

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.021

分布式电源的最优经济运行方案

唐雷鸣

(广东电网有限责任公司湛江供电局, 湛江 524005)

摘要: [目的]为获取微电网安全经济运行方案,提出了基于支持向量机回归理论的微电网最优经济运行的数学模型,实现了微电网中各分布式电源的负荷预测,根据实时电价分析了分布式电源的出力情况,并给出了相应的理论依据。[方法]为尽可能准确地构建微电网模型,以系统的运行成本、环保成本和综合效益为目标,构建了以常见五大分布式电源为主的最优经济运行的数学模型,采用 Yalmip/CPLEX 对模型进行了求解,获得了各分布式电源的实时出力情况。[结果]计算结果表明:以综合效益为目标的调度方案能够实现微电网整体的运行成本最低,协调了微电网的经济性与环保性。[结论]该模型可为微电网并网的资源优化利用和提高供电可靠性的相关研究奠定理论基础。

关键词: 分布式电源; 经济运行; 支持向量机回归理论; 负荷预测

中图分类号: TM7; TN86

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0126-06

Optimal Economic Operation Scheme of Distributed Power Supply

TANG Leiming

(Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China)

Abstract: [Introduction] In order to obtain the safe and economic operation plan of microgrid, a mathematical model of optimal economic operation of microgrid based on support vector machine regression theory was proposed. The load forecast of distributed power sources in microgrid was realized, and the distribution was analyzed according to real-time electricity price. The output of the power supply, and the corresponding theoretical basis. [Method] In order to construct the microgrid model as accurately as possible, aiming at the operating cost, environmental protection cost and comprehensive benefits of the system, a mathematical model of optimal economic operation based on common five distributed power sources was constructed, using Yalmip/CPLEX. The model was solved and the real-time output of each distributed power source was obtained. [Result] The calculation results show that the scheduling scheme with the comprehensive benefit can achieve the lowest operating cost of the microgrid, and coordinate the economic and environmental protection of the microgrid. [Conclusion] The model can lay a theoretical foundation for the research on the optimal utilization of microgrid grid-connected resources and the improvement of power supply reliability.

Key words: distributed power; economic operation; support vector machine regression theory; load forecasting

随着能源需求的日益增长和环境问题的不断恶化,以风力发电和光伏发电为代表的分布式电源,受到世界各国的高度重视^[1-2]。由于分布式电源具有能源利用率高、环境污染小等优点,在我国发展十分迅速^[3-4]。然而,由于影响各分布式电源出力的因素众多,当分布式电源输出的电能接入主网

时,其间歇性的供电特性会降低主网运行的安全性和可靠性^[5-6]。

为了减少新能源的输出波动性的特点,提高供电的可靠性,有学者提出将一定规模的各种类型的分布式电源构建成一个微电网,能够实现分布式电源的协调控制与能量管理,把分布式电源、可控负荷和储能系统聚合为一个整体,与常规电网相似,使其参与到电力市场交易和系统调度,同时优化资源利用,提高供电可靠性。文献[7]为提高风力发电系统最大功率跟踪运行的工作性

收稿日期: 2018-12-02 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 广东电网公司科技项目“基于AMI体系的智能电网能效监测系统设计”(GDKJXM00000053)

能,研究了风力发电机的输出功率模型;文献[8]研究了不同天气条件与光伏发电输出功率的相关系数影响,得到了天气对光伏发电的影响规律;文献[9]研究了光伏/微型燃气轮机混合微电网协调控制策略,实现了对功率波动和电压波动的有效抑制;文献[10]研究了一种同时包含蓄电池储能和负荷转移的微网经济运行优化,给出了相应的预测结果。然而,由于组成微电网的分布式电源多样,在微电网投入运行中需要考虑多个分布式电源共同的输出功率,进而寻求一种最优的经济运行方案。

