

微网的能量管理及其控制策略

张建华¹, 苏玲¹, 陈勇², 苏静³, 王利²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 大同供电公司, 山西省 大同市 038200)

Energy Management of Microgrid and Its Control Strategy

ZHANG Jianhua¹, SU Ling¹, CHEN Yong², SU Jing³, WNAG Li²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

3. Datong Power Supply Company, Datong 038200, Shanxi Province, China)

ABSTRACT: To construct a supervisory control platform for microgrid in laboratory, the constitution, functions, tasks and working flow of an energy management system are proposed and the mathematical modeling of economic dispatching and optimal operation of the energy management system are described in detail. In allusion to the operation control of microgrid in the laboratory, a control strategy, in which the central controller is combined with local controllers, is put forward and the correctness of this control strategy is verified by the microgrid simulation model in the laboratory. Simulation results show that the proposed control strategy can implement optimal management, coordinative control and seamless switching of microgrid.

KEY WORDS: microgrid; distributed generation (DG); energy management; operation control; economic dispatch

摘要: 为建设实验室微网监控平台, 提出了能量管理系统的构成、任务和 workflows, 并对其中经济调度和优化运行的数学建模方法进行了详细描述。针对实验室微网运行控制, 提出了中央控制器和局部控制器相结合的控制策略, 并用实验室微网仿真模型验证了上述控制策略的正确性, 结果表明该控制策略能实现微网的优化管理、协调控制和无缝切换。

关键词: 微网; 分布式电源; 能量管理; 运行控制; 经济调度

0 引言

将分布式电源(distributed generation, DG)以微网形式接入大电网, 能够系统、高效管理分布式电源, 提升能源利用效率, 提高供电可靠性, 改善电

能质量等^[1-5]。此时微网相对主配网可作为一个模块化的可控单元, 对内部提供满足负荷用户需求的电能^[6]。为实现这些优势, 微网必须具有良好的能量管理系统和灵活的控制策略。

DG 与传统电源有很大不同, 如受气候影响光伏和风力发电的间断性, 微型燃气轮机发电受冷、热负荷的影响, 部分 DG 通过逆变器接入电网, 较小的惯量可能对电压和频率造成不利影响^[7]等。随着 DG 渗透率的增加, 微网能量管理系统与传统电网有很大不同^[8]。传统电网能量管理系统是通过数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统采集实时电网信息, 用于调度、管理和控制^[9]。微网能量管理系统除了具备以上基本功能, 还需要包括可再生能源发电预测、实时功率平衡以及对重要负荷可靠供电等^[10]。

微网的动态特性和能量管理问题, 使传统控制策略已经不适用于微网运行控制^[11]。微网能量管理系统良好运行, 必须有完善的控制策略支持。当微网运行方式变化时, 通过其控制策略实现无缝切换^[12-13]。当负荷或网络结构发生变化时, 对微网中各 DG、储能装置及负荷实现协调控制, 保持电压频率稳定。

基于实验室微网监控平台, 本文提出其能量管理系统的构成、任务和 workflows。在满足负荷功率需求和保证电能质量的前提下, 能量管理系统还考虑了微网在各种状况和约束下的经济调度和优化运行。针对实验室微网运行控制, 提出中央控制器和局部控制器(DG 和负荷)相结合的控制策略。详细阐述了局部控制器在微网不同运行方式下的控制

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2008AA05Z216, 2007AA05Z249)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2008AA05Z216, 2007AA05Z249).

方法。通过建立实验室微网仿真模型，对上述控制策略进行了验证。

1 微网结构

实验室微网结构如图 1 所示，其中分布式电源包括 65kW 微型燃气轮机(microturbine, MT)、10kW 光伏电池(photovoltaic, PV)、40 kW 燃料电池(fuel cell, FC)和 20kW 风力发电机(wind turbine, WT)。储能元件为超级电容器组，电容取 0.5F，储存的最大能量为 25 kJ。L₁ 为重要负荷，L₂ 为一般负荷，L₃ 为非重要负荷。

