

能源市场背景下含储能的光伏和热电联产评估

魏超,焦晓峰,刘永江,张爱军

(内蒙古电力科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 高效和清洁的能源利用模式是减少温室气体排放和提高能源网络效率的现实而经济的解决方案。最近越来越多的项目开始关注分布式能源资源,包括光伏(PV)板、热电联产(CHP)、燃料电池及储能系统,因为它们能够作为本地资源利用,以减少因长距离传输而造成的电力损失。提出了一种来评估负荷处的住宅分布式能源(DERs)系统,如 CHP, PV 系统和热/电储能系统的运行和经济性分析的数学模型,同时考虑能源和辅助服务市场。以此推动分布式能源的财务和弹性价值,并确定关键因素,如分布式能源组合以及电力和天然气配送公司的定价结构。最终得出结论,不同类型的能源电价将影响分布式能源项目的财务方面的问题。此外,研究结果还强调了储能系统激励计划在提高停电期间电网弹性方面的关键作用。

关键词: 热电联产;经济运行;光伏;储能;电力市场

中图分类号: TM46, TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22505

Evaluation of Photovoltaic and CHP with Energy Storage Under the Background of Energy Market

WEI Chao, JIAO Xiaofeng, LIU Yongjiang, ZHANG Aijun

(Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, Nei Monggol, China)

Abstract: Efficient and clean energy using model is a realistic and economical solution for reducing greenhouse gas emissions and improving the efficiency of energy networks. Recently, more and more projects focus on distributed energy resources, including photovoltaic (PV) panels, combined heat and power (CHP), fuel cells, and energy storage systems, as they can be utilized as local resources to reduce power losses due to long-distance transmission. A mathematical model was proposed to evaluate the operation and economic analysis of residential distributed energy resources (DERs) system at load, such as CHP, PV systems and thermal/electric energy storage systems, taking into account the energy and ancillary services markets. This was used to drive the financial and resilient value of distributed energy and to identify key factors such as the distributed energy mix, as well as the pricing structure of electricity and natural gas distribution companies. The conclusion has been obtained that different types of energy tariffs will affect the financial aspects of distributed energy projects. In addition, the results highlight the key role of energy storage system incentive programs in increasing grid resilience during outages.

Key words: combined heat and power (CHP); economic operation; photovoltaic (PV); storage; electricity market

未来的电网需要更加先进的控制技术,以将可再生能源发电系统与工业园区和住宅分布式能源(distributed energy resources, DERs)系统稳定且高效地整合^[1]。分布式能源系统指的是可控式能源发电系统,直接位于终端用户附近或连接到本地的电力系统。分布式能源系统包括储能系统、去中心化可再生能源发电系统和去中心化不可再生发电系统、需求响应以及微电网。分布式能源系统的兴起促使许多股东和公用事业高管

考虑将分布式能源系统引入其系统,从而为其创造价值。分布式能源系统的主要优势在于提高对本地能源的使用率,从而实现高效、可靠地配电,减少碳排放,并在需求高峰时期实现削峰。这些因素以及需求响应、负载转移和储能之类的能源管理策略将是构成向智能电网过渡的必要条件。

针对热电联产(combined heat and power, CHP)和分布式电源并存引起的新能源消纳问题,许多学者利用电储能设备提高机组调节能力,或通过

储热、电锅炉和热泵等实现热电联产机组的热电解耦运行^[2]。文献[3]分析了热电联产机组配置储热前后运行特性与调峰能力的变化情况,建立了含储热的电力系统电热联合优化调度模型;文献[4]构建了包含储热的热电联产机组、电供热系统的调度模型,将储热纳入包含风电的电力系统有功调度体系;文献[5]提出基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型,提出极限消纳弃风电量的电锅炉供热量计算方法。

