

# 分布式电源自律分散调度控制方法研究

顾博川<sup>1,2</sup> 黄缙华<sup>1</sup> 刘菲<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 南方电网公司重点实验室电网自动化实验室, 广州 510080)

**摘要** 针对分布式电源运行特点及现有集中调度控制模式存在的不足, 提出一种自律分散调度控制方法和协调控制策略。该模式下分布式电源点作为同构节点接入自律分散系统的数据域, 具有良好的在线扩展性, 并采用基于数据的驱动方式生成协调控制策略实现自主控制。通过算例与传统集中调度模式下的分布式电源控制进行对比, 结果验证自律分散调度控制方法的有效性。

**关键词:** 自律分散控制; 分布式电源; 协调控制; 在线扩展性

## Distributed Generation Autonomous Decentralized Dispatch Control Method Research

Gu Bochuan<sup>1,2</sup> Huang Jinhua<sup>1</sup> Liu Fei<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080; 2. Key Laboratory for Power Grid Automation of China Southern Power Grid Corporation, Guangzhou 510080)

**Abstract** An autonomous decentralized dispatch control method and coordinated control strategy is proposed for the feature of distributed generation operation and the deficiencies of centralized dispatch control mode. In this mode, distributed generation point as isomorphic node is accessed data field of autonomous decentralized system, which has excellent online scalability. The system uses coordinated control strategy to realize self-control based on data-driven approach. By comparing with centralized dispatch mode, the results verify the validity of autonomous decentralized dispatch control method.

**Keywords:** autonomous decentralized control; distributed generation; coordinated control; online scalability

近年来, 分布式电源接入规模不断扩大, 由于分布式电源具有数量多、分散、灵活、随机等特点, 传统集中调度控制模式越来越难以预测应如何对系统进行调整以适应环境的变化, 难以有效适用于大规模分布式电源的协调调度。由于分布式电源点的接入和退出呈现较为复杂的随机性, 对调度控制模式的在线扩展性提出了很高的要求, 同时系统还要满足无论哪个电源点因退出失效, 其他运行中的分布式电源点之间能够相互协调, 实现预定的调度控制目标。另一方面, 由于分布式电源受外界环境因素影响较大, 功率输出具有很强的随机波动性<sup>[1]</sup>, 对每个接入的电源点都通过集中主站下发实时控制命令, 会导致主站端系统负载压力过大, 影响主站系统可靠性。另外, 集中调度控制模式下, 数据通

主  
广东省智能电网新技术企业重点实验室资助项目(2060299)

控制命令的传输。

作为集中发电的补充, 一些分散的小容量分布式电源对于系运行人员是不可见的<sup>[2]</sup>, 如何在调度运行层面上实现分布式发电技术的灵活、经济应用, 解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网调度控制问题已成为电网运行关注与研究的热点。相关研究一方面集中于在传统集中调度控制模式下, 基于现代优化算法构建多目标动态优化调度模型<sup>[3-4]</sup>, 另一方面研究集中于分布式电源调度控制模式上<sup>[5-6]</sup>, 通过建立多代理协作功能结构实现分布式电源协调调度, 但缺少对分布式电源运行的动态变化的控制策略进行探讨, 因此需要研究构建一种支持在线扩展的自律可控和自律可协调的控制框架实现分布式电源运行调度。

本文针对分布式电源运行及现有调度控制模式特点, 提出一种自律分散调度控制技术框架和协调控制策略, 通过算例验证在自律分散调度控制模式下, 能够较好的解决分布式电源点随机接入工况,

效果优于集中调度模式；同时验证在缺少主站端集中调度情况下，通过自律控制策略可以实现预期控制目标，为实现分布式电源调度控制开辟一个有效途径。

## 1 自律分散控制模式

自律分散系统 (Autonomous Decentralized System, ADS) 是由具有自律性的子系统单元所构成的，系统中所有单元都是独立平等的，之间不存在任何隶属关系，各个单元都能独立完成各自的任务而不受其他单元的赶回，同时各个单元之间能够协调工作，实现整个系统的运行。

自律性可由自律可控性和自律可协调性两个性质来表征。自律可控性指无论哪个子系统功能失效，其他在运行中的子系统仍能够控制自己所承担的功能，自律可协调性指在部分子系统功能失效的情况下，其他运行中的子系统之间能够相互协调，实现整体控制目标<sup>[7]</sup>。

### 1.1 自律分散系统结构模型

自律分散系统由原子节点 (Atom) 和数据域 (Data Field, DF) 构成，原子节点是保证子系统满足自律可控与自律可协调所需控制功能及信息的结构，数据域是提供原子节点所在子系统交换信息的逻辑空间，如图 1 所示。

