

电网-用户互操作性对负荷曲线影响的定量模拟

田建伟¹, 胡兆光^{1,2}, 周景宏³, 肖 潇³, 吴俊勇¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044; 2. 国网能源研究院, 北京市 100052;
3. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 102206)

摘要: 分析了智能电网机制下电网-用户互操作性(GCI)的实现基础及对负荷曲线的影响。GCI 具有模糊性与自适应性,传统建模方法很难定量模拟,智能工程混合模型为其提供了解决思路。根据 GCI 的特点建立了智能工程混合模型,包括控制中心智能体、发电智能体、用户智能体等。在电力市场环境下,用户智能体根据实时电价的波动及可响应负荷的大小进行模糊推理,改变电力消费行为,从而影响负荷曲线。通过 IEEE 39 节点新英格兰系统算例,验证了该定量模拟方法及智能工程混合模型建模技术的有效性。

关键词: 电网-用户互操作性; 负荷曲线; 定量模拟; 智能电网; 智能工程; 混合模型

0 引言

为了应对资源和环境对电力系统发展提出的严峻挑战,建设智能电网已经成为各国电力行业共同的选择^[1-3]。电网智能化要全面、动态地优化发电侧可再生资源以及整合用户侧各类分布式资源,需方响应以及电网-用户之间的互操作性(grid-consumer interoperability,GCI)成为智能电网的核心特征^[4-5]。在中国,互动化也已成为国家电网公司坚强智能电网的 3 个基本技术特征之一^[3]。

传统电网机制下,为解决用电高峰时段的电力需求紧张,利用灵活的电价机制,如峰谷分时电价引导用户进行需方响应,从而降低负荷曲线峰谷差的措施不失为一种有效的手段^[6]。智能电网框架下,用户侧分布式电源、电动汽车及分布式储能装置广泛接入电网,应利用需求方资源与电网友好互动,从而进一步平缓负荷曲线,实现资源的优化配置。

随着智能电网工程的推进,大量的 GCI 将对电力系统产生深远的影响,电网-用户之间的双向潮流将影响负荷曲线的形状,进而影响到负荷预测,直至影响智能电网规划等诸多决策问题。因此,定量模拟 GCI 对负荷曲线的影响成为亟待研究的课题,该课题涉及系统运行、不确定发电、不确定用电、实时电价(real-time price,RTP)等复杂性、不确定性问题,传统的数学模型显得力不从心,要建立准确的仿真模型非常困难。

以智能路径为核心、以广义模型为基础、以智能

空间为研究对象,融合了人工智能、神经网络和模糊系统等智能方法的智能工程理论(intelligent engineering,IE)在解决电力系统复杂性问题,如电力战略研究^[7]、供需模拟^[8]、电网规划^[9]等方面得到了广泛的应用,也为解决 GCI 对负荷曲线影响的定量模拟提供了解决思路。本文将利用智能工程理论的广义混合模型对 GCI 对负荷曲线的影响进行建模并加以定量分析。

1 GCI 实现基础与定性分析

GCI 是指借助现代通信技术和信息技术的发展,利用电力市场的电价信号或激励机制引导用户与电网进行互动操作,实现电网与用户之间电力流、信息流和业务流的双向互动^[3]。GCI 将无缝集成发电企业、电力用户的资源和储能系统,促进发电企业与用户主动参与电网的运行调节。传统电网由于缺乏先进的计量、通信、控制技术的支持,使得 GCI 不易工程实现,而智能电网的高级量测体系为 GCI 提供了技术先决条件。

1.1 GCI 实现基础

在智能电网框架下,GCI 能否实现取决于智能电网技术的发展,文献[10]分析了无线射频、电力线载波、宽带电力通信在高级量测体系中的应用,认为通信、信息技术可以满足 GCI 的要求。另外,电力用户的互操作意愿、能否积极响应对 GCI 的成功也至关重要,需要进行适用于智能电网运营的电价机制设计,文献[11-13]分析了几种动态的电力定价方式,如分时电价、尖峰电价、RTP 等促进 GCI 进行电力削峰填谷,以实现社会效益最大化。其中,RTP 为动态电价的高级形式,在传统电网技术下不易操

作;而在智能电网框架下,由于高级量测体系的支持使得 RTP 的实现成为可能,RTP 能反映电力商品的短期(15 min 或更短时间)生产成本,促进电力资源的优化配置,有助于实现电力市场的高效运营。