对于规划人员而言,研究热电联产机组和储能以及分布式电源之间最佳的规模和调度计划是非常必要的,而且是辅助管理一个区域内电能需求的重要工具。文献[6-8]研究表明:配备有分布式能源系统和可再生能源系统的热电联产微电网可以高效地解决能源相关的经济环境问题。在本研究中,构建了一个简化的决策模型,以计算出最佳流量和容量;该模型聚焦于经济方面和能源市场中可能的收益来源。详细介绍了能源终端用户、其需求负荷形态和电力公用事业的定价要素,以及作为关键因素在很大程度上决定了分布式能源系统最佳容量和运营策略的激励计划,从而建立具有成本效益的弹性智能电网,确定了会影响特定消费者表内收益的关键因素。

本文具体结构如下:第1节构建了结合热电联产和热/电储能系统的光伏优化模型并对系统成本与频率调节(frequency regulation, FR)、储备市场和净计量所带来的收入流进行了评估和比较。该优化模型包括提高系统弹性,并同时考虑了电网中断时所需的备用电源(以弹性为基础)而进行了优化。然后,在第2节中,以大型智能工业园区为对象进行了案例研究,比较了电力和燃气公司不同类型的能源费率及蓄电池不同容量情况下园区运行的经济性,验证了所提方法的有效性。

1 研究方法

在本文中,采用了混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)模型^[9],该模型是这一研究方向中最常使用的一种方法。尽管线性模型和混合整数线性模型在准确性方面逊色于非线性模型和混合整数非线性模型,但通常可以为这些类型的问题提供快速的解决方案。本文所提出的最优化模型由结合热电联合系统的光伏系统组成,该模型可以对净计量电价进行

探究,以满足电热需求负荷。本研究的目的在于计算能源总成本以及失电临界负荷,并为各个应用分别解决这一问题。

1.1 经济目标函数

总成本的目标函数为

$$\min Obj_{econ} = \sum (C_t^E + C_t^{NG} + C_t^{CHP} - R_t^{NM} - R_t^{FR} - R_t^{SR}) \quad (1)$$

$$C_t^E = Pr_t^{elec} (e_t^{dem,g} + e_t^{ch,g}) \quad (2)$$

$$C_t^{NG} = Pr_t^{NG} (h_t^{dem,g}) \quad (3)$$

$$C_t^{CHP} = \begin{cases} Pr_t^{NG} \left(\frac{e_t^{CHP}}{\eta_t^{CHP}} \right) + \alpha_{st} & e_t^{CHP} > 0, e_{t-1}^{CHP} = 0 \\ \alpha_{st} & e_t^{CHP} = 0, e_{t-1}^{CHP} > 0 \\ Pr_t^{NG} \left(\frac{e_t^{CHP}}{\eta_t^{CHP}} \right) & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_t^E 为设备电费; C_t^{NG} 为天然气费; C_t^{CHP} 为与热电联产系统相关的运营成本; R_t^{NM} 为出清费用; R_t^{FR} 为调频服务费用; R_t^{SR} 为旋转备用服务费用; Pr_t^{elec} 为 t 时刻的电价; $e_t^{dem,g}$, $e_t^{ch,g}$ 分别为满足电力需求时发动机出力及储能装置中的电量; Pr_t^{NG} 为天然气价格; $h_t^{dem,g}$ 为满足供热需求的发电机出力; e_t^{CHP} 为热电联产所产生的电能; η_t^{CHP} 为部分负荷率; α_{st} 为热电联产机组的启停费用。

在式(4)中,热电联产所产电能将首先被用于满足设备的电能需求,而节余电能会被储存在储能设备中。

在该模型中,可以通过将电能直接从光伏或蓄电系统出售给电网来实现净计量电价。在频率调节应用中,假定由于电池的快速响应,其可以通过能力约定和绩效收益来参与快速调节市场,从而产生收益。

1.2 系统弹性目标函数

增强系统弹性是为了在电力中断期间服务于关键负载^[10]。为了最大程度地降低临界负载损失,惩罚结构被指定为临界负载损失。由于系统已与电网断开,因此不再提供净计量电价和相关的辅助服务。

$$\min Obj_{Resiliency} = \sum_t [M_t^{pen} (CL_t^{unserved})] \quad (5)$$

其中

$$CL_t^{unserved} = CL_t^{total} - e_t^{CHP,dem} - e_t^{PV,dem} - e_t^{ES,dem} \quad (6)$$

