

# 配置 DSTATCOM 的微网无功电压联合控制系统<sup>①</sup>

康 珍<sup>1</sup>, 罗 安<sup>1</sup>, 吕志鹏<sup>1</sup>, 蒋雯倩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

<sup>2</sup>(广西电力科学研究院, 南宁 530023)

**摘要:** 提出一种由静止同步补偿器 (DSTATCOM) 和微网构成的无功电压联合控制系统。在该系统中, 微网作为离散子系统提供较大容量的分级无功功率, 较小容量的 DSTATCOM 作为连续子系统, 进行快速连续无功调节, 二者协同工作实现无功电压的迅速调整。仿真结果表明, 该联合控制系统能较好的平抑电压波动, 进一步提高了供电质量, 降低了原有电力装置的容量, 同时微网无功功率能够实时调度, DSTATCOM 则增加了微网的生存能力, 使分布式发电在供能的同时发挥了电能质量调节的作用。

**关键词:** 静止同步补偿器; 微网; 配电网; 无功补偿

## Reactive Voltage Collaborative Control System Consisting of DSTATCOM and Micro-Grid

KANG Zhen<sup>1</sup>, LUO An<sup>1</sup>, LV Zhi-Peng<sup>1</sup>, JIANG Wen-Qian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

<sup>2</sup>(Guangxi Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract:** A reactive voltage collaborative control system consisting of DSTATCOM and micro-grid is proposed. In this system, small-capacity DSTATCOM as a continuous subsystem for rapid continuous reactive power regulation and micro-grid as discrete subsystem to provide large-capacity graded reactive power. Rapid adjustment of reactive power is realized by their collaborative work. Simulation shows that combined running system could effectively suppress voltage fluctuation. Power supply quality is further improved and original power devices capacity is decreased. At the same time, micro-grid reactive power can be real time scheduled. Micro-grid takes responsibility to regulate power quality, not only provide power supply. It could be more easily accepted by distribution network.

**Key words:** static synchronous compensator; micro-grid; distribution network; reactive power compensation

微网作为配电网重要的辅助系统, 其主要功能是通过储能装置以及全局控制器解决单个微源间歇性不稳定性的弊端, 使多个微源以整体可调度的方式并入配电网, 具有装机灵活、有功功率和无功功率分别可调、功率响应积极等优点<sup>[1-3]</sup>。但由于微网内分布式电源逆变电路和控制电路的钳制作用以及储能装置难以迅速响应, 当电网发生扰动时, 微网不能提供瞬间的电压支撑, 降低了电能质量, 使得无功补偿装置的装设十分必要。DSTATCOM 是一种重要的电力装置<sup>[4]</sup>, 能连续动态输出无功, 使补偿点始终保持高的功率因

素, 同时还能起到电压支撑作用, 但其成本高, 难以做到大容量运用。综合两者的优缺点, 针对配置 DSTATCOM 的微网系统, 考虑微网具备一定的无功储备, 可以作为配网中的无功补偿节点来进行调度, 提出一种 DSTATCOM 与微网联合运行的无功电压协同控制系统。该系统由小容量的 DSTATCOM 和较大容量的微网构成。DSTATCOM 可实现连续快速的无功调节, 微网实现分级的无功调节。同时, 系统采用了基于专家决策的混杂控制方法, 使微网承担更多的责任并进一步提高了供电质量。

① 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB219706); 国家自然科学基金青年基金(50907017, 50907019)

