

智慧电表设施的节能减排效益评估

张金华,邱耀雄*,何建宗 (香港公开大学科技学院 环境科学研究中心,香港特别行政区,中国 香港 999077)

摘要: 智慧电表基础设施(Advanced Metering Infrastructure,AMI)通过电力数据采集、分析和管理的,可以优化电力供求平衡.由于 AMI 的建设需要巨额投资,如何评估 AMI 建成后节省的电量和减少的碳排放量是目前面临的一个挑战.本研究以香港为例,通过现场测量和分析不同地区不同环境条件下 AMI 的效能,同时基于研究区块类型、AMI 的覆盖率、发电燃料组合结构、参与 AMI 的人口比例和相关价格激励机制等因素,建立了一套数学模式,量化评估 AMI 建成后节能减排的成效.结果显示,只要超过 70%的人口参与,就可以实现香港政府原先制定的减少碳排放量 19%~33%的目标.

关键词: 智慧电表基础设施; 智慧电表; 能源管理; 碳排放

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)08-2545-09

Assessment of efficiency in energy management and carbon emission reduction induced by advanced metering infrastructure. CHEUNG Kam-Wah, YAU Yiu-Hung*, HO Kin-Chung (Research Center of Environmental Science, School of Science and Technology, The Open University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China). *China Environmental Science*, 2016,36(8): 2545~2553

Abstract: Advanced metering infrastructure (AMI) was a architecture with real-time two-way communications that used digital technology to monitor and manage the delivery of electricity from generation sources to meet the varying electricity demands of end users. The goal of an AMI was to provide utility companies with real-time data about power consumption and allow customers to make informed choices about energy usage based on the price at the time of use. Since the rollout of AMI was a heavy investment, a cost benefit analysis and an impact assessment should be carried out. This paper attempted to quantify the energy saving and reduction in carbon emission benefits inherent in the AMI potential. The quantitative estimation of potential saving in electricity consumption and associated reduction in carbon emission presented were based on a survey of published results, actual field measurements of local demographics in urban and rural environmental conditions, fuel mix, and possible incentive pricing based on time of use. A mathematical model was formulated to apply sensitivity analysis against the coverage of AMI in different demographics, and respective penetrations of AMI. A case study illustrated the real world application of the energy saving estimation model to Hong Kong environment. For more than 70% population participated in AMI, the emission reduction target of 19%~33% planned by Hong Kong Government could be achieved. The methodology presented in this paper could serve as a reference model in implementing AMI in other cities.

Key word: advanced metering infrastructure; smart meter; energy management; carbon emission

近年来,全球气候变暖日益严重,各国都在努力建设减少碳排放,发展智能电表基础设施(AMI) (Smart Grid) 极有可能成为未来传输网络和配

有助于减少 CO₂ 排放.AMI 包括通信模块 (Communication Module, CM)、网关 (Gateway)、通信网路、智能家居设备及电表数据管理系统^[1-3],支持通信资料双向传输,用于数据采集、显示、分析和管理的^[4-5],使电力公司实时掌握电力使用情况,同时使使用者了解用电量.智慧电网

送体系^[5-7].许多欧美国家已经试验和建设智能电网^[8-9],旨在提高能源使用效率和实现节能减排^[10-12].以往有关 AMI 的研究集中在 AMI 的各个基础关键要素,如智能电表的性能,无线网状网络协议的效

收稿日期: 2015-12-08

* 责任作者, 助理教授, yhyau@ouhk.edu.hk

率,数据传输,各类型的通信技术,安全性和身份验证等.本研究以香港为例,侧重评估 AMI 部署在节能减排中的成效,确定最优的AMI的部署方案,为中国香港的决策提供科学依据.同时建立了一套数学模型,其参数包括AMI实际运行数据和多个社会经济因素,为未来相关研究提供了技术手段.

1 材料与方法

1.1 实地测量

为了评估AMI的效能,对香港不同地区的不同类型建筑物进行了实际现场测量.现场测量的主要目的是验证射频性能是否适合在客户端无线网状网络的内部通信.此外,探讨了通信技术的可用性,以确定最佳的实施方法.