式中: $CL_t^{unserved}$ 为 t 时刻临界失电负荷; CL_t^{total} 为临界总负荷; $e_t^{CHP,dem}$, $e_t^{PV,dem}$, $e_t^{ES,dem}$ 分别为热电联产机组、光伏发电机组、电储能满足电力需求的功率; M_t^{pen} 为 t 时刻惩罚成本。

1.3 约束条件

1.3.1 设备的功率平衡约束

在正常运行期间,需要满足设施的电能和热能需求,因此可得:

$$D_t^e - e_t^{\text{dem,g}} - e_t^{\text{CHP,dem}} - e_t^{\text{PV,dem}} - e_t^{\text{ES,dem}} = 0 \quad (7)$$

式中: D_t^e 为电能需求。

对于热能需求,可以通过下式计算获得:

$$D_t^h - h_t^{\text{dem,g}} - h_t^{\text{CHP,dem}} - h_t^{\text{TS,dem}} = 0 \quad (8)$$

式中: D_t^h 为热能需求; $h_t^{\text{CHP,dem}}$ 为满足热需求的CHP机组出力; $h_t^{\text{TS,dem}}$ 为 t 时刻满足热需求的储热装置出力。

1.3.2 热电联产的运行约束

热电联产系统产生的电能和热能会被首先用于满足设施的电热能需求,而多余的能量将会被储存在电力储存和热能储存设备中。因此有:

$$e_t^{\text{CHP,dem}} + e_t^{\text{CHP,ES}} = e_t^{\text{CHP}} \quad (9)$$

$$h_t^{\text{CHP,dem}} + h_t^{\text{CHP,TS}} = h_t^{\text{CHP}} \quad (10)$$

式中: $e_t^{\text{CHP,ES}}$ 为 t 时刻从CHP机组流向储电装置的电功率; $h_t^{\text{CHP,TS}}$ 为 t 时刻从CHP机组流向储热装置的热功率。

热电联产的最大输出功率为其额定容量,也是与市场的约定容量,此外,如果热电联产的出货量低于下限阈值,其将会被关闭。热电联产运行限制条件如下式:

$$P_{\min}^{\text{CHP}} + FR_t^{\text{CHP}} \leq e_t^{\text{CHP}} \leq P_{\max}^{\text{CHP}} - FR_t^{\text{CHP}} \quad (11)$$

式中: $P_{\max}^{\text{CHP}}, P_{\min}^{\text{CHP}}$ 分别为热电联产的最大输出功率、最小输出功率; FR_t^{CHP} 为 t 时刻CHP机组的可调容量。

热电联产系统热能 h_t^{CHP} 的产生依赖于原动机以及热电联产产生的电能:

$$h_t^{\text{CHP}} = \frac{e_t^{\text{CHP}}}{r_t^{\text{CHP}}} \quad (12)$$

其中 $r_t^{\text{CHP}} = f_h\left(\frac{e_t^{\text{CHP}}}{P_{\max}^{\text{CHP}}}\right)$ (13)

式中: r_t^{CHP} 为热电功率比,取决于原动机的技术; $f_h(\cdot)$ 为热电联产机组的热电比函数。

此外,部分负荷率 η_t^{CHP} 和 r_t^{CHP} 均是指原动机的规格,可以定义为

$$\eta_t^{\text{CHP}} = f_e\left(\frac{e_t^{\text{CHP}}}{P_{\max}^{\text{CHP}}}\right) \quad (14)$$

式中: $f_e(\cdot)$ 为机组综合效率函数。

假定 $f_h(\cdot)$ 和 $f_e(\cdot)$ 两个多项式函数的次数为1。

1.3.3 蓄电设备的制约因素

蓄电装置的总流入电量和流出电量受其额定

容量的限制:

$$e_t^{\text{ES,dem}} + e_t^{\text{ES,g}} + e_t^{\text{CHP,ES}} + e_t^{\text{PV,ES}} + e_t^{\text{ch,g}} \leq P_{\max}^{\text{ES}} \quad (15)$$