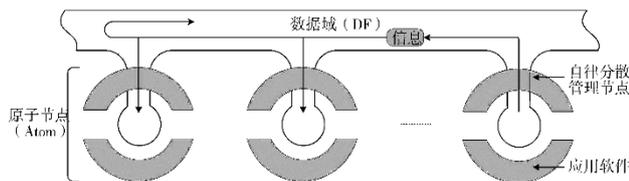


图 1 自律分散系统结构模型

各子系统具有均质性、平等性和局部性，不关心消息由谁发出，只根据自身所需的内容代码从 DF 中提取数据，完成处理后再将所产生数据返回到 DF 中。原子节点判断所需数据到齐后开始处理的事件驱动方式。节点之间无直接驱动，仅通过数据保持松散耦合结构，是在线扩展的基础。

### 1.2 自律分散系统数学模型

自律分散系统由独立功能的原子节点构成，各节点被外界及其他节点产生的信息驱动，通过节点间的协调实现系统的整体功能。各节点  $S_i$  由函数

$f_i$  定义，函数输入为  $u_i$ ，输出  $y_i$  可由式 (1) 描述：

$$y_{i|k+1} = f_i(u_{i|k+1}, y_{i|k}, L, y_{i|k}, L, y_{N|k}) \quad (1)$$

式中， $y_i$  是  $m_i$  维向量； $u_i$  是  $l_i$  维向量；函数  $f_i$  是由  $(u_{i|k+1}, y_{i|k}, L, y_{i|k}, L, y_{N|k})$  的部分元素产生输出的数据驱动型函数。假设节点  $S_i$  被输入  $u_i$  驱动后， $S_i$  节点输出结果会正常驱动其余节点，节点产生一系列有效输出为  $Y_S$  由式 (2) 描述：

$$Y_S = H_S \cdot (y_1^T, y_2^T, L, y_N^T)^T \quad (2)$$

式中， $H_S$  是有效成分矩阵，在上述情况中  $H_S$  的

第  $i$  个分量  $h_i = 0$ ，表征从全部节点输出中选择对系统的有效输出。给定系统的控制目标  $\mathcal{Y}$  后，可以通过

设计输出反馈控制器  $u_{i|k+1} = k_i(Y_{S|i})$  实现跟踪控制，使系统实际输出与目标输出的偏差趋近于零。

如果  $S_i$  节点失效，系统节点拓扑关系发生变化，

系统结构由  $S$  变为  $S'$ ，存活的原子节点集合为  $C(S')$ ，

与没有异常时相比，结构  $S|_{C(S')=C(S)}$  所实现功能的有效输出成分会减少。

## 2 分布式电源自律分散调度控制技术

目前，分布式电源控制策略主要有主从控制<sup>[8]</sup>和对等控制<sup>[9]</sup>两种方式。主从控制由上层主动控制和底层从动控制构成，通过上层控制器向下层控制单元发送控制命令实现分布式电源调度，但需要可靠的通信线路传输采集和控制信息，通信故障或是未知的电源点拓扑随机变动都可能导致系统的不稳定；对等控制是针对采用即插即用式分布式电源接入提出的控制策略，取消通信环节，每个电源点通过就地的频率和电压偏差进行功率调节，但对等控制策略没有考虑多个分布式电源作为整体参与电网协调控制，可能导致电网运行方式与计划偏差过大，对电网稳定运行造成冲击。

在分布式电源调度中，基于自律分散调度控制框架，各分布式电源点作为自律分散系统的原子节

点。各控制节点通过网络互连，继续数据交换并实现协调。如果某个电源点发生变动，该节点的输出数据会被接入数据域 DF 的其余节点接收，并对运行计划进行修正，从而实现整体的协调控制目标。

电力系统调度运行中要求区域分布式电源总出力跟随调度生产管理系统 (DMIS) 下发的发电计划曲线，在日计划曲线由调控中心方式专业制定，并于前一日下发至构成数据域的消息总线，并广播到接入数据域的所有有效节点。实际系统的数据域构建基于消息总线，各节点发送的消息保证持久化，整体系统框图如图 2 所示。

