

时间尺度对建筑可再生能源系统负荷匹配特性的影响分析

封换换, 赵 军, 邓 帅, 安青松

(中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津大学, 天津 300350)

摘 要: 以建筑可再生能源系统为研究对象,选取天津气象条件下一单层住宅建筑进行分析,利用TRNSYS模拟建筑可再生能源系统(RES),分析在年、月、时不同的时间尺度下可再生能源系统的负荷匹配特性。研究表明:该系统在全年时间尺度下能够100%满足负荷需求,而在月和小时研究尺度下负荷满足率均不足55%。因此,时间尺度的选择,直接影响可再生能源蓄能容量选择、控制优化和近零能耗评价等,需在设计、运行和评价等建筑全生命周期内的关键环节进行明确。

关键词: 能源系统; 光伏; 风电; 负荷匹配; 时间尺度; TRNSYS

中图分类号: TK01*9

文献标识码: A

0 引 言

太阳能、风能等可再生能源在建筑能源系统的应用比例正逐步提高^[1,2]。但可再生能源存在间歇性、不稳定性这些制约其可大规模发展的瓶颈问题,另外低/零能耗创新概念的提出,使建筑从能源消耗者变为生产者。这些问题及机遇都对建筑能源系统的设计、运行及评价提出挑战,故催生了匹配性的研究主题。匹配性指建筑负荷与可再生能源供能之间的匹配程度,是建筑能源系统性能考察以及提高可再生能源应用比例的重要技术参数,也成为近年来的研究热点^[3]。

国际能源署(IEA)关于太阳能零能耗建筑的研究已将建筑负荷与供能系统的匹配性列为要点之一^[4]。文献[5]详述了负荷匹配指标的数学表达和意义。文献[6]通过该指标进行蓄电池容量优化,从而提高可再生能源自消费比例。文献[7]基于负荷匹配基本指标,衍生不同能量形式的拓展指标。国内针对建筑可再生能源系统研究集中在优化配置方面^[8]。文献[9]则讨论不同时间步长下的负荷匹配指标,并进行误差分析。关于负荷匹配特性,少有研究针对不同时间尺度下该特性进行比较分

析,明确该参数在工程中的指导意义。鉴于此,本文利用TRNSYS建立家庭独户式建筑的可再生能源系统,针对天津市气象条件下建筑可再生能源系统的运行状况,进行不同时间尺度下负荷匹配特性的分析。通过量化负荷匹配分析,一方面通过不同时间尺度、不同周期下匹配性分析,可明确零能耗评价、运行策略制定等研究应采用的时间尺度;另一方面可利用负荷匹配评价指导建筑可再生能源系统的设计,包括发电系统、蓄能系统的选型等。

1 研究模型

1.1 系统描述

如图1所示,本文家庭独户式建筑可再生能源系统主要由3个子系统组成:光伏阵列和小型风力发电机组成的可再生能源发电系统(REP)、蓄电池和控制器组成的储能系统(BES)以及空调和家用电器等用电负荷组成的建筑服务系统(BSS)。图中, $L_{ren,load}$ 为可再生能源供给负荷端电量、 $D_{ren,dump}$ 为可再生能源发电废弃电量、 $S_{bat,load}$ 为蓄电池供给负荷端电量、 $S_{ren,bat}$ 为可再生能源给蓄电池充电量和 $G_{grid,load}$ 为电网供给负荷端电量。

收稿日期: 2016-07-27

基金项目: 国家高科技研究发展(863)计划(2015AA050403); 天津建交委科技项目(2017E6-0013)

通信作者: 邓 帅(1981—)男, 博士、讲师, 主要从事分布式能源系统和零能耗建筑等方面的研究。SDeng@tju.edu.cn

2.2 性能参数

负荷匹配通常是用来描述与建筑负荷需求相比,建筑能源系统本址发电量的利用程度。为了便于定量研究负荷匹配关系,尽管存在各种不同的称谓^[3,5],学术界通常有2个基本参数——本址发电满足负荷占比(OEI)和本址能源自消费占比(OEM),分别如式(3)和式(4)所示。图3形象地阐释了二者的定义^[14],其中, OEI 的定义是面积III比面积I与III之和; OEM 则是面积III比面积II与III之和。

$$OEI = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \min[G(i); L(i)] \Delta t}{\sum_{i=t_1}^{t_2} L(i) \Delta t}; 0 \leq OEI \leq 1 \quad (3)$$

$$OEM = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \min[G(i); L(i)] \Delta t}{\sum_{i=t_1}^{t_2} G(i) \Delta t}; 0 \leq OEM \leq 1 \quad (4)$$