1.1.1 测量设计与材料 下列准备工作和现场装置将在不同的建筑物中进行(图 1):①每个通信模块 (CM) 配有标准的 WLAN (802.11b) 和 RS232 接口; ②每个智能电表配有标准的 RS232 接口与 CM 连接; ③每个 3G 移动网关有标准的以太网端口和 RS232/ RS485 与 CM 连接; ④IHD(智能家居设备)是由平板电脑和加

载的应用程序来组成;⑤每个智能设备(智能电表和网关)有各自连接的 CM; ⑥IHD 能通过 WiFi 与智能电表通信; ⑦前端服务器是由笔记本电脑和相关的应用程序组成,前端服务器与网关的通信是通过公共移动通信网来实现; ⑧所有的智能设备通过 WiFi 连接在一起,形成一个客户端网状网络; ⑨网关的数量取决于安装在不同类型楼房中的智能电表的位置; ⑩网关的位置取决于射频信号(WiFi)在现场测得的强度决定; ⑪智能电表以一组 100KB 数据(模拟电量数据)通过智能电表网络发送到网关.网关将通过公共 3G 移动网络把数据传输给远程服务器(即模拟电力公司的前端服务器);⑫所有电表数据均可通过智能电表发送到网关,然后再配送到远程服务器;⑬通过相关的应用程序来发送及收集电表数据;⑭通过相关的应用程序来检测 WiFi 的强度;⑮一共准备了 50 个通信模块,3 个网关,2 个平板电脑,一台笔记本电脑,四个手机 sim 卡和相关应用程序;⑯对 4 个不同地区不同类型的建筑物进行现场测量:在市区的高层建筑;在市区中层的老建筑;在郊区低层住宅区;在郊区的小房子.



图 1 现场测量装置与材料

Fig.1 Field measurement tools and materials

1.1.2 测量对象和结果 现场测量对象:是根据香港不同地区的建筑类型分类来确定.第 1 种:高层建筑;第 2 种:中高层的老建筑;第 3 种:低层住宅区;第 4 种:郊区的小房子/村屋.

现场测量项目:测量不同的建筑物以评估数

据传输的性能,现场测量项目列示如下:①客户端网状网络自动添加或删除通讯模块的成功率;②各个通信模块间数据传输的成功率;③数据传输与时间周期配置的成功率;④数据从智能电表终端传递到远程服务器的成功率;⑤监测通信模块

的健康状态;⑤能否成功连接该智能电表和 IHD.

从现场测量结果,客户端网状网络可以通过添加或删除智能电表而自动成功建立.一般情况下,在现场测量中网关可以处理所有不同位置的智能电表,从而形成网状网络来传输数据.智能电表数据传送可在 1~2 次尝试后完成.射频干扰主要来自测量环境的 WiFi 热点,但情况并不严重.

对于高层建筑(共有 39 层),无线通信能通过垂直电缆管道连接到每层的电表房.同一层的 IHD 和电表房内智能电表的无线通信信号的测量结果显示,虽然信号没有断开,但是连接并不理想.若公寓安装有金属大门,信号会更弱,可能是电表房的门和公寓的金属大门削弱了信号的强度.因此,有必要评估网关的合理安装位置,以确保让更多的智能电表能够进行通信.若一个网关不能满足不同楼层的所有智能电表间的通信需求,需要加装一个网关,以确保所有设备之间稳定的通信.

在不同的环境条件下现场测量的结果如下:①数据可以沿着邻近的电表进行传输,甚至是终端电表也可通过数个智能电表作为跃点,传播到网关,从而成功实现客户端网状网络.②对于高层和中层建筑,网关能支撑的智能电表数量依赖于射频信号的覆盖强度.位于中间层的网关实地测量结果显示,可覆盖达致向上和向下 10 层楼(共 20 层).假设每层有 8 个公寓,一个网关可以服务 160 个智能电表.③对于郊区的低层和小房子,每个网关可以覆盖 500m×250m 范围内的 200 个智能电表.④IHD 与智能电表之间的通信性能取决于住宅和电表房的环境条件和距离.⑤电表数据通过蜂窝移动 3G 网络可被发送到远程服务器.⑥客户端网状网络的建立并不会因为智能电表的故障、减少或增加等因素的影响.⑦在整个测量过程中没有发生 AMI 系统停机现象.射频是一个稳定的通信,干扰并不严重.⑧正常情况下智能电表的位置是固定的.因此,网关位置的判断是至关重要的.理想的网关位置应该是既要保证客户端网状网络的通信稳定,又要覆盖尽可能多的智能电表.

1.2 数学模拟

本研究以香港地区为例,综合考虑影响 AMI 建设的各个因素,建立数学模式,以评估 AMI 部署后节能减排的效果.数学模拟基于以下数据:①收集香港各地区人口分布资料,通过数学模拟估算香港各个地区 AMI 智慧设备的数量、能耗和碳排放,确定 AMI 部署后可能增加的负荷.②通过客户调查,了解 AMI 建成后和价格激励机制下客户用电行为的变化^[13-14],推算在价格激励机制下所反映的节省电量和碳排放减少量.③根据 AMI 的覆盖率、各地区使用 AMI 的人口比例和价格激励机制,运用数学模拟推算各地区的电力消耗和碳排放.④开发节能应用软件(智能网络仿真器和节能规划师),估算电力消耗量和碳排放的减少量.

