微网接入对配电网的负面影响，含有多微网的智能配电网可从最小化分布式电源随机接入对配电网电压稳定性影响的角度，通过合理的微网区域划分，形成配电网中多个具有供电保障与供电恢复控制能力的微电网。

传统基于电气距离的孤岛划分方式没有特别考虑电压稳定性，即便电气耦合连接度与电网关键节点有高度的关联程度，但识别出的脆弱节点不仅包含电压不稳定性还包含了功角不稳定性，

本文采用基于戴维南等效的静态电压稳定裕度划分策略优化，流程如图4所示。

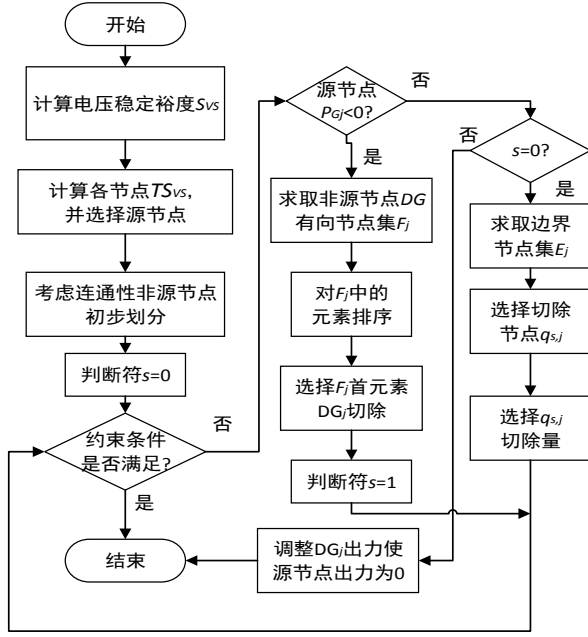


图4 多微网区域划分流程图

首先建立戴维南等效的静态电压稳定裕度指标 $S_{VS}$ ，将网络中含有分布式电源的节点 $i$ 等效为电压源，计算任意 $j$ 节点( $i \neq j$ )相对 $i$ 节点的 $S_{VS}(i,j)$ 。选择源节点，计算 $TS_{VS}(j)$ ，再将 $TS_{VS}(j)$ 进行大小排序，根据大容量DG数目和网络拓扑结构选择源节点数目，再在大容量DG集合中选择 $TS_{VS}(j)$ 大的节点作为源节点。非源节点比较其在不同源节点下的 $S_{VS}$ ，在保证网络连通的前提下选择 $S_{VS}$ 大的源节点。基于电压稳定裕度的孤岛初步划分步骤将源节点视为理想电压源。实际情况中，为满足功率平衡、电压和DG出力上下线约束，需要在原有孤岛划分的基础上适当切除负荷、切除DG或减小DG

出力。

首先确定需要确定功率平衡的源节点集合 $S_{pf}$ 。在不考虑功率平衡的情况下，得出孤岛中源节点的有功出力若超过额定值则执行切负荷策略，若有功出力小于0则执行切DG策略。切负荷过程中，对于每个源节点 $j \in S_{pf}$ 所对应的孤网节点集合令为 $G_j$ 。视源节点 $j$ 为 $G_j$ 的中心节点，从中心向外扩展可得边界节点集 $E_j$ ，对 $E_j$ 进行排序（任意节点 $q \in E_j$ ，优先选择 $S_{VS}(q,j)$ 小的节点 $q_{s,j}$ ），若节点 $q_{s,j}$ 负荷能够部分切除，则从最小部分切除，检验切除后源节点 $j$ 出力是否满足约束，若仍不满足则逐步增大负荷切除量直到切除负荷整体；否则直接切除节点全部负荷。切DG过程中，对于每个源节点 $j \in S_{pf}$ 所对应的孤网节点集合为 $G_j$ ，视源节点 $j$ 为 $G_j$ 的中心节点，其余含DG的节点组成有向节点集 $F_j$ 。对这些 $F_j$ 进行排序（首先根据 $F_j$ 所对应的DG可变成本从大至小排序，大值排列在首，小值排列在尾），按照 $F_j$ 从首至尾的顺序依次切除相应节点的DG，直至源节点 $j$ 不再从微电网吸收能量。调整最后一个切除的DG出力，使得源节点 $j$ 出力恰好为0。