为此,本文针对组成微电网的分布式电源的多样性,搭建了以风力发电、光伏发电、微型燃气轮机、燃料电池和蓄电池为主的微电网。以系统的运行成本、环保成本和综合效益成本为目标,结合分布式电源的出力限值,构建了一个混合整数规划模型。采用 Yalmip/CPLEX 对模型进行了求解,实现了分布式电源负荷的准确预测。

1 分布式电源的数学模型

1.1 风力发电机模型

根据风速数据,可由风力发电机(以下简称,风机)的数学模型得到风电的输出功率。由于风机的出力与风电区域风速的偏差以及轮毂线高度关系不大,因此,在不考虑风速偏差和轮毂线高度的情况下,风机的输出功率为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{ci} \text{ or } V > V_{co} \\ \frac{P_r}{V_r^3 - V_{ci}^3} V^3 - \frac{V_{ci}^3}{V_r^3 - V_{ci}^3} P_r & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V < V_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_r 为风机的额定输出功率; V 为风速; V_{ci} 为切入风速; V_{co} 为切出风速; V_r 为额定风速。

1.2 光伏发电系统模型

光伏发电系统的输出功率与电池板的温度直接相关。其输出功率为:

$$P_{PV} = P_{STC} [1 + K(T_C - T_r)] G / G_{STC} \quad (2)$$

式中: P_{STC} 为标准功率(太阳光照强度为 1 kW/m^2 , 环境气温为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$); G_{STC} 为标准光照强度; G 为实测光照强度; K 为功温系数,一般取 $-0.47\% / \text{ }^\circ\text{C}$; T_C 为当前光伏电池板的表面温度;

T_r 为标准测试条件下的光伏电池温度,一般取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

由于实际工程中电池板的温度是很难进行测量的,一般是通过环境温度和光照强度进行估算。

$$T_C = T_{amd} + 0.03G \quad (3)$$

式中: T_{amd} 为环境温度; G 为光照强度。

1.3 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机的输出功率特性与燃料耗量、冷热功率、污染物排放等因素有关,其数学关系为:

$$\begin{cases} Q_{ho} = Q_{MT} \times \eta_{rec} \times COP_{ho} \\ Q_{co} = Q_{MT} \times \eta_{rec} \times COP_{co} \\ Q_{MT} = P_{MT} (1 - \eta_{MT} - \eta_l) / \eta_{MT} \\ \eta_{rec} = (T_1 - T_2) / (T_1 - T_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_{ho} 和 Q_{co} 分别表示为微型燃气轮机烟气余热提供的制热量和制冷量; Q_{MT} 为微型燃气轮机排气余热; η_{rec} 为微型燃气轮机烟气余热的回收利用效率; COP_{ho} 和 COP_{co} 分别表示为制热、制冷系数; P_{MT} 为输出功率; η_l 为散热损失系数; T_1 和 T_2 分别表示为余热烟气进入溴化锂制冷机的温度和余热烟气排出溴化锂制冷机的温度; T_0 为环境温度; η_{MT} 为发电效率。

其中,微型燃气轮机的发电效率 η_{MT} 与其输出功率 P_{MT} 的关系如下:

$$\eta_{MT} = 0.0753 \times (P_{MT}/65)^3 - 0.3095 \times (P_{MT}/65)^2 + 0.4174 \times (P_{MT}/65) + 0.1068 \quad (5)$$

为了满足冷/热负荷的需求,燃气轮机在实际工作中通常按照“以冷/热定点的方式运行”,根据以上公式可以计算出燃气轮机的出力大小。

1.4 燃料电池模型

燃料电池的输出功率与其容量无关,与质子交换膜燃料电池总效率呈负相关,它们的关系为:

$$\eta_{FC} = -0.0023P_{FC} + 0.6735 \quad (6)$$

式中: η_{FC} 为质子交换膜燃料电池总效率; P_{FC} 为输出燃料电池的输出功率。

1.5 蓄电池模型

针对铅酸蓄电池,其总容量与电池的状态关系密切。在 t 时刻蓄电池的容量 $E(t)$ 与上一时刻 $t-1$ 时段的容量 $E(t-1)$ 有关:

$$E(t) = \begin{cases} E(t-1)(1-\delta) + \Delta TP_{ch}(t)\eta_{ch} & \text{充电} \\ E(t-1)(1-\delta) - \Delta TP_{dis}(t)/\eta_{dis} & \text{放电} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $E(t)$ 为 t 时刻蓄电池总能量； δ 为蓄电池的自放电率，可以忽略； ΔT 为时间间隔； $P_{\text{ch}}(t)$ 和 $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻蓄电池充电功率和放电率； E_c 为蓄电池标称容量； η_{ch} 和 η_{dis} 分别为蓄电池充电效率和放电效率。

2 经济调度数学模型

为了得到较低的发电成本和实现良好的环境效益，在清洁能源优先利用的前提下，需要对微电网内部各位电源优化调度。

2.1 目标函数

1) 系统运行成本最低

为电网运行时需要考虑燃料成本、运行管理成本和与大电网电量交易成本以及制热收益等。即：

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T [C_f(t) + C_{\text{dp}}(t) + C_{\text{om}}(t) + C_g(t) + C_s(t)] \quad (8)$$

式中： F_1 为微电网的发电成本； T 为调度时段总数； $C_{\text{dp}}(t)$ 为折旧维护成本； $C_{\text{om}}(t)$ 为运行管理成本； $C_s(t)$ 为CHP系统的制热效益。

2) 系统的环保折算成本最低

系统的环保成本包括微电网中各分布式电源的排污处理费用和配主网的排污费用。

$$\min F_2 = C_{\text{DG},i-\text{EM}} + C_{\text{Grid}-\text{EM}} \quad (9)$$

式中： $C_{\text{Grid},i-\text{EM}}$ 为网络产生的污染处理费用； $C_{\text{DG},i-\text{EM}}$ 为微电网中分布式电源 i 的排污处理费用，其计算如下：

$$C_{i-\text{EM}} = \sum_{i=1}^N C_{\text{EM}i}(P_{it}) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^M \alpha_{ik} \times \lambda_{ik} \times P_{it} \right) \quad (10)$$

式中： $C_{i-\text{EM}}$ 为分布式电源 i 的污染物排放治理费用； N 为分布式电源的种类； M 为排放类型； α_{ik} 为分布式电源 i 对污染类型 k 为时的单元排污处理成本； λ_{ik} 为分布式电源 i 对污染类型 k 为时的排放系数； P_{it} 为分布式电源 i 在 t 时刻的输出功率。

3) 系统的综合效益成本最低

综合效益成本是综合考虑了微电网系统的运行成本和环保成本，其表达式为：

$$\min F_3 = F_1 + F_2 \quad (11)$$

式中： F_3 为微电网运行的综合效益。

2.2 约束条件：

在微电网运行过程中，需要遵守功率平衡定

律，各微电源的输出功率上下限值。除此之外，对于一些特殊的微电源而言，需要考虑能量转换速度、电池的充放电等限值。最终，在微电网运行过程中，需要考虑的约束条件可表示为：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{it} + P_{gr} = P_{Dt} \\ P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} \\ -R_{\text{MT},d}\Delta t \leq P_{\text{MT},i} - P_{\text{MT},i-1} \leq R_{\text{MT},u}\Delta t \\ P_l^{\min} \leq P_{gt} \leq P_l^{\max} \\ U_{\text{bat}} \leq N_{\text{bat}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_{it} 为发电类型 i 在 t 时刻的输出功率； P_{gr} 为 t 时刻联络线的交换功率； P_{Dt} 为 t 时刻微电网的负荷功率； P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为微网内微源的功率输出的最大值和最小值； $R_{\text{MT},d}$ 、 $R_{\text{MT},u}$ 为燃气轮机向下和向上的爬坡约束； P_l^{\min} 、 P_l^{\max} 分别为联络线上的上下限，取值为30 kW和-30 kW。 U_{bat} 和 N_{bat} 分别为蓄电池在一个调度周期内充放电状态转换次数和蓄电池充放电次数限值。