式中: $e_t^{\text{ES,g}}$ 为从电储能流向的电网功率; $e_t^{\text{PV,ES}}$ 为从光伏对电储能充电的功率。

在蓄电装置中,其能量(被定义为充电状态SOC,单位为kW·h)从一个时间步移向下一个时间,而且其蓄电量在每个时间步结束后都会根据被充放电能的量而进行更新。

$$SOC_t^{\text{ES}} = SOC_{t-1}^{\text{ES}} + \eta_t^{\text{ES,h}}(e_t^{\text{CHP,ES}} + e_t^{\text{PV,ES}} + e_t^{\text{ch,g}}) - \frac{e_t^{\text{ES,dem}} + e_t^{\text{ES,g}}}{\eta_t^{\text{ES,dis}}} \quad (16)$$

式中: $\eta_t^{\text{ES,h}}, \eta_t^{\text{ES,dis}}$ 分别为电储能装置的充放电效率,他们会随着电储能设备的老化而降低; SOC_t^{ES} 为 t 时刻电储能装置的荷电状态。

显而易见,蓄能装置的蓄能量不能超过其最大容量。此外,蓄能装置应留出20%的安全储备容量。再者,在考虑蓄能系统运行的制约因素时,应将市场中的承诺容量考虑在内,因此可得:

$$0.2 \times E_{\max}^{\text{ES}} + FR_t^{\text{ES}} \leq SOC_t^{\text{ES}} \leq E_{\max}^{\text{ES}} - FR_t^{\text{ES}} \quad (17)$$

1.3.4 储热设备的制约因素

TS装置充放热的总量受限于装置自身的特点:

$$h_t^{\text{CHP,TS}} \leq Q_{\max}^{\text{TS,ch}} \quad (18)$$

$$h_t^{\text{TS,dem}} \leq Q_{\max}^{\text{TS,dis}} \quad (19)$$

式中: $h_t^{\text{CHP,TS}}$ 为CHP机组给储热装置提供的热能; $Q_{\max}^{\text{TS,ch}}$ 为储热装置的最大储热容量; $h_t^{\text{TS,dem}}$ 为储热装置向负荷提供的热量; $Q_{\max}^{\text{TS,dis}}$ 为储热装置最大放热容量。储热装置中的热能级从一个时间移动到下一时间。储热量会在每个时间步长结束时根据充放热能的量进行更新:

$$SOC_t^{\text{TS}} = \eta_t^{\text{TS,store}} \times SOC_{t-1}^{\text{TS}} + \eta_t^{\text{TS,ch}} \times (h_t^{\text{CHP,TS}}) - \frac{h_t^{\text{TS,dem}}}{\eta_t^{\text{TS,dis}}} \quad (20)$$

式中: SOC_t^{TS} 为 t 时刻储热装置的等效荷电状态; $\eta_t^{\text{TS,store}}$ 为储热装置的热电转化效率; $\eta_t^{\text{TS,ch}}, \eta_t^{\text{TS,dis}}$ 分别为储热装置的储/放热效率。

$\eta_t^{\text{TS,store}}$ 会随着热储能设备的老化而降低。另外,储热装置中存储的热能不能超过其最大容量,即

$$0 \leq SOC_t^{\text{TS}} \leq E_{\max}^{\text{TS}} \quad (21)$$

1.3.5 光伏系统的制约因素

可再生装置中产生的电用于满足电力需求并为蓄电装置充电:

$$P_t^{\text{PV}} \geq e_t^{\text{PV,dem}} + e_t^{\text{PV,ES}} \quad (22)$$

请注意,光伏系统产生的电量可根据太阳辐射

和已安装光伏系统的标称容量用函数进行计算。

2 算例分析

本研究选取了一个位于新泽西州的一家中型工业园区建筑作为研究对象,该建筑是一个单排工业园区,其数据可从能源部能源消耗参考数据库中获得。在此案例研究中,所有估算值都是基于该面积为 29.89 km² 的大型智能工业园区,其每年的电力消耗为 32 956 689 kW·h 和天然气消耗为 87 500 000 m³。该建筑物的电热需求概况,如图 1 所示。可以看出,业区的电需求和热需求并无关联。