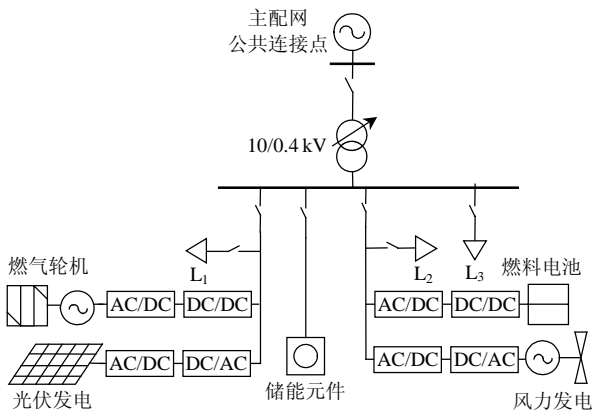


图 1 微网拓扑结构

Fig. 1 Schematic diagram of microgrid

2 微网的能量管理

2.1 微网能量管理系统的构成与任务

微网能量管理系统的主要功能包括：采集基于实时监控采集的电网信息、分布式电源信息、负荷信息等；实现主网、多种分布式电源、储能单元和负载之间的最优功率匹配；实现多种分布式电源的灵活投切；实现微网在孤岛与并网 2 种运行模式间的无缝转换等。能量管理系统构成及工作流程如图 2 所示。

微网能量管理系统的任务按时间可分为短期功率平衡和长期能量管理。

1) 短期功率平衡。根据 DG 容量、技术条件

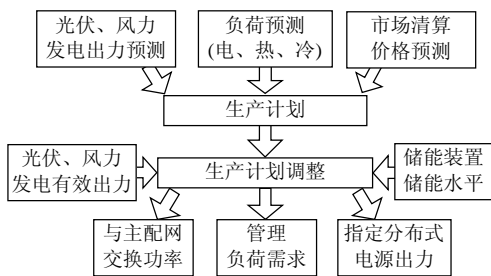


图 2 微网能量管理系统构成及流程

Fig. 2 Functions and flowchart of the energy management system for microgrid

和储能装置的储能水平，调整 DG 出力或(和)甩负荷，实时跟踪负荷变化；实现电压调整和频率控制。微网动态特性符合标准^[13]要求，满足敏感负荷对电能质量的要求。

主配网故障或电能质量不满足时，断开与主网连接；主配网恢复后，实现微网与主配网的同期、并网。

2) 长期能量管理。根据分布式电源的类型、一次能源的变化、发电费用、环境因素、检修周期等预测分布式电源出力。

根据经济调度和优化运行策略，指定分布式电源出力；根据负荷预测和电力市场，提供适当的备用容量，管理负荷需求，投切非重要负荷。

2.2 微网经济调度和优化运行

微网能量管理主要目标之一是实现微网经济调度和优化运行^[14]。微网孤岛运行时，主要是为了保证重要负荷的可靠供电^[15]，故本文仅对并网运行的微网考虑经济调度和优化运行。

与大电网的优化运行不同，微网经济运行不仅要考虑 DG 同时提供冷热电能、有效利用可再生能源、保护环境，减小燃料费用等，还需考虑与主网间的电能交易。基于以上原因，本文提出的微网能量管理系统在系统安全、稳定运行基础上，考虑购售电价、各 DG 技术性能、环保等因素，经济调度各 DG 出力以及与主配网之间的功率流动，管理负荷需求，实现微网运行的经济成本最小。

经济调度策略如下：

- 1) WT 和 PV 作为可再生能源不直接消耗燃料，环境污染小，优先利用其机组出力；
- 2) MT 机组出力由冷、热负荷确定；
- 3) 当 WT、PV 和 MT 机组所发电量满足全部电负荷需求时，可考虑向主配网售电；
- 4) 当 WT、PV 和 MT 机组所发电量不能满足电能需求时，根据 MT 和 FC 的综合发电成本，经济调度其出力或从外部电网购电量来满足剩余负荷需求。详细的数学建模过程如下：

为使运行经济成本最小，目标函数为

$$\min C(P) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \{F_i[P(t)] + O_i[P(t)] + \sum_{k=1}^M \alpha_k E_k^i[P(t)]\} + \sum_{t=1}^T [C_b(t)P_{buy}(t) - C_s(t)P_{sell}(t)]$$

式中： $P(t)$ 为 MT 或 FC 在时段 t 的输出功率； F_i 为

MT 或 FC 的燃料成本； O_i 为 MT 或 FC 的运行和维护费用； α_k 为排放类型 k 的外部成本； E_k^i 为 MT 或 FC 在排放类型为 k 时的排放因子； M 为气体排放类型，主要包括 NO_x 、 SO_2 或 CO_2 ； $C_b(t)$ 和 $C_s(t)$ 分别表示 t 时刻的购电价和售电价； $P_{\text{buy}}(t)$ 为购买电量； $P_{\text{sell}}(t)$ 为出售电量； T 为优化周期总时段数。