1.2.1 评估增加的电能消耗量 AMI 的部署可以优化电力公司的资源分配,提升能源使用效率和减少碳排放量.然而,安装智慧设备(Smart Equipment)导致 AMI 的负荷增加.数学模拟的评估基于香港 18 个区的人口比例模型^[15]、智能设备的能源负荷和 AMI 建成后节能减排的效果.数学模拟的数据源和假设如下:

智慧电表基础设施建成后,额外增加的能源消耗部分主要来源于 CM 和网关.因为其它的基础设施大多是已有设施,因而不会显着增加额外负荷,例如与 CM 连接的电表或支持电量数据传递的公共通信网路都已存在.

CM 数量取决于平均一套公寓内居住的人数 $\bar{R}$.

$$CM_i = PS_i / \bar{R} \quad (1)$$

式中: PS_i 和 CM_i 是某区的人口规模和 CM 总数.

一个网关能处理的 CM 数量是受一系列环境因素影响,包括:①在中高层建筑,主要取决于信号的垂直覆盖范围,②在低层建筑,主要取决于信号的水平覆盖范围.

由于中高层建筑和低层建筑的居住人口密度分布不均衡,因此网关数量应该加以区分,在某一地区使用网关的数目 GW_i 如下:

$$GW_i = CM_{i,b} / \overline{CM}_{i,h} \quad (2)$$

其中: $GW_{i,b}$ 和 $GW_{i,h}$ 分别是在建筑物和小房屋的相应网关数量,计算如下:

$$GW_{i,b} = CM_{i,b} / \overline{CM}_b \quad (3)$$

$$GW_{i,h} = CM_{i,h} / \overline{CM}_h \quad (4)$$

式中: $\overline{CM}_b$ 和 $\overline{CM}_h$ 分别是由一个网关所能覆盖于建筑物和小房屋的 CM 平均数目.在本文中, EM_i 代表某区所有 CM 每日的耗电量,可用公式(1)和下面的参数进行估算:

CM 的主要参数:①待机功耗: $CM_{sb}(W)$;②运行功耗: $CM_{op}(W)$;③平均数据传输时间: $CM_{tx}(s)$;④仪表数据采集间隔: $CM_{int}(min)$.

$$EM_i = SB_i + OP_i \quad (5)$$

式中: SB_i 和 OP_i 分别代表 CM 在待机和运行时的能耗(以 kWh 表示):

$$SB_i = CM_i \times \frac{CM_{sb}}{1000} \times 24 \quad (6)$$

$$OP_i = CM_i \times \frac{(CM_{op} - CM_{sb})}{1000} \times \frac{CM_{tx}}{60 \times 60} \times \frac{60 \times 24}{CM_{int}} \quad (7)$$

由于网关都保持工作状态,在某一特定地区所有网关每日的耗电量 EG_i 可以用公式(2)计算(以 kWh 表示):

$$EG_i = GW_i \times \frac{GW_{op}}{1000} \times 24 \quad (8)$$

式中: GW_{op} 代表网关的运行功耗,以 W 表示.

参考公式(5)和(8),在某特定地区所有 CM 和网关每年所增加的能耗 $EC_{i,yr}$ 可用公式(9)计算(以 GWh 表示):

$$EC_{i,yr} = \frac{365}{10^6} \times (EM_i + EG_i) \quad (9)$$

最后,整个香港(即 18 区)所有 CM 和网关每年所增加的能耗 $EC_{hk,yr}$ 可用公式(10)计算(以 GWh 表示):

$$EC_{hk,yr} = \frac{365}{10^6} \times \sum_{i=1}^{18} (EM_i + EG_i) \quad (10)$$

1.2.2 推算节约的能耗 在数学模拟中,AMI 建成后节省的电量取决于以下因素:

① AMI 建设部署所需的时间 假设每年用智慧电表(Smart Meter)替换已有电表的 $M\%$,以下的参数便可以确定: $M\%$ 的 AMI 于第一年年底部署完成; $2 \times M\%$ 的 AMI 于第二年年底部署完成; $N \times M\%$ 的 AMI 于第 N 年年底部署完成;全部

的 AMI 于第 $\left(F = \frac{100\%}{M\%}\right)^{th}$ 年年底部署完成;其

中, $1 \leq N \leq F$;

② 规划节能机制 假设 AMI 建成后和价格激励机制下实现 $x\%$ 的节能目标;

③ 参与的人口数量 假设 AMI 建成后(即已安装智慧电表) $Y\%$ 的人口纳入上述节能规划;

④ 电力消耗的自然增长率 假设每年的电力消耗的自然增长率为 $z\%$;

⑤ 参考耗电量 假设 AMI 建成之初香港的电力消耗量是 R_{sc} GWh,暂且忽略因 AMI 实施而节省的电力消耗.在 AMI 部署的第 N 年后,某区的耗电量 $EC_{N,i}$ 可通过以下方法计算:

$$EC_{N,i} = R_{ec} \times \frac{PS_i}{PS_{hk}} \times (1 + z\%)^N \quad (11)$$

其中: PS_i 和 PS_{hk} 分别是某区和整个香港的人口规模.