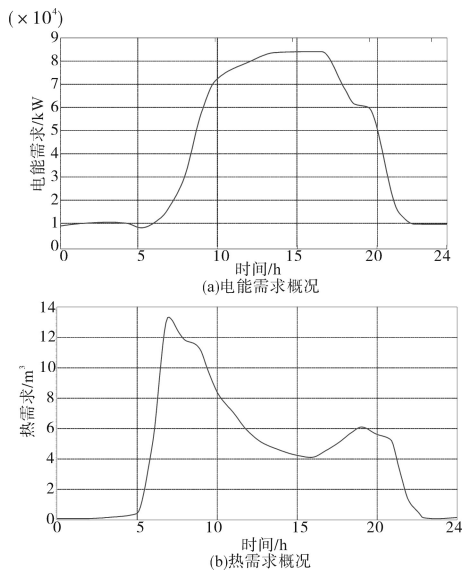


图 1 一个典型工业园区平均每天每小时能源需求情况

Fig.1 Energy demand per hour per day for a typical industrial park

根据 EnergyPlus 建筑模拟工具,将关键负载指定为每个最终用途关键部分的一个百分比值,详见表 1。热电联产原动机特性如表 2 所示。

表 1 关键负载占该工业园区各最终用途关键部分的百分比

Tab.1 Percentage of critical loads in each end use critical part of the industrial park area

最终用途	采暖	降温	内部照明	外部照明	内部设备	风扇
实际负荷百分比/%	80	80	50	10	50	80

表 2 热电联产原动机特性

Tab.2 Characteristics of prime mover for CHP

原动机	平均电效/%	热电平均转换率	总效率/%	运营周期内平均安装和维护费用/(元·kW ⁻¹)
燃料电池	47	0.87	87.9	9 500
往复式发动机	38	1.3	87.4	5 500

2.1 光伏-电池储能系统(PV-ES):

针对不同蓄电配置本文分析了光伏-电储能系统的弹性和经济目标。假定光伏系统的装机容量可满足年用电量的 80%。对于电池蓄电系统,将额定容量分为峰值临界负载的 50% 和 100% 进行考虑。此外,对于每个额定容量,持续时间参数被设定在 30 min~5 h 范围内。图 2 为蓄电池占比 50%,100% 时净现值以及一个典型工业园区设施关键需求的百分比。

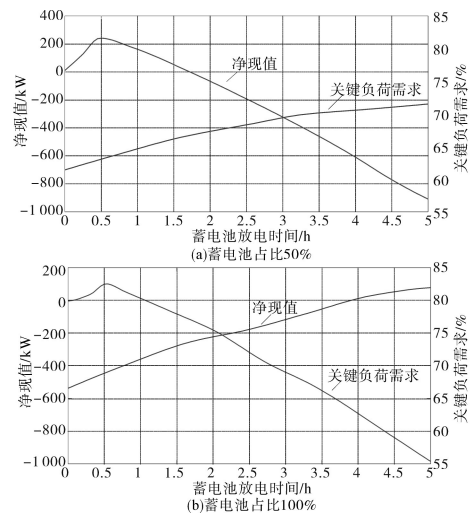


图 2 不同蓄电池占比情况下园区用电需求

Fig.2 Power demand of the park under different battery proportions

如图 2 所示,已安装系统在区域内获得了更多收入。这是因为在 PV 高峰时段之后,该工业园区仍保持较高的消费量。因此,如果供电公司 1 的按需电费设定得很高的话,蓄电池就可以创造更多价值。

2.2 热电联产、蓄电池及储热系统(CHP-ES-TS)

对于每种热电联产技术,考虑了两种不同的设计方法:基于设施电力需求的最大矩形方法和基于设施热需求的最大矩形方法。此外,具体分析了位于新泽西州一个典型的工业园区,以探究采用不同原动机技术和尺寸大小可为不同配置的 CHP-ES-TS 系统节约的成本以及带来的收益。

表 3 为案例研究结果,该案例研究考虑了不同热电联合原动力、不同配电公司和配气公司以及各种储能系统容量。表 3 说明了节能情况、调节增加值、以及安装电储能系统对表 3 案例的影响。结果表明,采用基于热需求的第二种设计方法,可以建立一个庞大的系统,进而显著增加年收益。如表 4 所示,该方法能源成本节约的贡献