式中, $G(i)$ ——本址发电量,kW; $L(i)$ ——建筑负荷,kW; Δt ——时间步长; t_1 ——研究起始时间; t_2 ——研究终止时间。时间 t 的单位可以是s、min、h等不同时间步长。

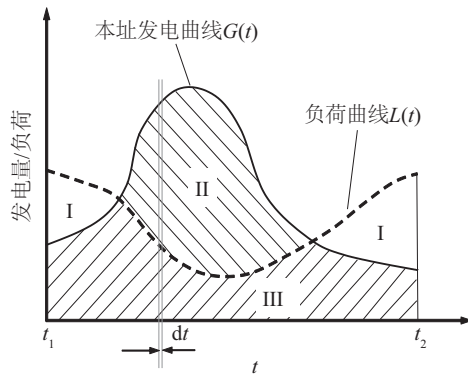


图3 负荷匹配基本评价指标定义^[14]

Fig. 3 Definition of basic load matching indices^[14]

考虑本文所建可再生能源系统及其运行策略,结合上述能量平衡方程和负荷匹配基本评价指标,构建负荷匹配拓展指标,如式(5)和式(6)所示。

$$OEI' = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \min[G(i) - S(i) - D(i); L(i)] \Delta t}{\sum_{i=t_1}^{t_2} L(i) \Delta t}; 0 \leq OEI' \leq 1 \quad (5)$$

$$OEM' = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \min[G(i) - S(i) - D(i); L(i)] \Delta t}{\sum_{i=t_1}^{t_2} G(i) \Delta t}; 0 \leq OEM' \leq 1 \quad (6)$$

式中, $S(i)$ ——蓄电池充放电电量,kW 充电取正,放电取负; $D(i)$ ——废弃掉的可再生能源发电量,kW。

如前所述,影响负荷匹配评价指标的重要因素之一,是选取的时间尺度。在全年尺度下进行系统产能与耗能的平衡分析是能源系统匹配性研究最简单最基本的考量^[3]。这类分析也往往是零能耗建筑或近零能耗建筑定义中所要求的^[15]。但是,由于可再生能源的不稳定性以及匹配评价精度要求的提高,以年作为研究时间尺度在实践中往往并不能满足运行要求,体现在建筑能源系统在全年大时间尺度下满足供需平衡的案例,在更小时间尺度上不一定能满足^[16]。更多研究者为提高匹配评价的精度,将时间尺度缩小到月、日、小时甚至更小的时间尺度^[17,18]。因此,本文也将针对不同时间尺度进行能源系统匹配性分析。

3 建筑可再生能源系统匹配性评价

3.1 不同时间尺度匹配性评价

基于以上系统模型,进行可再生能源系统的全年发耗电模拟。可再生能源发电主要包括光伏和风力发电,建筑耗电主要包括空调耗电、送风机耗电以及家电耗电,其中家电耗电一项基于中国典型家庭家用电器实时使用情况统计,是非供暖季和非制冷季时的主要耗电项,全年8760h累积发耗电模拟结果如图4所示。

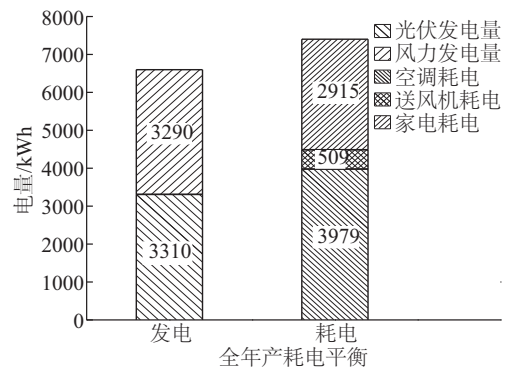


图4 建筑可再生能源系统全年匹配性分析

Fig. 4 Annual matching analysis of RES

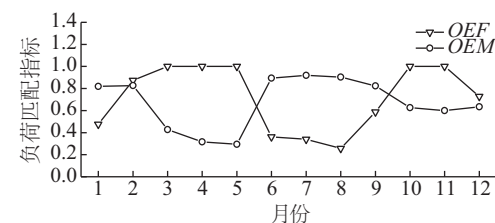
3.1.1 “年”时间尺度下的匹配性

通过模拟计算,得到全年尺度下的系统能量匹配分析结果(图4),家庭全年累积耗电约为7403 kWh,安装容量分别为2和5 kW的光伏和风电总发电量约为6600 kWh。因此在全年尺度下,本址发电满足