3 算例分析

本文所建立的电热联产型微电网算例中各微电源的配置如下：蓄电池SB的容量为100 kWh，额定充放电功率为20 kW。蓄电池荷电状态限值为 $\text{Soc}_{\min}=0.2$ 和 $\text{Soc}_{\max}=0.9$ ，充放电效率分别为 $\eta_{\text{ch}}=\eta_{\text{dis}}=0.9$ ， δ 忽略不计，充放电状态转换次数 $N_{\text{bat}}=3$ 次。风力发电为25 kW，光伏电池为10 kW，燃气轮机为75 kW，燃料电池为40 kW。风机发电成本0.52元/kWh，光伏发电成本0.75元/kWh，微型燃气轮机发电成本为0.28元/kWh，燃料电池发电成本为0.75元/kWh。微电网内的负荷有80%的关键负荷和20%的一般负荷。研究的周期为1天，单位时间间隔为1h。

微电网中风机光伏的最大出力状况受当地天气环境影响，在本算例中，光伏风机的最大出力如图1所示。

相应的微电网向电网输出的电价(购电电价)和电网输送到微电网的电价(售电电价)，如表1所示。

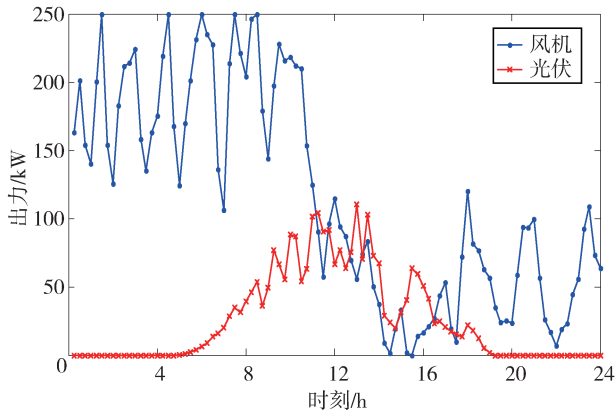


图1 风机光伏最大出力

Fig. 1 Wind turbines and photovoltaic maximum output

表1 虚拟电厂购售电价格

Tab. 1 Virtual power plant purchase and sale price

时段	购电/(元·kWh ⁻¹)	售电/(元·kWh ⁻¹)
峰时段(10:00-15:00, 18:00-21:00)	0.83	0.65
平时段(07:00-10:00, 15:00-18:00)	0.49	0.38
谷时段(00:00-07:00, 23:00-24:00)	0.17	0.13

1) 系统运行成本最低

以系统运行成本最低为目标的微电网运行调度结果如图2所示。

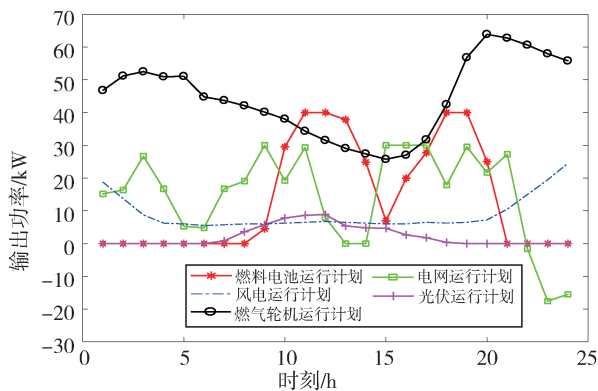


图2 目标函数1的微电网发电计划

Fig. 2 Microgrid generation plan of objective function 1

从图2中可以看出，在00:00-07:00期间，此时的微电网输出功率主要由燃气轮机提供，电网向微电网系统传输电能。由于燃料电池运行成本较高以及该时段的光照强度较弱，使得燃料电池和光伏发电的输出功率几乎为0；在07:00-10:00期