度更高(见成本节约百分比)。这是因为电需求和热需求是不相关的(见图1),白天过多的热量可以存储在储热设备中,并在清晨(热需求的高峰时间)进行使用。这种现象使大型蓄能系统在节约能源成本方面更具优势。

表3 CHP-ES-TS特性
Tab.3 CHP-ES-TS characteristics

编号	CHP原动机	EDC	GDC	CHP额定 上限/kW	电池容量 上限/kW	储热上限
1	燃料电池	1	1	49.10	49.10	0.48
2	燃料电池	1	1	253.90	253.90	2.48
3	燃料电池	2	2	49.10	49.10	0.48
4	燃料电池	2	2	253.90	253.90	2.48
5	燃料电池	3	2	49.10	49.10	0.48
6	燃料电池	3	2	253.90	253.90	2.48
7	往复式发动机	1	1	49.10	49.10	1.13
8	往复式发动机	1	1	107.91	107.91	2.49
9	往复式发动机	2	2	49.10	49.10	1.13
10	往复式发动机	2	2	107.91	107.91	2.49
11	往复式发动机	3	2	49.10	49.10	1.13
12	往复式发动机	3	2	107.91	107.91	2.49

表4 该工业园区区的CHP-ES-TS经济效益
Tab.4 Economic benefits of CHP-ES-TS in the industrial park

编号	能源节约 成本	能源节约 成本/%	调节 附加值	储能年度 附加值	能回报期限/ a
1	3 511	12.41	2 941	6 452	4.32
2	24 195	43.05	17 857	42 053	2.44
3	2 234	11.20	2 940	5 175	5.39
4	16 637	40.22	17 906	34 543	2.97
5	2 447	11.94	2 955	5 402	5.16
6	24 898	50.17	17 906	42 804	2.40
7	3 465	11.61	2 880	6 345	4.55
8	6 734	22.36	7 588	14 322	3.60
9	2 256	10.68	2 886	5 142	5.62
10	4 705	21.48	7 611	12 317	4.18
11	2 415	11.17	2 943	5 359	5.39
12	6 817	28.39	7 625	14 442	3.57

3 结论

在本研究中,对于热电联产,光伏系统和热/电储能等分布式能源系统的运营和财务进行了

分析和评估。本文的目标在于识别影响分布式能源系统组合,配电和配气公司的分布式能源系统财务和弹性价值的因素,并结合具体案例对这些因素进行评估。最终,研究表明,不同的分布式能源系统技术和配置对设施中热电联产系统的经济附加值有很大的影响。研究显示,由于热能需求情况和电能需求情况之间的不相关性,蓄能系统结合热电联产系统可以降低能源成本。同时通过对蓄能系统的激励计划,能够增强电网在停电期间的弹性。

参考文献

- [1] 吴鸣,徐斌,季宇,等.输配协同分布式电源最大接入容量计算方法[J].电网技术,2019,43(11):3883-3890.
- [2] Yang Y, Wu K, Long H, *et al.* Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China [J]. Energy, 2014, 78: 235-246.
- [3] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.含储热的电力系统电热综合调度模型[J].电力自动化设备,2014,34(5):79-85.
- [4] 陈磊,徐飞,王晓,等.储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4283-4290.
- [5] 崔杨,陈志,严干贵,等.基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4072-4081.
- [6] Marano V, Rizzo G, Antonio F, *et al.* Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage[J]. Energy, 2012, 4(97): 849-859.
- [7] Ren H, Gao W. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems[J]. Energy, 2010, 87(3): 1001-1014.
- [8] Ren H, Zhou W, Gao W, *et al.* Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects[J]. Energy, 2010, 87(12): 3642-3651.
- [9] 贾龙,胡泽春,宋永华,等.储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):73-84.
- [10] 鞠平,王冲,辛焕海,等.电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J].电力自动化设备,2019,39(11):1-7.

收稿日期:2020-09-30
修改稿日期:2020-11-15