收稿时间: 2011-02-16; 收到修改稿时间: 2011-03-28

### 1 联合系统拓扑结构及原理

本文提出的由 DSTATCOM 和微网联合运行的无功电压协同控制系统的拓扑结构如图 1 所示。

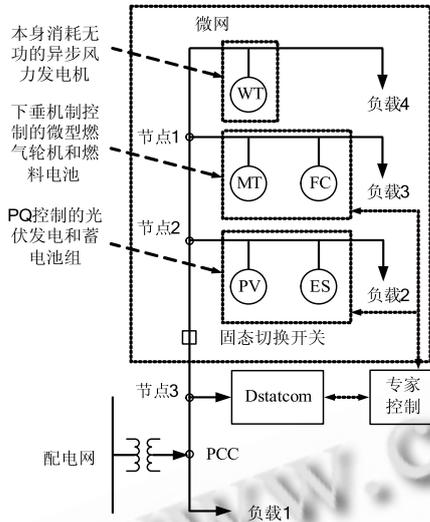


图 1 联合系统拓扑结构图

如图 1 所示，较小容量的 DSTATCOM 挂接于微网与配网的公共连接点处。DSTATCOM 提供较小容量的感性无功和容性无功，并能抑制电网电压跌落和电压波动，是联合系统的连续子系统；在不超过微网额定出力前提下，可通过调度使微网提供较大容量的无功功率，为控制方便，给微网设定提供的无功功率是分级的，是联合系统的离散子系统。

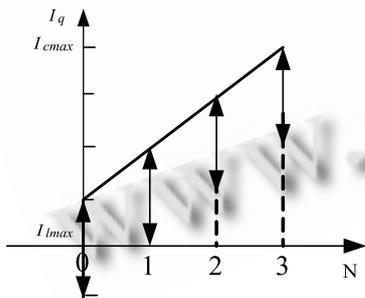


图 2 联合系统补偿容量原理图

联合系统的无功补偿容量原理如图 2 所示。图中纵坐标表示补偿无功电流，其中正轴表示容性电流，负轴表示感性电流；横坐标表示联合系统调度微网所投无功量的级数。从图中可直观看出，联合系统能够实现无功的连续补偿，当微网调度的分级的无功功率随所需补偿无功功率有效变化的情况下，联合系统可

以做到在最大容性无功  $I_{cmax}$  和最大感性无功  $I_{lmax}$  之间连续可调。微网提供的分级的无功进行无功粗调，无级的 DSTATCOM 进行无功精调，当系统无功需求在 n 级和 n+1 级之间时，按 n 级无功功率调度微网，再由 DSTATCOM 补偿小容量无功，达到无级连续无功补偿的目的。虽然感性无功功率小于容性无功功率，但由于配电网对于感性无功的要求补偿容量往往比较小，所以系统能够满足工程实际的要求。

### 2 联合系统控制方法

对于该协同控制系统来说，相对于单独的微网和 DSTATCOM，既含有连续子系统，同时包含离散子系统，因此它是一个混杂控制系统，跟传统的补偿设备相比，控制相对较为复杂。这主要体现在微网进行的是分级的无功补偿，而 DSTATCOM 进行的是连续的无功补偿。同时微网和 DSTATCOM 的相应时间也不相同，当它们单独工作时，它们也将相互影响，并对两者的动态性能带来影响，因此如何协调其连续子系统 DSTATCOM 和离散子系统微网，保证装置正常运行，并使得系统补偿容量最大的同时还具有快的响应速度是该联合控制系统的重点和难点。为了成功解决此控制难点，提出了基于专家决策的混杂控制方法，它利用决策信息，能较好的协调两者之间的运行，使其具有良好的控制效果。

#### 2.1 联合系统的总体控制框图

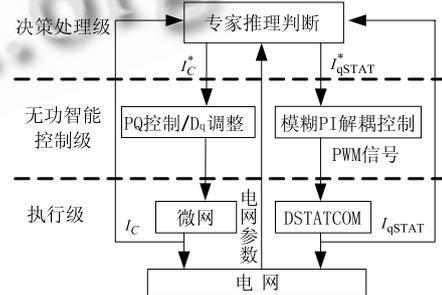


图 3 联合系统控制系统结构图

联合系统控制结构如图 3 所示，整个系统分成三层：执行级、无功智能控制级和决策处理级。专家推理作为系统的决策处理级，对系统的正常工作起决定性作用，它根据搜集到的信息进行专家推理为下一层提供相关的指令；无功智能控制级根据决策处理级提供的信息，完成对 DSTATCOM 和微网的控制，微网

和 DSTATCOM 的主电路构成执行级，输出补偿电流。

联合系统的控制策略是，先检测出电网中需补偿的无功量，经决策处理级专家控制器推理判断，确定微网提供分级无功容量及 DSTATCOM 补偿容量。其中 DSTATCOM 由模糊 PI 解耦控制器产生 PWM 信号给执行级的电压型逆变器，而微网控制器则采用 PQ 控制策略及调整下垂控制器系数决定投入的无功量。