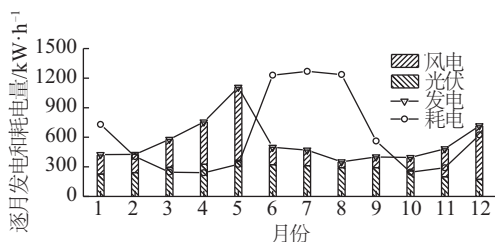
负荷占比为 0.89。在此种情景下,家庭独户式可再生能源系统能够满足家庭大部分的电负荷,具有较好的匹配性能。

3.1.2 “月”时间尺度下的匹配性

当以月作为研究的时间尺度时,负荷匹配指标 OEI' 和 OEM' 全年逐月动态变化如图 5a 所示;系统逐月累积发电和耗电量如图 5b 所示,柱状图分别表示光伏和风力机发电量。可再生能源发电系统中,光伏在夏季发电量要多于冬季,风电则在过渡季时发电量较大,导致总发电曲线的随机波动性。而在过渡季时,空调系统未开启,使得过渡季耗电明显低于冬季和夏季,夏季由于空调开启时间较长,使得制冷耗电要大于冬季供热耗电。



a. “月”时间尺度符合匹配指标



b. 逐月累积发、耗电量

图 5 可再生能源系统逐月匹配性分析

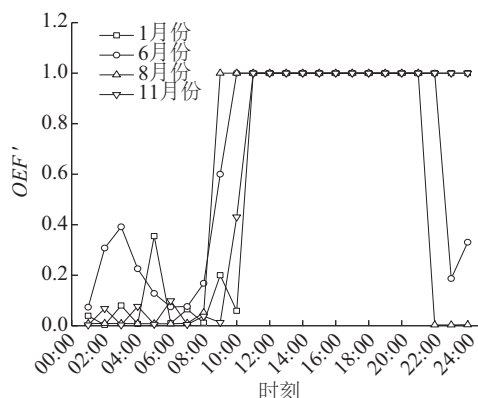
Fig. 5 Monthly matching analysis of RES

建筑可再生能源系统发电、耗电特性决定了系统的匹配性能。从图 5a 可看出,本址发电满足负荷占比指标 OEI' 在过渡季要高于供暖制冷季,甚至达到 1,意味着在过渡季时,可再生能源发电可完全满足家庭耗电,但此时,本址发电自消费指标 OEM' 却较低,大部分可再生能源发电在过渡季时被废弃掉。在非过渡季时, OEM' 可达到较高的水平,而 OEI' 则较低,可再生能源发电并不能完全满足家庭耗电,需从市电补充。因此,在过渡季时,可考虑从可再生能源发电侧进行调整,以调高系统匹配性能,如当有多种能源互补时,可在过渡季关闭部分可再生能源发电系统。在非过渡季时,为避免增加可再生能源发电成本,可在负荷侧进行管理,

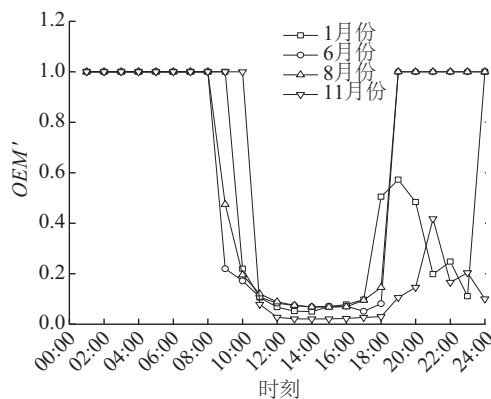
利用不同的节能技术和手段来降低耗电量,从而提高系统可再生能源供能比例和自消费比例。