间，此时微电网输出功率主要由燃料电池和燃气轮机提供，电网向微电网传输电能。由于燃气轮机的成本较高，在有其他电源供电的条件下，其输出电能会逐渐减小。在10:00-15:00期间，电网电价高于燃料电池的发电成本，电网传输到微电网的电能下降，需要燃料电池增发功率；在15:00-18:00期间，电网电价进入平时段，电价低于燃料电池发电成本，电网增发，燃料电池功率下降；当到达晚上负荷高峰18:00-21:00时段，基于分时电价的引导，利用剩余的电能向微电网提供功率，此时电网电价高于燃料电池发电成本，燃料电池优先发电，但此时负荷较高，燃料电池满发仍不能满足负荷，电网增发。在21:00-23:00，燃料电池和电网功率逐渐下降。

2) 系统的环保折算成本最低

以系统的环保折算成本最低为目标的微电网运行调度结果如图3所示。

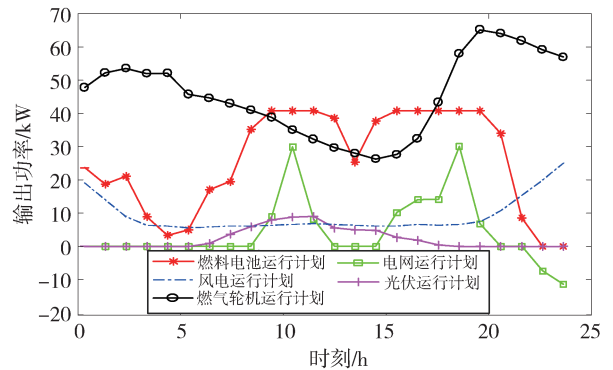


图3 目标函数2的微电网发电计划

Fig. 3 Microgrid power generation plan of objective function 2

从图3中可以看出，在00:00-07:00期间，此时的微电网输出功率主要仍由燃气轮机提供，电网与微电网系统之间几乎没有电能传输。在07:00-10:00期间，此时微电网输出功率主要仍由燃料电池和燃气轮机提供，电网向微电网传输电能。在10:00-15:00期间，此时所有的微电源参与供电，由于用电高峰，电网传输微电网的电能达到峰值。在15:00-18:00期间，由于光伏发电的能量较少，需要电网和其他的微电源供电。当到达晚上负荷高峰18:00-21:00时段，光伏发电几乎为0，风力发电逐渐提升，主要还是由燃气轮机供电。在21:00-23:00时段，燃料电池和电网功率逐渐下降，主要仍由燃气轮机供电。由于燃料电

池的污染成本较小,所以在该时段内,由燃料电池优先发电,若依旧不能满足负荷时,电网会向微电网传输功率。

3) 系统的综合效益成本最低

以系统综合效益最小为目标的微电网运行调度结果如图4所示。

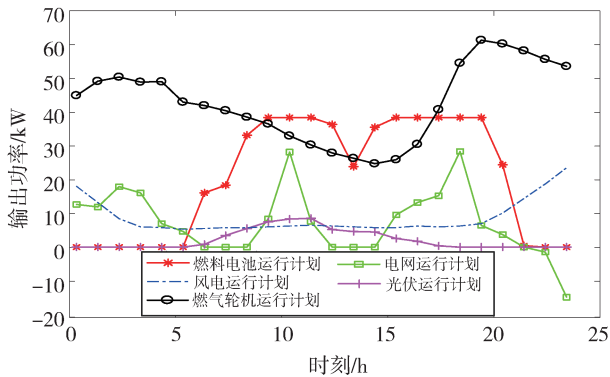


图4 目标函数3的微电网发电计划

Fig. 4 Microgrid generation plan of objective function 3

从图4中可以看出,在0:00-07:00时段,由于电网的综合效益成本低于燃料电池,该时段则由主网向微电网传输电能,以弥补功率缺额;在07:00-10:00时段,因为燃料电池的运行成本和环保成本均较低,因此燃料电池的功率增加;在10:00-18:00时段,燃料电池先发电,若无法满足用电缺额,则缺额部分由主网提供;在18:00-21:00时段,与上一调度时段类似,燃料电池仍然先发电,功率缺额则由主网提供;在21:00-23:00时段,新能源出力较多,用电负荷较少,向电网传输电能。