## 2.2 决策处理级专家控制器

决策处理级位于控制系统的最上层，先确定微网投入分级的无功量，再计算 DSTATCOM 期望输出电流。假设在微网额定出力和功率因数限制条件下，微网共有  $m$  级无功功率可供调度，某时刻已投的无功量对应的级数  $n$ ，而该时刻微网投入无功级数的参考值为  $k$ ，还应投入无功量级数为  $p$ ，参数正负分别代表级数增减。专家推理判断的规则如下：

规则 1：如果  $\left| \frac{2k+1}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2(k+1)}{2} I_C \right|$  并且  $k+1 \leq m-n$  并且  $I_{qSTAT} > 0$  得  $p = k+1$ ；

规则 2：如果  $\left| \frac{2k+1}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2(k+1)}{2} I_C \right|$  并且  $k+1 > m-n$  并且  $I_{qSTAT} > 0$  得  $p = m-n$ ；

规则 3：如果  $\left| \frac{2k+1}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2(k+1)}{2} I_C \right|$  并且  $k+1 \leq n$  并且  $I_{qSTAT} < 0$  得  $p = -(k+1)$ ；

规则 4：如果  $\left| \frac{2k+1}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2(k+1)}{2} I_C \right|$  并且  $k+1 > n$  并且  $I_{qSTAT} < 0$  得  $p = -n$ ；

规则 5：如果  $\left| \frac{2k}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2k+1}{2} I_C \right|$  并且  $k \leq m-n$  并且  $I_{qSTAT} > 0$  得  $p = k$ ；

规则 6：如果  $\left| \frac{2k}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2k+1}{2} I_C \right|$  并且  $k > m-n$  并且  $I_{qSTAT} > 0$  得  $p = m-n$ ；

规则 7：如果  $\left| \frac{2k}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2k+1}{2} I_C \right|$  并且  $k \leq n$  并且  $I_{qSTAT} < 0$  得  $p = -k$ ；

规则 8：如果  $\left| \frac{2k}{2} I_C \right| < I_{qSTAT} < \left| \frac{2k+1}{2} I_C \right|$  并且  $k > n$  并且  $I_{qSTAT} < 0$  得  $p = -n$ 。

其中， $I_C$  表示微网提供的无功电流， $I_{qSTAT}$  表示 DSTATCOM 的实时无功电流，其正负分别代表容性和感性。

## 2.3 无功智能控制级决策

无功智能控制级由微网控制器和模糊 PI 控制器构成。微网控制器接受决策处理级发出的期望无功功率指令来对微网出力做出相应调整。模糊 PI 控制器可根据决策处理级发出的指令信息使 DSTATCOM 发出期望的无功电流。

对微网的控制实质上是对微源的控制。微网包含光伏发电、风力发电、燃料电池、微型燃气轮机、以及蓄电池等能源形式。微网中有些微源如异步风力发电机需要吸收无功功率建立磁场，故其是无功负载，除这类微源外，采取功率控制或下垂控制的微源可作为无功源来调度。控制策略也有区别，PQ 控制可实现功率的最大追踪或恒功率控制，常用在光伏和风力发电控制中；而微型燃气轮机通常采用具有下垂特性的发电机转速控制，励磁调节系统控制机端电压，作为微网独立运行时功率调节单元；燃料电池和蓄电池等直流侧稳定的能源形式主要采用 V/f 下垂控制，根据频率偏差调节输出的有功，根据电压偏差调节无功功率的输出<sup>[5,6]</sup>，在微网稳定运行时也可采用 PQ 控制。

本文的专家控制在动态调节过程中就已经计算微网所承担的稳态无功容量。控制器可根据决策处理级发出的指令信息使 DSTATCOM 发出期望的无功电流。此种控制策略下，DSTATCOM 可配合联合系统指令与微网进行精细无功补偿稳定配网电压，消弱因微网功率分发、冲击负荷等带来的电能质量问题。从而最大程度的利用 DSTATCOM 的快速响应性能。