3.1.3 “小时”时间尺度下的匹配性

国内现有研究多以年和月作为研究时间尺度,为了更精确地进行可再生能源系统负荷匹配评价,本文以小时作为研究时间尺度,选取 4 个典型日进行 OEI' 和 OEM' 逐时匹配动态分析,结果如图 6 所示。由于住宅建筑夜间比白天耗电量大的电负荷特性,白天时,可再生能源发电主要用来提供电负荷小且固定的家用电器耗电量,所以 OEI' 值较大,同时可再生能源发电用来给蓄电池充电,但由于蓄电池的容量有限,并不能无限制充电,所以白天自消费比例 OEM' 的值较小,基本在 0.60 以下。夜间时,处于家庭用电高峰期,此时电源只有风力发电机以及蓄电池,由于有蓄电池白天蓄存的电能, OEI' 值较大的时间可延续至 22:00,有效错过夜间市电的用电高峰。而在次日凌晨,由于可再生能源发电只有风电,蓄电池蓄电量较小,不能满足家庭用电需求, OEI' 值较小,此时需从市电来补充电能,持续时间约为 7 h。



a. OEI' 典型日逐时变化



b. OEM' 典型日逐时变化

图 6 典型日 RES 负荷匹配分析

Fig. 6 Daily matching analysis of RES

由此,通过小时尺度下对可再生能源系统的匹配性分析可了解到系统产能、耗能以及蓄能之间的实时变化关系,由此可针对不同时段的匹配性能提出不同的策略。在白天时,可通过给电瓶车充电等需求侧管理手段使 OEM' 最大化;而在夜间,为使 $OE'F$ 值增大,可适当增大蓄电池容量或降低负荷端用电。

3.2 时间尺度对匹配结果影响分析

通过年、月、时 3 种不同时间尺度下匹配性分析可看出, $OE'F$ 和 OEM' 的值随着时间尺度的减小而减小,但其精确度却在增加。年和月时间尺度适用于宏观性的评价,而小时时间尺度适用于制定精确到单天运行策略等评价中。

针对同一套可再生能源系统,全年累积耗电量定为 7403 kWh,通过改变光伏板并联数量来调整光伏安装容量,其中安装容量为 2 kW 光伏对应的光伏板并联数量为 8 个。图 7 显示了全年运行周期,不同研究时间尺度下,改变光伏安装容量时,经过能量储存等环节后可再生能源供电量的变化,可进一步分析时间尺度对负荷匹配的影响。曲线 C 表示以年作为研究时间尺度时,光伏并联数量超过 9 个时,可 100% 满足家庭负荷需求;曲线 B 表示研究时间尺度为月时,全年累积本址发电满足负荷占比 $OE'F$ 不足 0.55;最后,曲线 A 以小时作为匹配性研究时间尺度, $OE'F$ 最大不超过 0.45。由此可见,当以更小精度的时间尺度研究匹配性时,更能体现可再生能源系统的实际匹配性能,从而制定更合适的运行策略。