4) 对比分析

按照以发电为最低目标时,微电网的发电成本为1309.6元,环境成本为311.1元,综合效益为1620.7元;按照环境成本为最低目标时,微电网的发电成本为1361.3元,环境成本为251.4元,综合效益为1612.7元;按照综合效益为目标时,微电网的发电成本为1326.8元,环境成本为268.4元,综合效益为1595.2元。

目标2相比于目标1而言,其环境成本降低十分明显,约为19.19%,其发电成本增长了3.94%,总而言之,目标2的环境成本较低,同时其发电的经济性也比较低;目标3相比于目标1而言,其环境成本也有明显的降低,约为13.73%,

但其发电成本提高1.31%。目标2相比于目标3而言,其发电成本降低了2.6%,环境成本提高得较少,约为6.3%。

目标3为综合效益成本,即考虑发电成本又考虑环境成本,尽管这两种成本均不是最小值,但是微电网的整体综合效益成本最低,这种情况能够符合微电网的最优经济运行,具有较高的经济性与环保性。

4 结论

本文针对分布式电源的最优运行方案,提出了以发电成本、环境成本以及综合效益成本最低为目标,结合各分布式电源的出力限值的计算模型,根据实时电价分析了各分布式电源的实时处理情况。经过分析,可以得出如下结论:

1) 本文提出的优化方法,可以解决各种目标下的微电网优化问题,提供不同目标下的最优运行方案。

2) 要想控制微电网对环境的伤害,必然需要牺牲一定的经济性,发电成本和环境成本是相互矛盾的双方。

3) 随着电网的发展,今后需要运行成本、环保成本等多个角度共同考虑微电网的最优运行方案,如何平衡各个角度,将是以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 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.
WANG C S, LI P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14+23.
- [2] 童光毅,王梦真,杜松怀,等. 关于智能电网发展的几点思考[J]. 南方能源建设, 2018, 5(4): 21-28.
TONG G Y, WANG M Z, DU S H, et al. Some ideas on the development mode of smart grid [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(4): 21-28.
- [3] 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): 57-70.
YANG X F, SU J, LÜ Z P, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] PUDJIANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources [J]. Iet Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10-20.

[5] LU Z X, YE X, QIAO Y, et al. Initial exploration of wind farm cluster hierarchical coordinated dispatch based on virtual power generator concept [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 62-67.

[6] 刘利平, 郭文骏, 刘泽鑫. 南方五省区分布式电源对电网的影响分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 12-16.
LIU L P, GUO W J, LIU Z X. Impact analysis of distributed generation on power network in China southern five provinces [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(1): 12-16.

[7] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 80-86.

[8] 冉成科, 夏向阳, 杨明圣, 等. 基于日类型及融合理论的BP网络光伏功率预测 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 124-131.
RAN C K, XIA X Y, YANG M S, et al. BP network PV power forecast based on daily type and fusion theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(9): 124-131.

[9] 毛万成, 李勇, 彭衍建, 等. 光伏/微型燃气轮机混合微电网协调控制策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 26-33.

MAO W C, LI Y, PENG Y J, et al. Coordination control strategy for PV/micro-turbine hybrid micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 30(4): 22-29.

[10] 尹晓海, 任玉梁, 杜欣慧. 包含蓄电池储能和负荷转移的微网经济运行优化 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(19): 89-95.
YING X H, REN Y L, DU X H. Economic operation optimization for micro-grid with battery storage and load transfer [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(19): 89-95.