## 3 仿真实验

使用 PSCAD 进行仿真计算，建立含配电网、微网以及 DSTATCOM 的仿真模型，微网采用相同逆变器拓扑的微源单元构成，负载采用恒功率模型，具体仿真初始设定参数如表 1、2 所示。DSTATCOM 滤波器等效电阻为 0.2，电感为 2 mH。

表 1 负载仿真参数

负载编号	有功功率/kW	无功功率/kvar	类型
负载 1	300	0	恒阻抗
负载 2	300	200	恒阻抗
负载 3	200	100	恒阻抗
负载 4	0	10	电容

表 2 微网仿真参数

微源	有功功率/kW	无功功率/kvar
G1	10	10
G2	400	0
G3	100	0
G4	20	0
G5	20	0

初始状态时，微网中总的负荷为有功负荷 500kW，外部负载 1 为有功 300 kW，微源总的出力为有功 550 kW，提供微网内部所需的有功负荷并可回馈电网，其中负载 4 为电容器组，用于对消风机消耗的无功。微网的无功负荷主要由配电网提供，系统电压恒定。设定在 1.5s 时在负载 1 处添加三相阻感负荷接地故障，使系统增加了 300kvar 的无功负载，DSTATCOM 设定补偿容量为 20kvar，仿真时间为 3s。

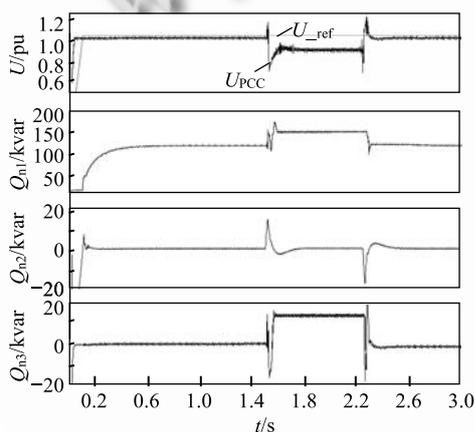


图 4 单独运行仿真结果

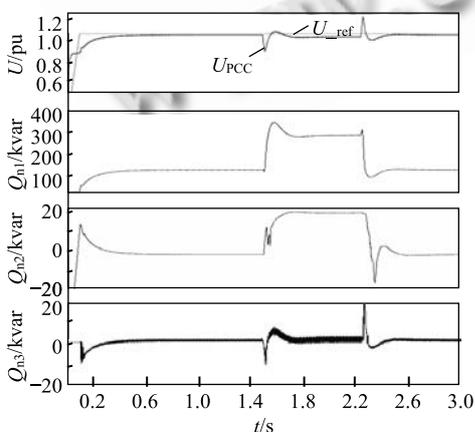


图 5 协同控制仿真

图 4 为微网和 DSTATCOM 单独运行发生电压跌落时的补偿效果和各节点无功输出水平。由图可见，此时 DSTATCOM 对电压和电流的调节都比较快，会首先对电压跌落作出响应，如仿真 Qn3。微网调度功率过程稍慢，功率控制的微源由于没有接收到无功调度指令，故维持输出无功为 0，由于有功和无功解耦不完全，在跌落发生和结束时，无功输出有些波动，如仿真 Qn2。下垂控制的微源自动调整其运行点，发出一定无功功率，如仿真 Qn1。由于微网没有提供较大容量无功，仅依赖下垂控制的微源的自动调整和 DSTATCOM 的极限输出难以补偿近 300 kvar 的无功缺口，电压补偿效果较差，参考电压和公共连接点电压如  $U_{ref}$  和  $U_{pcc}$  所示。

图 5 为联合运行系统的补偿效果，当电压跌落发生时，通过调整下垂控制微源的下垂系数，使其发出近 260 kvar 的无功功率，如仿真 Qn1 所示，使 PQ 控制的微源发出 20 kvar 的无功功率来补足无功缺口，如仿真 Qn2 所示，同时由于大容量的无功由微网担当，DSTATCOM 可立刻退出极限状态，进行小范围无功精细调节，如 Qn3 所示，可见补偿效果优于分立运行模式，参考电压和公共连接点电压如  $U_{ref}$  和  $U_{pcc}$  所示。