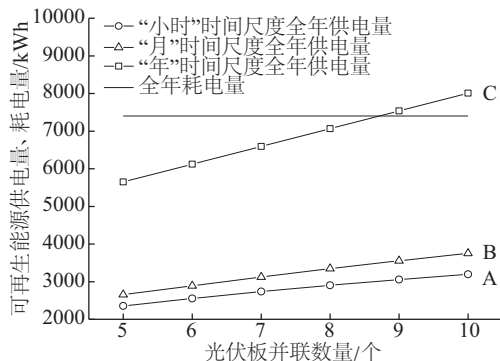


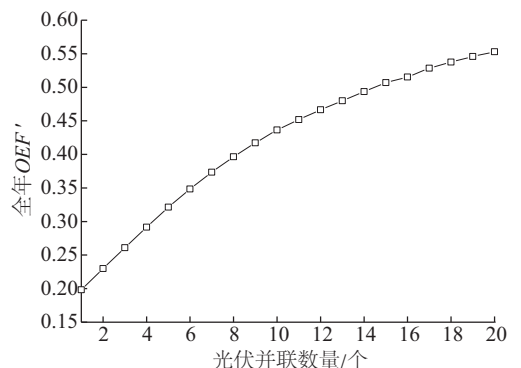
图7 时间尺度对负荷匹配的影响

Fig. 7 Impact of time resolution to load match

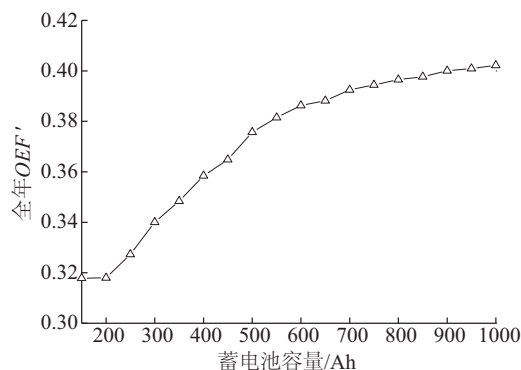
4 讨论

基于以上分析可看出,本文所构建的负荷匹配评价指标适用于包含能量转换、储存在内的复杂建筑能源系统的匹配性量化评价,本文所关注的能量形式是电,可进一步拓展至其他能量形式^[7]。并且通过改变研究起始时间 t_1 、终止时间 t_2 以及时间步长 Δt ,根据需实现不同时间段、不同时间步长下的能源系统动态或静态匹配性评价,从而影响能源系统的设计、运行策略的制定以及评价等方面。

负荷匹配分析在建筑能源系统的设计环节,能直接影响蓄能系统容量以及可再生能源系统的选型。图 8 显示了小时时间尺度,全年运行周期下负荷匹配评价指标 $OE'F$ 随光伏并联数量和蓄电池容量的变化。从图 8a 可知,在不考虑屋顶光伏安装面积的限制下,增大光伏安装容量,负荷匹配数值随着可再生能源容量的增大而增大,但增长的幅度逐渐减小,在光伏并联数量达到 10 个时,增幅最大。图 8b 中,增加蓄电池的容量时,初始阶段 $OE'F$ 值逐渐增大,最后当容量增大到 800 Ah, $OE'F$ 稳定



a. 光伏板容量对负荷匹配的影响



b. 蓄电池容量对负荷匹配的影响

图8 系统参数对负荷匹配的影响

Fig. 8 Impact of parameters for load matching

在约 0.40。由此,可根据负荷匹配结果进行建筑可再生能源系统设计选型。

负荷匹配分析同时也可指导系统运行环节,如图 6 所示,通过对系统 24 h 逐时动态匹配分析,可掌控系统全天候能量流动状态,从而进行运行优化策略的制定。负荷匹配评价还可直接作为近零或零能耗建筑评价的标准,传统零能耗建筑通常以全年尺度下的供需平衡作为零能耗评价标准^[19],通过更小时间尺度的匹配分析,可对近零/零能耗评价提出更高标准。

5 结 论

1)随着可再生能源系统在建筑系统中高度集成应用,可再生能源供能与建筑耗能之间的匹配特性分析至关重要。本文通过对负荷匹配指标动态分析,得到不同时间尺度下负荷匹配指标的数值变化范围:月时间尺度下, OEI' 和 OEM' 量级在 0.35 以上;小时时间尺度下,负荷匹配指标不同时间段动态变化幅度较大。

2)影响建筑可再生能源系统负荷匹配性能的重要因素是研究的时间尺度。建筑可再生能源系统能够满足供需平衡的案例,在更小的时间尺度上并不一定满足平衡目标。本文所建系统中,全年耗电量相同,当增加光伏安装容量时,以年为时间尺度可再生能源系统能够 100% 满足负荷需求,而以月和小时为时间尺度本址发电满足负荷占比均低于 55%,较小的时间尺度更能反映系统真实的匹配性能。

3)通过对建筑可再生能源系统负荷匹配特性的分析,可指导可再生能源系统设计、运行优化以及评价等各个方面,负荷匹配结果直接影响可再生能源蓄能容量、控制优化和近零能耗评价等关键环节,本文通过分析光伏容量和蓄电池容量对负荷匹配指标的影响,得到该系统蓄电池容量在 800 Ah、光伏并联数量 10 个时,负荷匹配指标最优,约 0.40。

[参考文献]