作者简介:



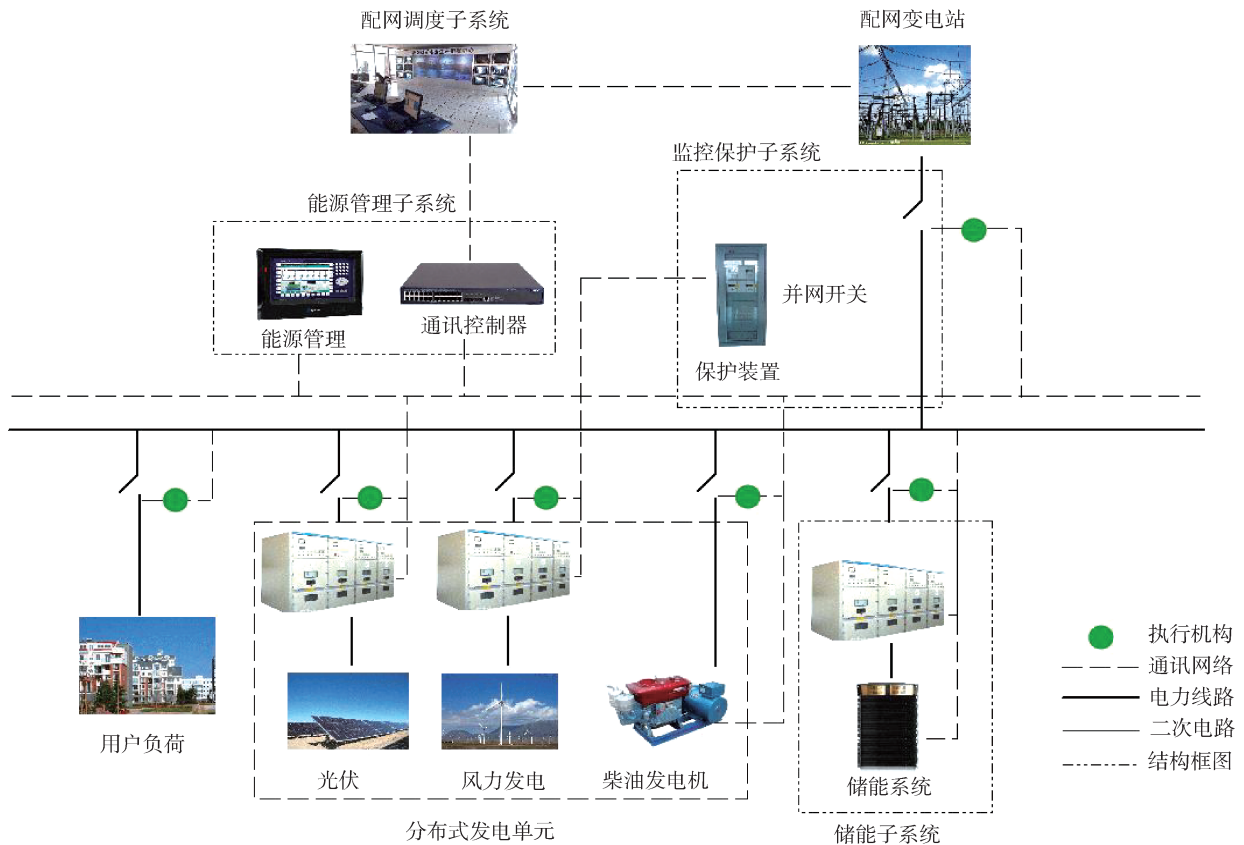
TANG L M

唐雷鸣(通信作者)

1985-，男，安徽阜阳人，工程师，广东电网有限责任公司湛江供电局质安专责，电气工程及其自动化专业，学士，主要从事电力质量安全管理及电网建设工作(e-mail) leiming3155@aliyun.com。

(责任编辑 李辉)

能源知识



分布式微电网结构图

(唐雷鸣)