#### 4 结论

本文提出一种将微网中的微源作为较大容量分级的无功源，将系统原有的 DSTATCOM 作为小容量无级的无功源进行联合使用的配电网无功电压协同控制系统。在本文最后，给出了相应的仿真结果加以验证无功电压协同控制系统的有效性。协同控制系统的意义在于：(1) 可有效利用微网的无功储备容量，使微网在供能的同时担负一定的无功电压调整任务，使得微网发挥更大作用<sup>[7]</sup>；(2) DSTATCOM 装设的意义在于可消除微网模式切换、本地负荷的变动及微源出力变化带来的配电网公共连接点电压的小幅波动，降低电网扰动对微网的冲击，增加微网的生存能力，提高供电品质。

#### 参考文献

- 1 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述.电力系统自动化, 2007,31(19):101-102.
- 2 时珊珊,鲁宗相,周双喜,等.中国微电网的特点和发展方向.

(下转第 108 页)

### 3 结语

本文提出了面向特征的 MDSMP 领域模型, 该模型在传统领域模型的基础上引入了特征平面, 新的领域模型和构件提取方法具有明显的优势, 主要体现在以下方面:

①以特征作为驱动, 特征在构件的演进中具有很强的稳定性, 有效地提高了该平台构件演进能力。

②职能实体体现了移动互联网业务特征和构件的映射, 与平台的实现技术无关, 在该领域各类不同的软硬件环境中具有很强的适应性。

③通过职能实体形成的静态模型就是移动互联网业务特征的反映, 在该领域中具有通用性, 提高了平台构件的复用规模。

④建模过程与传统的建模过程相比, 有职能实体作为过渡的中间量, 具有更强的可推导性, 便于开发人员和业务人员理解和重组业务。

该模型在中国电信手机阅读平台的开发实践中证明了其在捕获构件, 提高构件复用性和业务演进能力方面能提供较好的技术支持。本文的下一步工作在于研究领域构件库以及领域框架的构建, 用以指导移动互联网领域中的同类平台的规划和建设。

### 参考文献

- 1 OMA. OMA - RD -I MSinOMA - V1\_0 - 20050809 - A Utilization of IMS capabilities Requirements, 2005.
  - 2 Evans. Domain-driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. New Jersey: Addison-Wesley, 2004.
  - 3 Chastek G, Donohoe P, Kang KC, et al. Product line analysis: a practical introduction. [2009203212].
  - 4 Kang K, Kim S, Lee J, et al. Form: a feature-oriented reuse method with domain specific reference architectures. Annals of Software Engineering, 1998(5):1432168.
  - 5 Griss ML, Favaro J, D'Alessandro M. Integrating feature modeling with the RSEB. Proc. of ICSR5. Victoria, 1998: 76285.
  - 6 张伟, 梅宏. 一种面向特征的领域模型及其建模过程. 软件学报, 2003, 14(8):1345-1356.
  - 7 李克勤, 陈兆良, 梅宏, 杨芙清. 领域工程概述. 计算机科学, 1999, (5).
  - 8 石可镭. 数据业务管理平台建设的回顾、思考与展望. 电信网技术, 2007, (6).
  - 9 陶志强. 3G 业务网络技术分析. 广东通信技术, 2005, (11).
  - 10 徐鹏, 黄兴平, 龙湘明. 下一代网络业务领域模型及应用. 中国通信学会通信软件技术委员会 2009 年学术会议论文集, 2009.
- 
- (上接第 32 页)
- 中国电力, 2009, 42(7):21-25.
  - 3 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微网 PQ 控制策略研究. 电力电子技术, 2010, 44(6):71-74.
  - 4 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法. 电网技术, 2004, 28(19):81-84.
  - 5 Dimeas A, Hatziaargyriou N. Operation of a multiagent system for microgrid control. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(3):1447-1455.
  - 6 Piagi P, Lasseter R H. Autonomous control of microgrids. IEEE Power Engineering Society Meeting, Montreal, Canada, 2006.
  - 7 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析. 电力系统自动化, 2008, 32(7):98-103.