- [1] 中国能源编辑部. 中美气候变化联合声明[J]. 中国能源, 2014, 36(11): 1.
- [1] Editor of Energy of China. Sino-US joint statement on climate change[J]. Energy of China, 2014, 36(11): 1.
- [2] 国家中长期科学和技术发展规划纲要. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[J]. 中国安防, 2006, (1): 1—5.
- [2] Long-Term Science Technology Development Plan. Long-term science technology development plan(2006—2020)[J]. Publication of the State Council People's Republic of China, 2016, (1): 1—5.
- [3] Widen J, Wackelgard E, Lund P D. Options for improving the load matching capability of distributed photovoltaics: Methodology and application to high-latitude data[J]. Solar Energy, 2009, 83(11): 1953—1966.
- [4] IEA-SHC. IEA SHC Task 40 [EB/OL]. <http://task40.iea-shc.org/>, 2016-06-30.
- [5] Salom J, Marszal A J, Widen J, et al. Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with simulated and monitored data[J]. Applied Energy, 2014, 136: 119—131.
- [6] Zhang Yang, Lundblad A, Yan Jinyue, et al. Employing battery storage to increase photovoltaic self-sufficiency in a residential building of Sweden[A]. CUE2015-Applied Energy Symposium and Summit 2015, Low Carbon Cities and Urban Energy Systems [C], Fuzhou, China, 2015.
- [7] Cao Sunliang, Hasan A, Sirén K. On-site energy matching indices for buildings with energy conversion, storage and hybrid grid connections[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 423—438.
- [8] 严华夏. 严寒地区低能耗建筑多种能源互补的供暖供冷系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] Yan huaxia. Hybrid energy heating and cooling system on a low energy consumption building in severe cold region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] Cao Sunliang, Sirén K. Impact of simulation time-resolution on the matching of PV production and household electric demand[J]. Applied Energy, 2014, 128(3): 192—208.
- [10] DB 29-1—2013, 天津市居住建筑节能设计标准[S].
- [10] DB 29-1—2013, Tianjin energy efficiency design standard for residential buildings[S].
- [11] JGJ 203—2010, 民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范[S].
- [11] JGJ 203—2010, Technical specification for PV system of civil buildings[S].
- [12] 葛彬彬, 徐 林, 刘 洪, 等. 不同类型负载下蓄电池容量对独立光伏系统的影响分析[J]. 蓄电池, 2013

- (3): 126—130.
- [12] Ge Binbin, Xu Lin, Liu Hong, et al. The influence of battery's capacity on the stand-alone photovoltaic system with different load profile [J]. *Battery*, 2013(3): 126—130.
- [13] Castillo-Cagigal M, Caamaño-Martín E, Matallanas E, et al. PV self-consumption optimization with storage and active DSM for the residential sector [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 2338—2348.
- [14] Cao Sunliang, Hasan A, Sirén K. Matching analysis for on-site hybrid renewable energy systems of office buildings with extended indices [J]. *Applied Energy*, 2014, 113(SI): 230—247.
- [15] Crawley D, Pless S, Torcellini P, et al. Getting to net zero [J]. *Ashrae Journal*, 2009, 51(9): 18—25.
- [16] Voss Ka, Sartori I, Napolitano A, et al. Load matching and grid interaction of net zero energy buildings [EB/OL]. http://w.iaa-shc.org/data/sites/1/publications/Task40a-Load_Matching_and_Grid_Interaction_of_Net_Zero_Energy_Buildings.pdf, 2016-07-01.
- [17] Berggren B, Widén J, Karlsson B, et al. Evaluation and optimization of a Swedish Net ZEB using load matching and grid interaction indicators [EB/OL]. <http://www.ibpsa-england.org/resources/files/bso-2012/4C2.pdf>, 2016-07-01.
- [18] Baetens R, De Coninck R, Helsen L, et al. The impact of domestic load profiles on the grid-interaction of BIPV systems in extremely low-energy dwellings [A]. *Renewable Energy Research Conference [C]*, Trondheim, Norway, 2010.
- [19] Marszal A J, Heiselberg P, Bourrelle J S, et al. Zero energy building—A review of definitions and calculation methodologies [J]. *Energy Build*, 2011, 43(4): 971—979.

IMPACT OF TIME SCALE ON LOAD MATCHING PERFORMANCE ANALYSIS OF BUILDING RENEWABLE ENERGY SYSTEM

Feng Huanhuan, Zhao Jun, Deng Shuai, An Qingsong

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The study focuses on the building renewable energy system, and presents a renewable energy system for a single residential building in Tianjin. Based on the TRNSYS simulation of building renewable energy system, matching performance in different time scales is analyzed. The results showed that the generation can totally match the demand under the annual balance. While, with the same system, the monthly and hourly matching performance is under 55%. It indicated that the time scale should be clarified when considering the progress of design, operation and assessment, because it can directly affect the result of storage capacity, control optimization and net zero assessment.

Keywords: energy systems; photovoltaic; wind power; load match; time scale; TRNSYS