基于MATPOWER平台对CIGRE中压网络算例进行仿真。图5、图6仿真结果表明基于电压稳定裕度的划分方式能更灵活地应对负荷量的改变，在大负荷水平下，孤网电压稳定性明显好于基于电气距离划分方法的结果，多级负荷水平下，能更多地保留负荷。

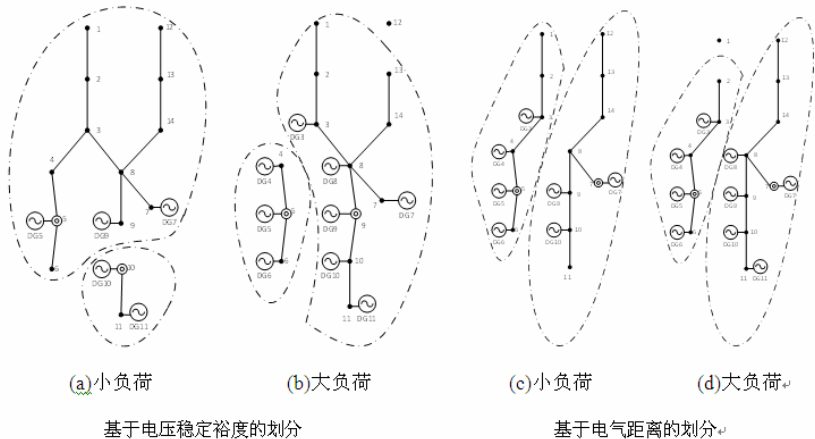


图5 不同负荷划分结果对比图

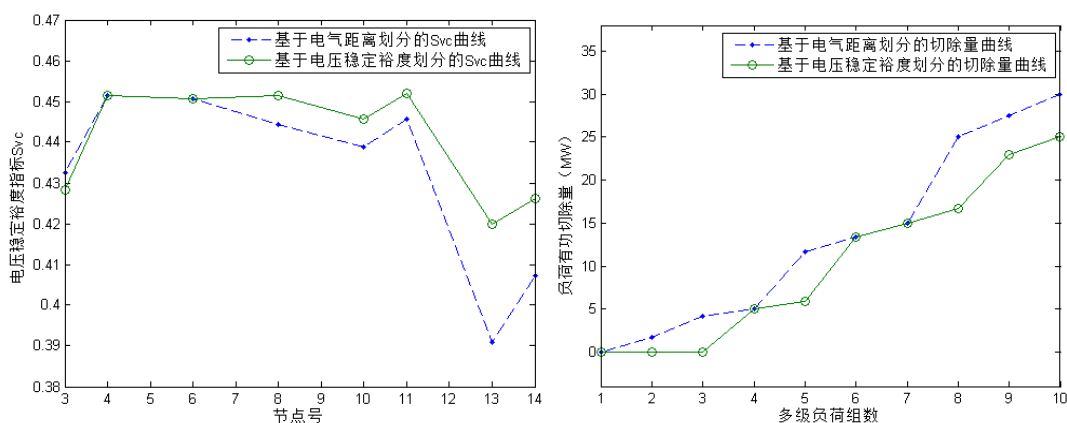


图6 大负荷水平电压稳定裕度及多级负荷有功负荷切除量对比

#### 4 多微网接入配网的协调控制体系

目前微网广泛采用研究的控制模式主要有集中式控制、主从控制、分布式控制和综合协调控制四种控制模式。

集中控制模式需要一套基于高速通信系统分层分布式控制系统,各个分布式电源采用就地控制器,将分布式电源系统接入点的运行信息上送至集中控制器中,集中控制器对整个微电网进行统一分析后将调整结果下发到就地控制器,就地控制器完成设定控制,使得整个微电网系统安全运行。

当检测单元检测到孤岛、电网主动从配电网断开进入孤岛运行模式时,微电网控制切换到主从模式,通过调整 DG 的出力来达到功率平衡。当微电网负载变化时,由主电源根据负荷变化调节输出电流;根据现有发电单元可用容量调节从属电源的设定值。当电网中无可调用的有功或无功容量时,根据负荷的电压依赖特性,适当减小电压值;如果仍然不能实现功率平衡,采取切负荷的措施来维持微电网运行。