1.2 GCI 定性分析

由于智能电网下的电力市场提供了灵活的经济激励信号,因此 GCI 操作将会产生电网-用户双方共赢的结果。对于电网侧来讲,通过 GCI 操作可以将需求响应的资源变为可控资源,使得电网真正实现全局可控,这对电网的稳定、可靠运行非常有利;对于用户侧来讲,用户可以优化用电方案,还可以通过分布式电源或储能设备在谷荷低价时段储存电能、在峰荷高价时段向电网出售电能,从而使得用户在参与电网调度运行的同时自身也获得经济利益。

总体看来,CGI 操作将引导电网-用户友好互动,移峰填谷作用更为显著,负荷曲线将更为平缓,日负荷率也将得到进一步提高。

2 智能工程混合模型^[8]

定义 1 对任何集合 X 和 Y ,它们之间的某种关系可以看做是一种映射 f ,称为广义模型,记为

$$f: x \rightarrow y \quad x \in X, y \in Y \quad (1)$$

广义模型是对传统数学模型的扩展,可以将那些难以用数学模型表达的事物间客观存在的关系表达出来,并用科学的方法进行研究。智能工程广义模型主要包括数学模型(mathematical model)、规则模型(rule based model)、模糊推理模型(fuzzy inference model)、神经网络模型(neural networks model)、混合模型(hybrid model)这 5 种类型。

定义 2 具有数学模型、规则模型、模糊推理模型、神经网络模型中 2 种形式以上的模型称为智能工程混合模型。通常智能体(agent)可以称为一个混合模型,多智能体在协作交互的过程中运用多种智能算法对复杂问题进行求解。

考虑到 GCI 中用户对电价信号响应的模糊性以及用户、电力行业追求自身利益最大化的自主性,本文基于智能工程理论建立了一个基于模糊推理的混合模型。

3 GCI 影响负荷曲线模拟的混合模型设计

GCI 对负荷曲线的定性分析说明,GCI 对社会、电力企业、电力用户都有着不同程度的影响,但在工程实践中必须对 GCI 的影响进行量化才能给负荷预测、电网规划提供建设性的参考。电力企业、用户在 GCI 框架下对 RTP 的波动会做出不同的响应,智能体建模技术适用于模拟个体的自主响应行

为^[14],但电网、用户能够做出多大的响应又具有模糊性,这些特征符合智能工程混合模型的特点。

3.1 GCI 混合模型协调机制

GCI 机制下电网控制中心根据电力供需状况实时产生 RTP,智能用电终端根据 RTP 的变化进行响应。GCI 智能工程混合模型涉及 3 类智能体:控制中心智能体(control center agent,CCA)、发电智能体(generation agent,GA)、用户智能体(consumer agent,CA),其协调机制如图 1 所示。

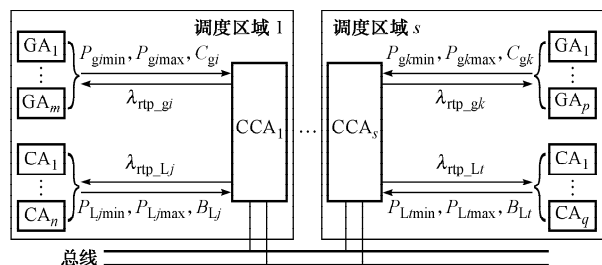


图 1 混合模型协调机制

Fig. 1 Coordination mechanism of hybrid model

1)调度区域内协调(以调度区域 1 为例):各 GA 将电厂出力上下限 $P_{g\max}$, $P_{g\min}$ 及发电报价 C_{gi} , 各 CA 将电力需求上下限 $P_{Lj\max}$, $P_{Lj\min}$ 及用电报价 B_{Lj} 发送至 CCA。CCA 根据电网实时状态、电网约束及 GA 和 CA 发送的信息计算实时电价 λ_{rtp_gi} 和 λ_{rtp_Lj} ,并向电力市场发布信息,GA 和 CA 从电力市场自适应地感知 RTP 的波动并进行响应,根据报价、中标功率、RTP 等改变下一报价时段的发电报价和用电报价。如此进行迭代,在电力市场中发挥 RTP 的杠杆作用,实现控制中心与厂站、用户的友好互动。

2)区域间协调:不同调度区域之间也需要进行实时的信息交互,必要时进行跨区服务,实现大范围的资源优化配置。不同调度区域的 CCA 以总线或其他方式进行通信,实时交换区域的状态信息、电价信息等。