因此,参考方程公式(9)和(11),在 AMI 建成后第 N 年,某特定地区节省的电力消耗量可用以下公式计算(以 GWh 表示):

$$ES_{N,j} = (EC_{N,i} \times x\% \times y\% - EC_{i,yr}) \times (M\% \times N) \quad (12)$$

最后,参考公式(12),在整个香港地区(即 18 区)AMI 建成后,所节省的电力消耗量可用以下公式计算(以 GWh 表示):

$$ES_{full,hk} = \sum_{i=1}^{18} ES_{F,i} \quad (13)$$

其中: $F = 100\% / M\%$

1.2.3 碳排放量的推算 碳排放量的多少取决于燃料总量和类型.因此,碳排放量可通过燃料组合模型来估计^[20].从表 1 所示,二氧化碳(以 kg 表示)是发电过程中(每千瓦时)产生的副产物.碳排放总量 CE_{mix} 可用以下公式计算:

$$CE_{mix} = \sum_{i=1}^4 CE_i \times P_i \quad (14)$$

参考公式(12)和(14),在 AMI 建成的第 N 年后,某特定地区所减少的碳排放量可用以下公式计算(以 tonne 表示):

$$RCE_{N,i} = CE_{mix} \times ES_{N,i} \times \frac{10^6}{10^3} \quad (15)$$

当整个香港(即 18 区)建成 AMI 后,所减少的碳排放量可用以下公式计算(以 kg 表示):

$$RCE_{full,hk} = \sum_{i=1}^{18} RCE_{F,i} \quad (16)$$

其中: $F = 100\%/M\%$

表 1 混合燃料的碳排放

Table 1 Carbon emission of fuel mix

燃料类型	碳排放量(kg/kWh)	总燃料量百分比
煤	CE_1	P_1
天然气	CE_2	P_2
石油	CE_3	P_3
其他	CE_4	P_4

2 结果与讨论

2.1 AMI 智慧设备功耗的评估

通过对不同环境条件和不同地点的实地测量,来确定安装网关的最佳技术和点位,从而使通信能力和系统性能达到最优化.此外,基于香港不同地区人口与 AMI 关键要素的分析,笔者进行了数学模拟来估计 AMI 智慧设备的数量和相关的功率消耗.这可能对于电力公司来说是额外的成本,评估智能网络设备功耗的数学模拟所用的数据和假设如下:①通信模块和网关的数量是根据香港各个地区人口^[15]和区内建筑物的类型来决定.②香港电表数量的估计:中电香港:240 万^[17];香港电灯公司:56.9 万^[18].③根据香港的电表数目,按照 3 人住一套房子(即一个电表)的标准来推算公寓的数量.④通信模块(CM)内置或连接每个智慧电表和每个网关.⑤根据对高层建筑的现场测量,电表房内一个网关可以无线射频信号与覆盖于 10 层以上和 10 层以下的智慧电表通信.⑥同时考虑高层及中高层建筑,假设每层有 10 个单位,包括私人 and 公共房屋.3 个网关可以处理 500CM 或 1 个网关可以处理 166CM.⑦根据对低层住宅区及郊区小房子的实地测量,一个网关可以覆盖面积 500m×500m 区域内约 200 公寓(即可以处理 200CM).⑧根据在现场测量所用的装置,各智能设备的功耗分别为 CM: 1W(待机模式), 6W(启动模式);3G 网关:3.6W(启动模式).

为了深入了解香港不同地区 AMI 智慧设备的功耗,笔者通过数学模拟开发了一个智能网络

仿真器应用程序来预估 AMI 智能设备所需的额外功耗.这个智能网络仿真器可视为一个简单的负载测定工具.只要选择一个地区的几个点,便可以预估该区智能设备的负载.图 2 和图 3 分别显示在个别地区和整个香港的智能设备的负载.