MT 或 FC 输出功率与购售电量差值之和满足剩余负荷需求。等式约束条件为

$$\sum_{i=1}^2 P_i = P_L - P_{\text{PV}} - P_{\text{WT}} - P_{\text{buy}} + P_{\text{sell}}$$

MT 或 FC 输出功率必须在其允许的最大最小输出范围内。不等式约束条件为

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

式中： P_i^{\min} 为 MT 或 FC 的最小出力； P_i^{\max} 为 MT 或 FC 的最大出力。

3 微网的控制策略

3.1 微网运行控制

对于实验室微网运行控制，采取中央控制器和局部控制器(DG 和负荷)相结合的控制策略。

局部控制器负责采集系统运行数据、传输控制指令以及保持系统电压和频率稳定性。并网运行时，所有 DG 逆变器均采用 PQ 控制方法，输出中央控制器指定的有功功率、无功功率。孤网运行时，主控分布式电源 MT 快速转换为电压和频率控制方法，跟踪负荷变化并保持频率电压稳定。局部负荷控制器安装于用户负荷侧，根据中央控制器的命令管理负荷。中央控制器接受能量管理中心的控制信息，通过 DG 控制器和负荷控制器控制系统中各发电、储能单元和负荷的运行状态，从而控制系统中的潮流。能量管理中心是核心单元，接受中央控制器馈送的分布式电源信息和负荷信息，在系统安全、稳定运行基础上，统筹安排最佳的电能调度和交易计划。

3.2 DG 控制策略

微网有并网和孤网 2 种运行方式，DG 控制策略因运行方式改变而转换。

1) 并网运行控制策略。并网运行时，微网内的功率缺额由主配电网进行平衡，频率的控制和电压的调整也由主配电网完成。DG 逆变器均采用 PQ 控制，输出中央控制器指定的有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} ，控制框图如图 3 所示。图中： L_f 为滤波电感； L_c 为耦合电感； C 为滤波电容； u_i 为逆变器

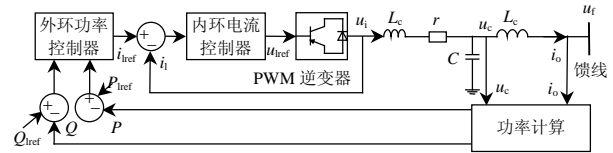


图 3 PQ 控制框图

Fig. 3 Control structure of PQ

出口电压； u_c 为滤波电容电压； u_f 为馈线电压； i_i 为流过滤波电感电流； i_o 为逆变器输出电流； i_{ref} 为经外环功率 PI 调节输出参考电流； u_{ref} 为经内环电流 PI 调节输出参考电压； P 为逆变器输出有功功率； Q 为逆变器输出无功功率。

2) 孤网运行控制策略。孤网运行时，由于失去了主网的功率平衡和频率电压支撑，为保证对重要负荷的可靠供电，可控分布式电源 MT 逆变器采用电压和频率控制，为孤网运行微网提供有力的电压和频率支撑，并能跟踪负荷的变化，控制框图如图 4 所示。图中： i_{ref} 为经外环电压 PI 调节输出参考电流； u_{cref} 为指定输出参考电压。

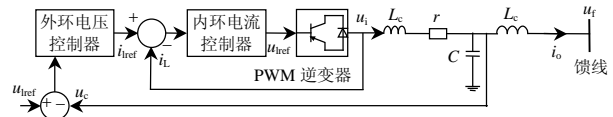


图 4 电压和频率控制框图

Fig. 4 Control structure of voltage and frequency

3) 运行方式的转换。由于主配网故障或电能质量等原因，微网需快速与主配网断开。为准确探测孤岛状态，检测公供连接点的电压和频率，如一定检测周期内(120 ms)超出电压或频率的允许范围，微网与主网断开孤网运行，可控 DG 转换为电压和频率控制。孤岛发生后，若频率超出允许范围，则需要考虑切除非重要负荷。

若主网恢复正常运行，需将微网与主配网重新连接。为避免互联过程中的巨大暂态冲击，必须对 DG 进行同期，使其与主网的电压、频率、相角误差在允许范围内。同期完成，微网与主网相连，可控 DG 转换为有功和无功功率控制，并对非重要负荷恢复供电。微网运行控制如图 5 所示。

3.3 仿真算例

图 1 中负荷 L_1 的视在功率 $S_{L1}=50\text{kW}+j12\text{kvar}$ ， L_2 的视在功率 $S_{L2}=40\text{kW}+j12\text{kvar}$ ， L_3 的视在功率 $S_{L3}=24\text{kW}+j4.8\text{kvar}$ 。按照 2.2 节的微网经济调度策略，各 DG 指定输出如表 1 所示。