3.2 CCA

CCA 模拟智能电网的控制中心,根据能源市场提供的发电信息、负荷信息、电网运行的物理约束,GA 和 CA 的响应对系统的功率进行计算。在采样周期内对系统进行最优潮流计算,并判断是否发生线路或断面传输功率越限、节点电压越限、爬坡功率越限等。CCA 的目标是实现社会效益最大化,即

$$\max f = - \sum_{i \in G} C_i(P_{gi}) + \sum_{j \in D} B_j(P_{Lj}) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in G} P_{gi} - \sum_{j \in D} P_{Lj} - P_{\text{Loss}} = 0 \quad (3)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (i, j) \in L \quad (4)$$

式中: G 为发电机节点集合; D 为负荷节点集合; $C_i(P_{gi})$ 为发电机 i 的报价; P_{gi} 为发电机的有功功率; $B_j(P_{Lj})$ 为负荷节点 j 的用电效益; P_{Lj} 为负荷节点 j 的有功功率; P_{Loss} 为网损, 是 (P_{gi}, P_{Lj}) 的函数; P_{ij} 为支路 (i, j) 的传输功率, 是 (P_{gi}, P_{Lj}) 的函数; $P_{ij, \max}$ 为支路 (i, j) 的最大传输功率; L 为线路集合。

为了生成 RTP, 构建增广拉格朗日函数如下:

$$F = f - \lambda \left(\sum_{i \in G} P_{gi} - \sum_{j \in D} P_{Lj} - P_{Loss} \right) - \sum_{(i,j) \in L} \mu_{ij} (P_{ij} - P_{ij, \max}) \quad (5)$$

式中: λ 和 μ_{ij} 为拉格朗日乘子。

$$\lambda_{\text{rtp_gi}} = \frac{\partial F}{\partial P_{gi}} = \frac{dC_i(P_{gi})}{dP_{gi}} + \lambda + \lambda \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{gi}} - \sum_{(i,j) \in L} \mu_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{gi}} \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{rtp_Lj}} = \frac{\partial F}{\partial P_{Lj}} = \frac{dB_j(P_{Lj})}{dP_{Lj}} + \lambda + \lambda \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{Lj}} - \sum_{(i,j) \in L} \mu_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Lj}} \quad (7)$$

根据式(6)、式(7), 系统动态产生出 RTP, 然后向电力市场发布 $\lambda_{\text{rtp_gi}}$ 和 $\lambda_{\text{rtp_Lj}}$ 信息。

3.3 GA

作为一个盈利主体, 发电商受市场利益的驱使和自身生存的需要追逐生产效益的最大化。GA 模拟发电商行为, 在满足各项发电约束的条件下以追求利润最大化为目标, 它的目标函数为:

$$\min f_i = C_i(P_{gi}) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (9)$$

$$Q_{gimin} \leq Q_{gi} \leq Q_{gimax} \quad (10)$$

式中: Q_{gimax} 和 Q_{gimin} 分别为发电机 i 无功出力的上下限。

各 GA 实时感知 RTP 信息, 根据 RTP 的变化实时响应, 改变下一时段的报价行为。假设 GA 的报价曲线为正斜率的线性函数:

$$C_i(P_{gi}) = b_{gi} + c_{gi} P_{gi} \quad i \in G \quad (11)$$

式中: b_{gi} 和 c_{gi} 为 GA 报价-功率曲线的参数。

GA 的报价响应函数与上个报价时段的报价函数、中标功率及实时电价有关, 报价函数的响应规则可表示为:

$$C_i(t+1) = \tau_{gi} f(C_i(t), P_{gi}(t), \lambda_{\text{rtp_gi}}(t)) \quad (12)$$