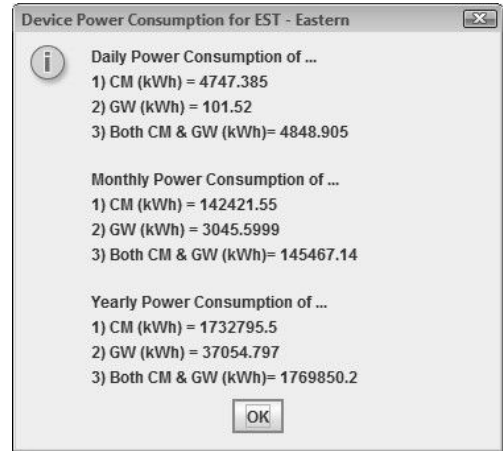


图 2 智能网络仿真器的输出值个别地区

Fig.2 Output screen capture for individual district of Smart Network Simulator

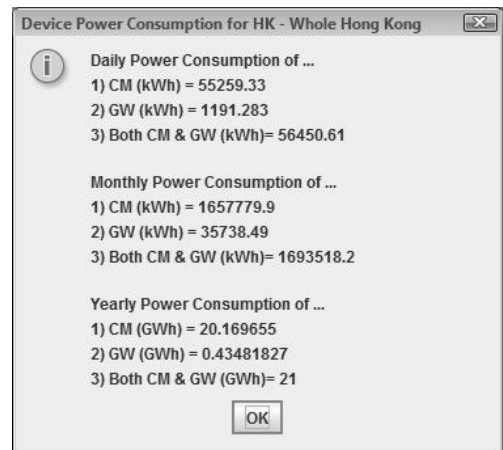


图 3 智能网络仿真器的输出值(香港)

Fig.3 Output screen capture for Hong Kong of Smart Network Simulator

智慧设备的耗电量与碳排放量可被视为 AMI 建成后的负载.然而,根据环境局发布的“未来发电燃料组合咨询文件”^[16],2014 年香港的年耗电量为 4.39×10^{10} kWh.依据智能网络仿真器的估算,AMI 智慧设备的耗电量为 2.1×10^7 kWh(图

3),与年耗电量相比(小于 0.05%)可忽略.其它 AMI 组件,如电表数据管理系统和后端的信息系统,是应用于现有服务器平台的软件包^[10-12].因此,从能源消耗(智能设备的耗电量)的角度来看,AMI 的运行不会显著增加经济负担.

2.2 节省能源消耗的推算

笔者进行了一项客户调查以了解价格激励方案^[23]下消费者的用电情况.结果表明,大多数的消费者愿意节约用电,并按照价格激励方案来调整自己的用电行为.由此估计电力消耗可减少 13%~20%.然而,消费者认为他们削减的电费与电力公司减少发电量的百分比不符.大多数消费者认为香港社会可以从 AMI 实施中受益.

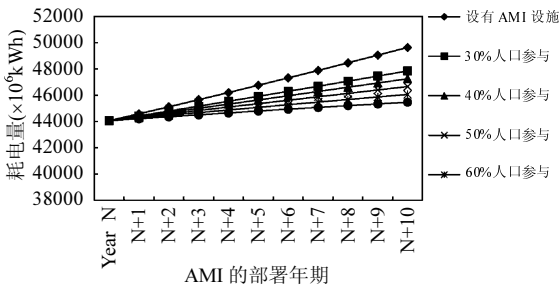


图 4 AMI 部署-12%节省能源方案

Fig.4 AMI deployment with 12% energy saving scheme

AMI 建成后带来的能源效益取决于消费者自身用电行为的调整情况.节省的电量可根据以下假设和资料用数学模拟进行估算:①假设 AMI 的部署需要 10 年时间,每年完成 10%,从商业角度看,这是切实可行的.因为智慧电表逐步替换已有的旧电表,减少了 AMI 部署的初期投资.②根据客户调查结果,最合理的价格激励方案可节省 13%~20%的能源消耗.③根据客户调查的结果,AMI 建成后参与节能计划的人数占总人口数的 40%~70%.④根据“未来发电燃料组合咨询文件”^[16]的资料,目前用电量约为每年 4.40×10^{10} kWh,并以每年 1.2%增长.

采用数学模拟推算的节约电量如图 4,图 5 和图 6 所示.从图表分析,AMI 建成后,如果总人口数的 50%参与节能计划,可节约 10%以上用电量.如果 70%人口参与,可节省 20%用电量.因此,引入 AMI 是鼓励消费者节约用电和管理家居能

源的有效途径.