当 T 在 0~5 s 时，微网并网运行，所有 DG 均采用 PQ 控制，输出功率与表 1 指定输出一致，主配网向微网输入有功功率，其值为 9.5kW，无功功

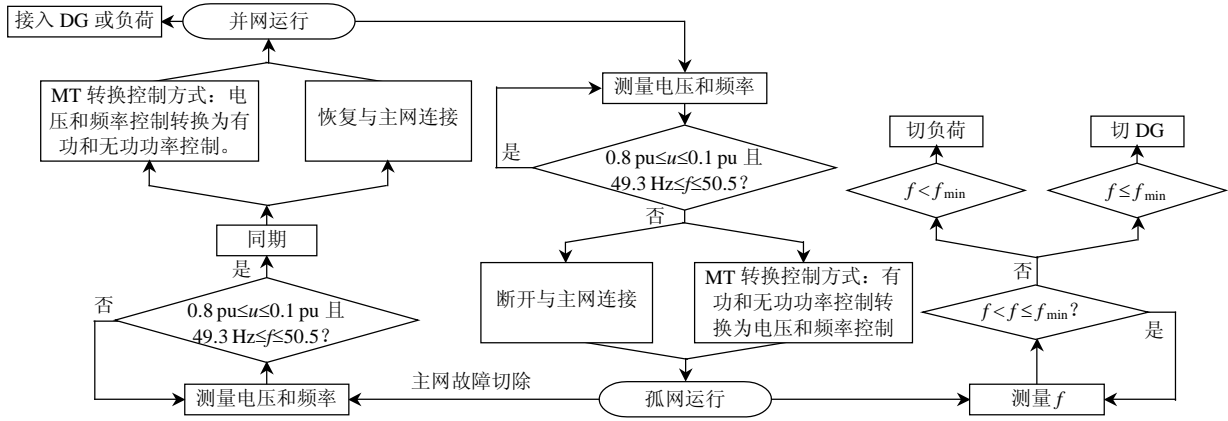


图 5 微网运行控制图

Fig. 5 Control diagram of microgrid operation

表 1 分布式电源指定输出

Tab. 1 Prescribed output power of DG

| DG | 指定有功功率输出/kW | 指定无功功率输出/kvar |
|----|-------------|---------------|
| MT | 35 | 25 |
| PV | 10 | 0 |
| FC | 40 | 0 |
| WT | 20 | 0 |

率为 3.8kvar。

$T=5\text{s}$ 时主网发生故障，经检测，电压或频率超限，微网中央控制器发出命令，令保护动作，120ms 后微网与主配网断开孤网运行。同时 MT 作为主控 DG，由有功和无功功率控制转换为电压和频率控制方式，有功出力变为 44.6 kW，无功出力变为 28.8kvar，WT、PV、FC 仍为有功和无功功率控制，出力不变。

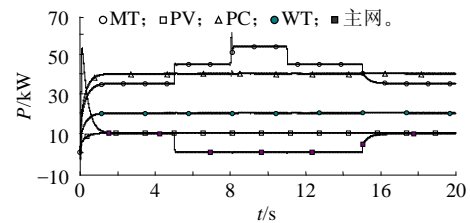
当 T 在 8~11 s 时， L_3 有功需求增加了 9 kW，无功需求不变。MT 采用电压和频率控制，可跟踪孤网运行时负荷变化，保证微网电压频率稳定性。

$T=15\text{s}$ 时主网恢复正常运行，经检测电压和频率满足要求，微网中央控制器发出命令，120ms 后微网再并网运行，同时 MT 又转化为有功和无功功率控制。主配网恢复对微网供电，各电气量恢复至孤网前水平。

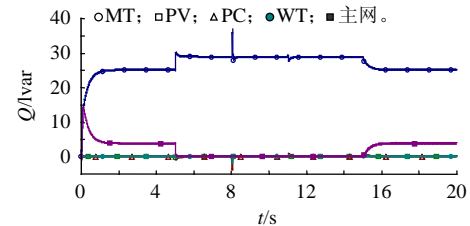
上述过程的仿真波形见图 6。图 6(a)和(b)表明：通过上述控制可实现微网并网和孤网运行无缝切换以及孤网运行时跟踪负荷变化。图 6(c)(d)(e)表明：上述过程中微网的电压、频率以及与主网电压相位差均满足要求。