分布式控制也叫分散控制,是指系统中的控制部分表现为若干个分散的,有一定相对独立性的子控制机构,各自完成自己的目标。

综合协调控制即综合集中控制和分散控制的特点,采用分层控制的结构,将微网按照分散控制的原则,分成若干部分,各个部分都有控制器进行控制,但控制器之间存在层次划分和通讯连接,其受控于上层控制器,也向下层控制器传达控制指令。

本文采用基于本地运行状态转换的微网协调控

制策略实现对多微网的协同控制,基于多微网中央控制器(MGCC)、微网控制器(MC)、微源控制器(GC)和负荷控制器(LC)的多层控制系统构建协同控制体系。该控制策略以多微网系统各层级允许出现的有效运行状态为基础,依据当前状态和触发事件识别多微网运行模式,并针对多微网系统的功率平衡、并网和孤岛运行等的运行状态及状态切换控制目标,实现多微网集中控制器及单个并网控制器之间的协调控制策略。该体系在单一控制器出现故障时,其余控制器也能根据本地运行状态实现本地运行状态控制,具有分散控制的特点;同时各个控制器之间存在通讯功能,本地控制器也受上层控制器的制约控制,也具有部分集中控制的特点。该协同控制体系,其控制器结构如图7所示。

主微网通过安装在并网点 MGCC 与配电网连接, MGCC 利用通讯线路采集下层控制器以及邻近主微网 MGCC 的信息,然后经分析计算确定微网需要调整功率或运行状态等信息,将状态信息传达给下层控制器,并控制开关元件实现微网运行状态转换。

主微网中可能存在多个 MC,主要位于子微网与微网连接处, MC 接受来自上层 MGCC 或者 MC 的控制信息,根据本地运行状态控制本地子微网功率、开关元件等。

GC 位于分布式电源并网点, GC 可根据本地 DG 状态以及接受到的上层信号,调整本地 DG 出力,如 DG 故障,其可直接切断 DG,再将信号上发给上层控制器。

LC 位于负荷与微网连接处,接收来自上层控制器的控制指令、功率指令以及开关指令等,采

集负荷当前状态及运行信息，并根据本地运行状态调整本地负荷响应。

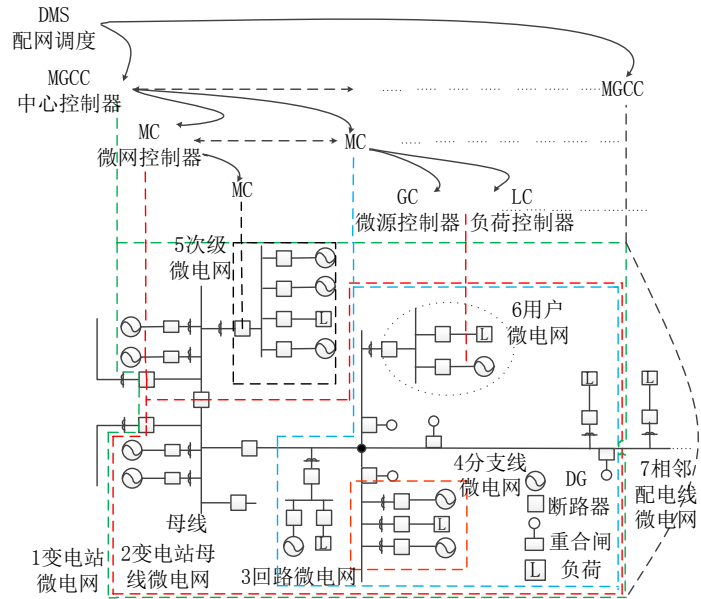


图7 配电网中多微网分层结构及控制器类型

在前述微网基本运行状态基础上，根据微网内子微网的并离网情况，以及微网内分布式电源特性将微网运行状态分为 11 种，在各运行状态以及转换情况如图 8 所示，图 8 中状态转换触发事件如表 2 所示，各运行状态所对应的各控制器控制方法，如表 3 所示。