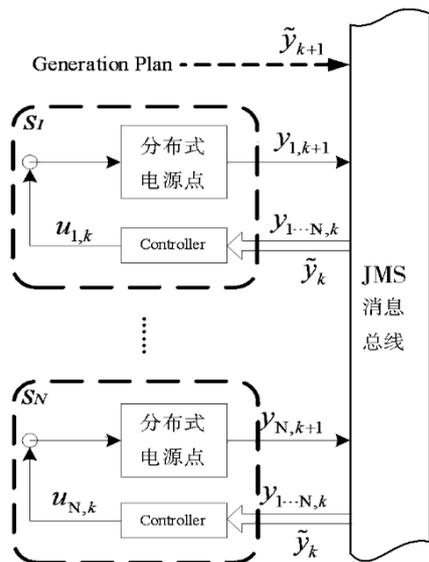


图 2 分布式电源自律分散控制框图

对于已存在分布式电源点，自律分散控制器中独立存储整个系统的期望输出，在每个控制周期中，控制器根据协调控制策略计算出本节点的期望轨迹  $y_k^e$  及偏差  $e_i$ ，通过输出反馈控制器产生节点自身的控制变量独立进行自动控制，输出本节点控制输出及相关环境信息，环境信息包括该分布式电源的可调容量、出力限额，以及已存储的全局信息如全局系统期望轨迹等，并发布至消息队列，其余节点及在线扩展的节点基于发布主题订阅其余节点产生的持久化消息。

各分布式电源点控制策略由协调控制策略和独立控制策略两部分构成，其中，协调控制策略在所有接入数据域的节点中保持一致，包括从数据域中提取和发送的信息，实现自律可控和可协调。而独立控制策略由节点本身结构和参数进行设计，实现分散控制。在如上自律分散控制框架中，避免复杂系统的控制器设计并重复考虑了系统的在线扩展性。

采用如上所述自律分散调度控制框架对所有分布式电源点协调控制，发电计划是 96 点运行方式，各节点独立控制周期为秒级或是分钟级，在此采样间隔尺度下，各节点可由式 (3) 描述。

$$x_{i|k+1} = A_{i|k} \cdot x_{i|k} + B_{i|k} \cdot u_{i|k} + \xi_{i|k} \quad (3)$$

式中， $x_{i|k}$  表示在第  $k$  个控制周期中分布式电源出力； $u_{i|k}$  为根据自律分散控制的协调控制策略；

$\xi_{i|k}$  描述由于环境因素导致系统的随机波动；

$A_{i|k}$  和  $B_{i|k}$  描

述节点结构参数，在该模型中都为单位矩阵。

控制器设计分别考虑节点本身的分散独立控制策略和节点间协调的自律控制策略。独立控制策略  $u_{i|k} = k_1 \cdot \mathcal{E}_{i|k} + k_2 \cdot \sum_{j=1}^k \mathcal{E}_{i|j}$ ，协调控制策略生成节点输出偏差  $\mathcal{E}_{i|k}$ ，各自律控制节点从消息总线中订阅持久化消息，获取系统中存活节点的输出  $x_{i \in C(S^*)|k}$  及节

点描述，考虑根据各电源点根据装机容量分摊发电计划，协调控制策略可采用

$$\mathcal{E}_{i|k} = x_{i|k} - \rho_i / \sum_{j \in C(S^*)} \rho_j \cdot y_k^e,$$

$\rho_j$  为接入拓扑存活电源点的装机容量。但该策略没有考虑系统出力受限的情况，因此需要将节点功率缺额发布至数据域中，协调控制策略中控制备用容量充足的节点分摊功率缺额，采用如式 (4) 形式的协调策略。

$$\mathcal{E}_{i|k} = x_{i|k} - \frac{\rho_i}{\sum_{j \in C(S^*)} \rho_j} \cdot y_k^e - \frac{\theta_i}{\sum_{k \in C(S^*)} \theta_k} \cdot \sum_{j \in C(S^*)} \gamma_j \quad (4)$$

式中， $\sum_{j \in C(S^*)} \gamma_j$  是所有存活节点的总功率缺额；

$\theta_k$  是节点在分摊计划出力后剩余的备用容量；

$C(S^*)$  为由具有备用容量的分布式电源点构成的集合。

### 3 算例分析

算例考虑文献 [10] 中标准 IEEE 34 节点辐射型配电网末端接入分布式电源。系统中含有 4 个风电机和 3 个光伏发电系统，各电源点参数如表 1 所示，其中风电机运行受环境因素影响较大，出力随时间变化会产生较大的波动，各电源点接入和退出也有一定的随机性，系统整体的控制目标是跟随

DMIS 下发的 96 点发电计划曲线运行。

表 1 分布式电源参数

序号	风电机参数				光伏发电系统参数		
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#
装机容量 /MW	0.5	0.3	0.3	0.2	0.02	0.02	0.01