4 结论

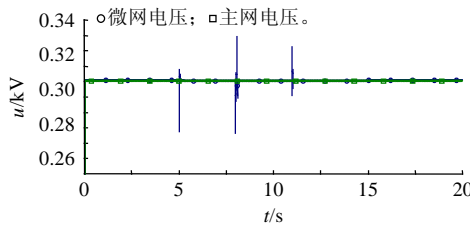
本文提出了微网能量管理系统的构成、任务和工作流程，其中的经济调度和优化运行功能在综合考虑各 DG 的技术性能、负荷需求大小、环保、电



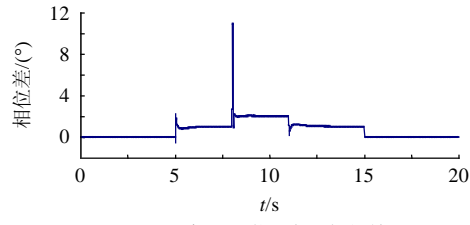
(a) DG 和主网有功出力



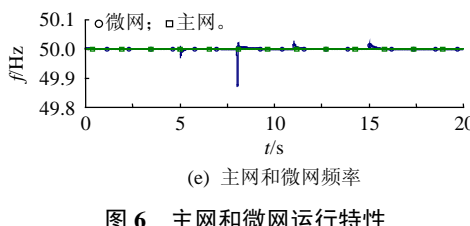
(b) DG 和主网无功出力



(c) 主网和微网母线电压幅值



(d) 主网和微网电压相位差



(e) 主网和微网频率

图 6 主网和微网运行特性

Fig. 6 Operation results of distribution network and microgrid

价等因素基础上, 协调控制微网内各发电单元、储能单元出力以及微网与上级电网之间的功率交换, 管理负荷需求, 实现了微网运行总的经济成本最小。仿真结果表明, 本文的集中控制与局部控制相结合的微网运行控制方法既能实现微网运行的灵活、无缝切换, 又能在孤网运行时跟踪负荷变化, 保持系统稳定性。

本文的研究内容为实验室微网监控平台的建设提供了可靠的技术支持。在后续的研究工作中, 还需对自动发电控制、安全评价、可靠性分析等其他能量管理功能进行研究、开发。

参考文献

- [1] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Zhiping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [2] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).
- [3] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75(in Chinese).
- [4] 苏玲, 张建华, 苗唯时, 等. 微型燃气轮机微网控制策略[J]. 高压技术, 2010, 34(2): 513-518.
Su Ling, Zhang Jianhua, Miao Weishi, et al. Control strategy of microturbine microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 34(2): 513-518(in Chinese).
- [5] 邱晓燕, 夏莉丽, 李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 7-10.
Qiu Xiaoyan, Xia Lili, Li Xingyuan. Planning of distributed generation in construction of smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 7-10(in Chinese).
- [6] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 4-10.
- [7] Farid K, Reza I, Nikos H, et al. Microgrid management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 55-65.
- [8] 王风萍, 范春燕, 王兰. EMS 在地区电网应用中的问题探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 76-79.
Wang Fengping, Fan Chunyan, Wang Lan. A discussion on some problems in applying EMS to regional power network[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 76-79(in Chinese).
- [9] Lu D, François B. Strategic framework of an energy management of a microgrid with a photovoltaic-Based active generator[C]//Advanced Electromechanical Motion System & Electric Drive Joint Symposium. Lille, France, 2009: 1-6.
- [10] Colson C M, Nehrir M H. A review or challenges to real-time power management of microgrids[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Alberta, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [11] Arulampalam A, Barnes M, Engler A, et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrid[J]. International Journal of Electronics, 2004, 91(9): 502-523.
- [12] Paolo P, Robert H L. Autonomous control of microgrid[C]//Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada, 2006: 8-10.
- [13] IEEE 1547 IEEE Standard for interconnecting distributed resource with electric power system[S]. USA: IEEE Standards Coordinating Committee 21, 2003.
- [14] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [15] Gaztañaga H, Etxeberria O, Bacha S, et al. Real-time analysis of the control structure and management functions of a hybrid microgrid system[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference. Paris, France, IEEE Industrial Electronics, 2006: 5137-5142.



张建华

收稿日期: 2011-01-10。

作者简介:

张建华(1952), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、智能电网技术;
苏玲(1977), 女, 博士研究生, 主要研究方向为分布式电源和微网控制, E-mail: ling0su@163.com。

(责任编辑 杜宁)