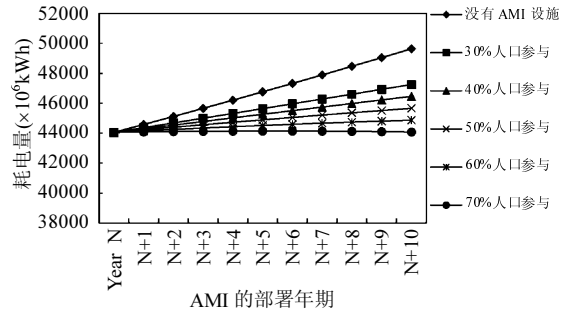


图 5 AMI 部署-16%节省能源方案

Fig.5 AMI deployment with 16% energy saving scheme

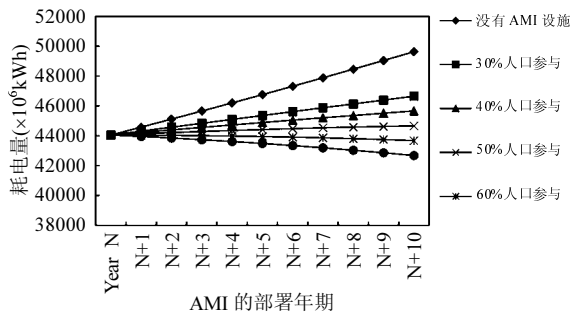


图 6 AMI 部署-20%节省能源方案

Fig.6 AMI deployment with 20% energy saving scheme

2.3 碳排放减少量

随着 AMI 逐步实施,电力消耗相应削减,减少的碳排放量可通过分析香港的发电燃料组合来估算.根据香港环境局公布的“未来发电燃料组合咨询文件”^[16],在 2014 年香港的发电燃料组合为:燃煤(53%),核电(23%),天然气(22%)和石油(2%,忽略不计的微量可再生能源)^[16].根据表 2^[24],碳排放减少量可以用数学模拟推算,结果如图 7 所示.AMI 建成后,假设有 70%的人口参与和节约 16%的用电量,碳排放量每年减少 3.54×10^9 kg.若减少的 3.54×10^9 kg 碳排放量都是来自燃煤,每千瓦时(kWh)发电需燃煤约 0.54kg^[20-21],由此推算每年可减少用煤 1.65×10^6 k.另外,减少从海外运输燃料来港,可进一步削减碳排放量.

碳排放量的减少主要涉及从电力消耗高峰时段转移到了非高峰时段^[6].价格激励方案可以通过 AMI 设备将价格信息传递给消费者,鼓励消费者转

变自身用电行为.基于对能源消耗的预测,对耗电量大的消费者,电力公司可以安排特别协议,鼓励他们在用电高峰时减少用电.这些安排将优化电力的供求关系,从而提升对能源的管理和使用效率.

表 2 不同的燃料类型的碳排放量
Table 2 Carbon emission of different fuel type

序号	燃料类型	CO ₂ 排放量(kg/kWh)
1	煤	0.95
2	天然气	0.60
3	石油	0.89

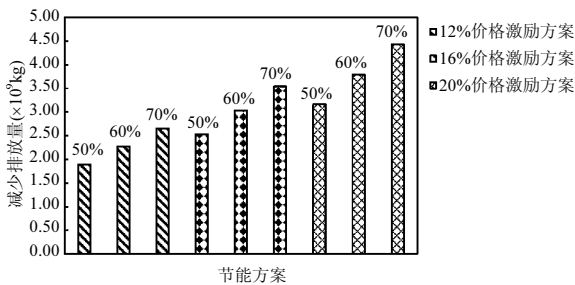


图 7 不同人口总数参与下的碳排放减少量
Fig.7 AMI full deployment with different population participation

为了达到最佳减排效果,应采用方便客户使用的应用软件,让消费者通过数据对比分析,能耗监测与控制来转变用电行为^[22-23].总用电量下降可以减少电力公司投资,推迟新电厂建设,最终使

消费者可减少电费支出.

2.4 节能规划师

为了深入了解不同地区的电力消耗和碳排放,笔者开发了一个「节能规划师」应用软件,将有关数字(如 AMI 覆盖的地区,参与 AMI 的人口总数百分率,目标价格激励方案)输入软件应用,运用数学模拟预估在 AMI 建成后的某个地区节约的电量和减少的碳排放量.图 8 和图 9 显示在香港电力的消耗和减少的碳减排量.该应用程序可视为一个简单的能源规划工具.