该算例场景中，风电机模拟由于环境因素影响出力受限，光伏发电系统模拟分布式电源随机接入与退出。受环境因素影响，光伏发电系统 0 时至 8 时及 18 时至 24 时出力受限，风电全天 24h 出力随机受限；11:40 光伏 2#机退出运行，12:35 光伏 2#机接入运行。算例对比集中调度控制方式与上文所述的自律分散调度控制方式，其中集中控制方式以分布式电源分摊出力策略实时下发控制命令，两种控制模式的结果曲线如图 4 所示。其中，上图为 24 小时时间段的结果曲线，下图为 11:00 至 13:00 的细节展示。

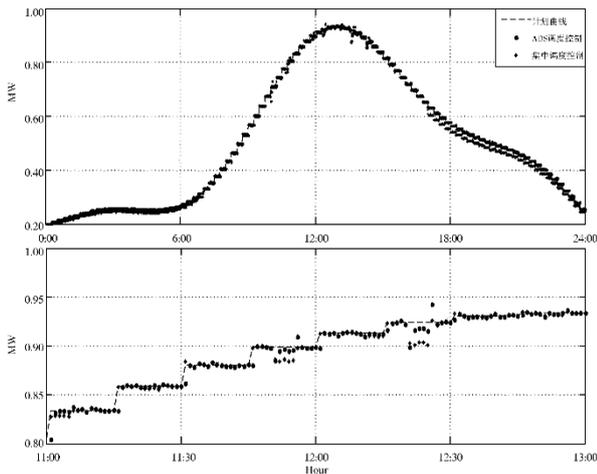


图 3 自律分散调度控制与集中调度控制结果对比

从算例可以看出，由于分布式电源出力受限量为随机值，采用集中控制方式，各分布式电源点输出受中央控制器控制，节点间输出调整需等待中央控制的下个命令，因此对于随机影响的响应弱于自律分散控制策略。控制效果可用累计电量误差，即系统实际输出与计划曲线偏差的绝对值在时间上的积分来表征，结果见表 2。

表 2 控制效果

累积电量误差 /h	集中调度控制 /MWh	自律分散调度控制 /MWh
24	0.2377	0.0463
2	0.0065	0.0054

(11:00-13:00)		
---------------	--	--

在电源点退出运行时，集中调度控制方式的其他节点由于未到达下个控制周期，在本周期内无法调整出力消除功率缺额，自律分散方式能够进行节点间的自协调，有效减少控制误差。电源点接入运行时，集中控制模式需要在中央控制器中制定控制策略并建立通信通道，自律分散控制模式仅需根据协调策略构建自身控制器，在分布式电源大规模接入的应用场景中更易于在线扩展和维护。

#### 4 结论

本文对分布式电源协调调度控制进行了研究，构建一种有效的自律分散协调控制框架，分布式电源点作为同构节点从数据域中提取数据，根据协调控制策略实现自主控制，脱离传统集中调度控制框架，从而简化控制器设计并具备在线扩展性。通过算例与传统集中调度模式下的分布式电源控制进行对比分析，验证自律分散调度控制的协调控制策略能够提高控制精度。

下一阶段会针对考虑储能装置的异构节点自律分散调度控制模式做进一步研究。随着未来电网中分布式能源的大规模接入，具有良好在线扩展性的自律分散调度控制能够更加有效的解决集中调度控制模式存在的瓶颈。

#### 参考文献

- [1] Mcdermott TE, Dugan RC. PQ, reliability and DG[J]. IEEE Magazine on Industry Application, 2003, 9(5): 17-23.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [3] Mashhour E, Moghaddas-Tafreshi SM. Integration of distributed energy resources into low voltage grid: A market-based multiperiod optimization model[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(4): 473-480.
- [4] Moghaddam AA, Seifi A, Niknam TA. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source[J]. Energy, 2011, 36(11): 6490-6507.
- [5] 黎静华, 韦化, 夏小琴, 等. 智能电网下节能发电调

- 度多 Agent 系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 96-103, 108.
- [6] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 21-28.
- [7] Mori K. Autonomous decentralized system:concept data filed architecture and future trends[C]//The 1st International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 1993: 28-34.
- [8] Dimeas AL, Hatziargyriou ND. Operation of a multiagent system for Microgrid control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [9] Engler A. Applicability of droops in low voltage grids[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 1(1): 1-6.
- [10] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial distribution test feeders[J]. On Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.

---

作者简介:顾博川(1985-),男,工学硕士,研究方向为电力系统调度自动化技术。