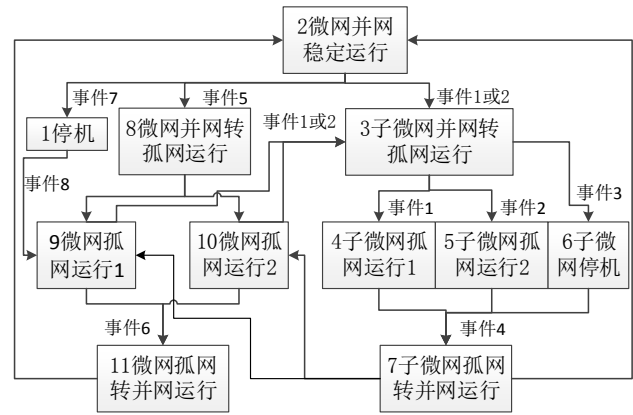


图8 多微网运行状态转换关系

表2 多微网运行状态转换触发事件

标号	事件
1	子微网短期故障且其分布式电源间歇性电源相对较多
2	子微网短期故障且分布式电源间歇性电源相对较少
3	子微网故障且微网分布式电源不能维持该子微网持续稳定运行
4	子微网恢复正常
5	配电网故障且储能装置电能充足
6	配电网恢复正常
7	配电网故障且储能装置电能不足或故障
8	储能装置恢复运行

表3 多微网运行状态表

序号	MGCC	MC	LC	主控制 GC	从控制 GC	运行状态
1	停运	停运	停运	停运	停运	停运
2	PQ	PQ	0/1	PQ	PQ	并网稳定运行
3	PQ	并网转孤岛	0/1	VF	PQ	子微网并网转孤岛运行
4	PQ	VF	0/1	VF	PQ	子微网孤岛运行 1
5	PQ	droop	0/1	droop	二次调频	子微网孤岛运行 2
6	PQ	停运	停运	停运	停运	子微网孤岛运行 3
7	PQ	孤岛转并网	0/1	VF	VF	子微网孤岛转并网运行
8	并网转孤岛	PQ	0/1	PQ	PQ	微网并网转孤岛运行
9	VF	VF	0/1	VF	PQ	微网孤岛运行 1
10	droop	droop	0/1	droop	二次调频	微网孤岛运行 2
11	孤岛转并网	VF	0/1	VF	PQ	微网孤岛转并网运行

## 5 结束语

随着分布式电源等清洁能源以微网型式接入配网，实现含多微网的配电网源网荷的协调控制是当前智能配电网运行研究的热点。本文基于微网基本运行控制理论，利用多微网的灵活性为配电网提供分区域管理及孤岛运行方式，提出了基于戴维南等效的电压稳定裕度孤岛划分方式，介绍了基于 MGCC、MC、GC、LC 等控制器的含有多微网的配电网协调控制体系，以多微网系统各层级允许出现的有效运行状态为基础，依据其当前状态和触发事件识别多微网运行状态的转



换,并针对多微网系统的功率平衡、并网和孤岛运行等的运行状态及状态切换控制目标,提出多微网集中控制器及单个并网控制器之间的协调控制方法,为多微网大规模并网运行提供可行的控制体系支撑。

#### 参考文献:

- [1] IEEE Standards Association. IEEE std 1547.4-2011,IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems[J] New York:IEEE,2011.
- [2] FAN Li, WEI Lei .A Hierarchical Control Strategy of Multi-microgrids[J].ICSMIM 2014,Applied Mechanics and Materials.
- [3] LEI Zhengxin , WEI Lei.A Novel Island Partitioning Strategy of Multi-Microgrids Based on Voltage Stability Margin [J].IFAAEE 2014 Advanced Materials Research.
- [4] 周念成,金明,王树钢,等.串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略 [J].电力系统自动化,2013,37(12):13-18.
- [5] 易新,陆玉平.分布式发电条件下的配带你忘孤岛划分算法 [J].电网技术,2006,30(7):50-54.

- [6] 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):7-8.
- [7] 朱红,韦磊,史豪杰,等.分布式电源接入对配电网损耗影响分析[J].江苏电机工程,2014(S2):4-6.
- [8] 朱红,韦磊,蔡敏,等.风力发电对配电网电压波动性的影响研究[J].江苏电机工程,2014(S2):10-12.

---

#### 作者简介:

韦 磊 (1982-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统自动化、电力系统通信及智能电网方向研究;

陈星莺 (1964-), 女, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统经济运行分析与控制、电力市与电力经济、可再生能源发电系统的运行分析与控制;

朱 红 (1971-), 女, 江苏南京人, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统经济运行分析与控制、电力信息通信、可再生能源发电系统的运行分析与控制;

赵新建 (1987-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 主要研究方向: 计算机通信与网络。