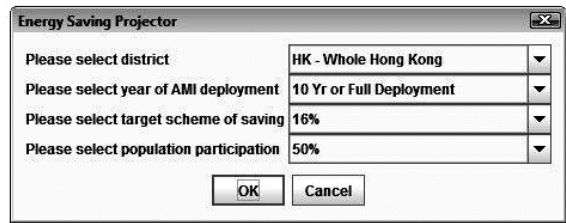


图 8 节能规划师的输入值屏幕截图
Fig.8 Input screen capture of energy saving projector

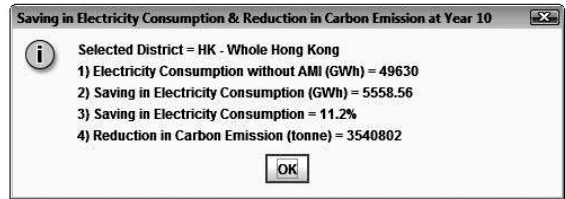


图 9 节能规划师的对应输出值屏幕截图
Fig.9 Output screen capture of energy saving projector

表 3 减少碳排放量的估算
Table 3 Estimation of reduced amount in carbon emission

参与人口 (%)	节能激励方案的节省目标 (%)	节能发电 (×10 ⁶ kWh)	减少碳排放量 (×10 ⁹ kg)	削减 5% 备用电量所减少的碳排放量 (×10 ⁹ kg)	与 2005 年的 2.8×10 ¹⁰ kg 相比共减少的碳排放量 (发电行业) (%)	与 2005 年的 4.2×10 ¹⁰ kg 相比共减少的碳排放量 (所有行业) (%)
70	20	6,948	4.43	0.86	18.9	12.6
70	24	8,337	5.30	0.86	22.0	14.7
80	20	7,941	5.06	0.86	21.1	14.1
80	24	9,529	6.07	0.86	24.8	16.5
90	20	8,933	5.69	0.86	23.4	15.6
90	24	10,72	6.83	0.86	27.5	18.3
100	20	9,926	6.32	0.86	25.6	17.1
100	24	11,91	7.59	0.86	30.2	20.1

2.5 节能减排效益的展望

AMI 的建设可以优化电力供求平衡,电力公

司可以通过重新分配,避免在高峰负荷时段过度发电,削减电力企业的备用电量,减少总发电量.

国际能源机构(IEA)建议一般情况下备用电量为20%~35%^[14],电力公司可参考当地最高用电需求来调整后备电量水平.有效的能源管理和发电规划也可优化定价系统,发电成本减少,可以让电力公司有更多的资源投放于其它项目,如提升核心技术,提高燃料燃烧效率,减少碳排放量.电力公司可推出价格激励方案,调整客户的用电行为有效地管理家居能源,以减省电费,企业也可能会改变企业文化来实现节能减排.最终,电力公司的和消费者都受益.

根据“未来发电燃料组合咨询文件”^[16],香港在2014年最大电力需求量为 $9.27 \times 10^6 \text{ kW}$.假设AMI建成后,备用电量可下降5%,即节省 $4.635 \times 10^5 \text{ kW}$ 发电量.假设电量也适用于一年中最炎热的4个月(根据香港天文台网站的资料,六月到九月是一年中最炎热月份,一般气温高于 30°C ^[25]),每年减少的备用电量将是 $1.35 \times 10^6 \text{ kWh}$ 和 $8.61 \times 10^8 \text{ kg}$ 的碳排放量相当于2005年碳排放量($4.2 \times 10^{10} \text{ kg}$)的2%,(或与“发电行业”的 $2.8 \times 10^{10} \text{ kg}$ 相比,即减少3%).

香港政府计划在2020年前把香港的碳排放强度在2005年水平上减少50~60%,即碳排放量由2005年的 $4.2 \times 10^{10} \text{ kg}$ (包括发电,交通运输,废物及其他)缩减至2020年的 $2.8 \sim 3.4 \times 10^{10} \text{ kg}$ ^[16],减少 $8 \sim 14 \times 10^9 \text{ kg}$,下降19%~33%.2005年“发电行业”所排放的碳约为 $2.8 \times 10^{10} \text{ kg}$ ^[16].按19%~33%比例削减碳排放量,在2020年“发电行业”的减排目标应该是 $5.4 \sim 9.3 \times 10^9 \text{ kg}$.根据我们的模拟结果,只要超过70%的人口参与节能奖励方案,可以实现香港政府原先制定的减少碳排放量19~33%的目标(表3),这充分显示了AMI在能源管理和减少碳排放方面的重要作用.

2012年,中国发电量为 $4.98 \times 10^{12} \text{ kWh}$,其中火电发电量为 $3.91 \times 10^{12} \text{ kWh}$,占全国发电量的78.6%.煤是火力发电企业的主要燃料,按照每千瓦时(kWh)发电需燃煤 0.54 kg ^[20]推算,全国火力发电需要燃煤 $2.1 \times 10^{12} \text{ kg}$.因此,在中国迫切需要实施智能电表基础设施,旨在节约能源和减少二氧化碳排放.本研究为未来评估AMI的节能减排成效的提供了方法.

全面换装智能电表的成本非常高,电力公司可优先在某些地区推行AMI计划或传统电表报废时才进行更换电表工程,以电费回赠,激励市场需求与减少高峰时期用电量.在成效方面,如表3所示,若落实全面性智能电表装置,预期共可减少用电 $1.19 \times 10^7 \text{ kWh/a}$,减少排放 $8.45 \times 10^9 \text{ kg CO}_2/\text{a}$,减碳率达30.2%,节省金额2327万元/a,成效显著.

3 结语

通过现场测量和分析不同地区不同环境条件下AMI的效能,同时基于研究区块类型、AMI的覆盖率、发电燃料组合结构、参与AMI的人口比例和相关价格激励机制等因素,建立了一套数学模式,量化评估在香港AMI建成后节能减排的成效,研究成果为香港政府的决策提供科学依据,也为同类研究提供了方法.只要超过70%的人口参与,就可以实现香港政府原先制定的减少碳排放量19%~33%的目标.

参考文献:

- [1] Karnouskos S, Terzidis O, Karnouskos P. An advanced metering infrastructure for future energy networks [A]. New Technologies, Mobility and Security [C]. Netherlands, Springer, 2007, 597-606.
- [2] Wenpeng L. Advanced metering infrastructure [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 6-10.
- [3] Terzija V, Valverde G, Cai D. et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 80-93.
- [4] Güngör V C, Sahin D, Kocak T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 529-539.
- [5] NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards [S]. Release 1.0, National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce.
- [6] Future Electrical Grid: Smart Grid, Naveenkumar M, Chandra Shaker, RGUKT, Proceedings of the International Conference on Advances in Electronics, Electrical and Computer Science Engineering - EEC 2012.
- [7] Farhangi H. The path of the smart grid [J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2010, 8(1): 18-28.
- [8] National Energy Technology Laboratory for U.S. Department of Energy, Advanced Metering Infrastructure [R]. NETL Modern Grid Strategy Powering our 21st-Century Economy, 2008.
- [9] Yan Y, Qian Y, Sharif H, et al. Survey on smart grid

- communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges [J]. Communications Surveys and Tutorials, IEEE, 2013,15(1):5-20.
- [10] Operation and Maintenance Savings from AMI – Initial Results [Z]. U.S. Department of Energy, December, 2012.
- [11] Ehrhardt-Martinez K, Donnelly K A, Laitner S. Advanced metering initiatives and residential feedback programs: a meta-review for household electricity-saving opportunities [R]. Washington, DC: American Council for an Energy-Efficient Economy. June, 2010.
- [12] Choi T S, Ko K R, Park S C, et al. Analysis of energy savings using smart metering system and IHD (in-home display) [J]. In Transmission and Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, IEEE, 2009,1-4.
- [13] Fribush D, Parker S, Enterline S. Electric evolution – a discussion paper for electricity utilities, legislators, regulators and consumers [R]. Vermont Energy Investment Corporation, 2010.
- [14] Joskow P L, Bohi D R, Gollop F M. Regulatory failure, regulatory reform, and structural change in the electrical power industry [Z]. Brookings papers on economic activity Microeconomics, 1989:125-208.
- [15] The Census and Statistics Department. The Profile of Hong Kong Population Analysed by District Council District [R]. Hong Kong, 2011.
- [16] Future fuel mix for electricity generation consultation document, environment Bureau, The Government of the Hong Kong Special Administration Region [R]. Hong Kong, 2014.
- [17] CLP Power Hong Kong Ltd. (<https://www.clp.com.hk/en>). [Z/OL].
- [18] Hong Kong Electric Investments Ltd. Annual Report [R]. Hong Kong, 2013.
- [19] Electricity Sector Emissions, Department of Energy, Washington, Environment Protection Agency [R]. USA. (<https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/electricity.html>).
- [20] How much coal, natural gas, or petroleum is used to generate a kilowatthour of electricity, The U.S. Energy Information Administration (EIA) [R]. (<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=667&t=2>).
- [21] Wang Q, Shen W, Ma Z. Estimation of mercury emission from coal combustion in China [J]. Environmental Science and Technology, 2000,34(13):2711-2713.
- [22] Rossello-Busquet A, Soler J. Towards efficient energy management: Defining HEMS, AMI and Smart Grid Objectives [J]. International Journal on Advance in Telecommunications, 2011,4(3/4):249-263.
- [23] Wood G. Newborough M. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design [J]. Energy and Buildings, 2003,35(8):821-841.
- [24] Power Generation from Coal – Measuring and Reporting, Efficiency Performance and CO₂ Emissions, Coal Industry Advisory Board (CIAB), International Energy Agency [R]. 2010 (<http://www.iea.org/>).
- [25] Hong Kong Observatory (<http://www.hko.gov.hk/contentc.htm>). [Z/OL].

作者简介: 张金华(1961-),男,广东中山人,工程师,博士,主要从事无线感测网络和环境与能源管理研究。