式中: τ_{gi} 为发电机 i 的电价响应系数。

3.4 CA

电力用户以自身利益最大化为目标, 根据 RTP 改变其用电行为, 在电价高峰时转移高峰负荷或向电网回送电力, 而在电价低谷时用电或储存电力。用户的目标函数表示为:

$$\max f_j = B_j(P_{Lj}) =$$

$$\left[\sum_j \left(-\lambda_{Lj} P_{Lj_mod} - \sum_k \lambda_{Lk} P_{Ljk} \right) \right] \quad (13)$$

$$\text{s. t. } P_{Lj_mod} = P_{Lj_basic} + \sum_k (P_{Ljk} - P_{Lkj}) \quad (14)$$

$$P_{Ljmin} \leq P_{Lj_mod} \leq P_{Ljmax} \quad (15)$$

$$\sum_j P_{Ljk} \leq P_{Lk, \max} \quad (16)$$

$$P_{cmin} \leq P_c \leq P_{cmax} \quad c \in D \quad (17)$$

$$Q_{cmin} \leq Q_c \leq Q_{cmax} \quad c \in D \quad (18)$$

式中: λ_{Lj} 和 λ_{Lk} 分别为时段 j 和 k 的电价; P_{Lj_mod} 为时段 j 用户进行响应后的负荷; P_{Ljk} 为用户由时段 j 转移至时段 k 的负荷; P_{Lj_basic} 为时段 j 的刚性需求; P_{cmin} 和 P_{cmax} 分别为用户负荷有功功率 P_c 的最小和最大值; Q_{cmin} 和 Q_{cmax} 分别为用户负荷无功功率 Q_c 的最小和最大值。

假定用户的报价函数为负斜率的线性函数:

$$B_j(P_{Lj}) = b_{Lj} + c_{Lj} P_{Lj} \quad j \in D \quad (19)$$

式中: P_{Lj} 为用户 j 消费的有功功率; b_{Lj} 和 c_{Lj} 为 CA 报价-功率曲线的参数。

CA 的报价响应函数与上个报价时段的报价函数、消费功率及实时电价有关, 报价函数的响应规则可表示为:

$$B_j(t+1) = \tau_{dj} f(B_j(t), P_{Lj}(t), \lambda_{\text{rtp_Lj}}(t)) \quad (20)$$

式中: τ_{dj} 为用户 j 的电价响应系数, 根据 $B_j(P_{Lj})$, P_{Lj} 与 $\lambda_{\text{rtp_Lj}}$ 的大小, 用户可选择储能、负荷转移、消费或回送电力等行为。

CA 实时感知 RTP 信息, 根据 RTP 的变化和自身的可响应负荷进行响应, 但 CA 的电价响应更为复杂, 很难确定 CA 在某一电价水平的电力消费行为。CA 的响应具有模糊性, 可建立电价模糊子集 $\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}$ 、可响应负荷模糊子集 $\tilde{P}_{Lj_res}$ 和实际响应模糊子集 $\tilde{\tau}_{dj}$, 三者之间存在模糊映射关系:

$$f: (\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}, \tilde{P}_{Lj_res}) \rightarrow \tilde{\tau}_{dj} \quad (21)$$

$\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}$, $\tilde{P}_{Lj_res}$ 和 $\tilde{\tau}_{dj}$ 的隶属函数可选择三角形隶属函数。例如: 对于 $\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}(r_1, r_2, r_3)$, $r_1 < r_2 < r_3$, 有

$$\mu_{\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}}(x) = \begin{cases} \frac{x-r_1}{r_2-r_1} & r_1 \leq x \leq r_2 \\ \frac{x-r_3}{r_2-r_3} & r_2 < x \leq r_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

4 算例分析

用户侧在 GCI 操作中主要通过分布式电源、分布式储能装置、电动汽车等与电网进行互操作。本文以电动汽车作为 GCI 的典型应用并基于智能工

程混合模型进行 GCI 对负荷曲线影响的定量模拟,电动汽车电池组的参数见附录 A。

以新英格兰 IEEE 39 节点系统为例建立智能工程混合模型,其系统结构见附录 B。以电动汽车电池代理商为基础构建 17 个 CA 加入负荷节点与电网进行交互式操作,构建 10 个 GA 加入电源节点进行电价响应,各 GA 和 CA 参数见附录 C 表 C1、表 C2。

CA 的 $\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}$ 依实时电价的高低、 $\tilde{P}_{\text{Lj_res}}$ 依可响应负荷的大小可用模糊语言分别表示为:

$$\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}} = \{S, M, B\} \tag{22}$$

$$\tilde{P}_{\text{Lj_res}} = \{S, M, B\} \tag{23}$$

式中:S 表示小;M 表示中;B 表示大。

CA 的模糊规则库如表 1 所示。

表 1 CA 模糊规则库
Tab. 1 Fuzzy rule base of CA

$\tilde{P}_{\text{Lj_res}}$	$\tilde{\tau}_{\text{dj}}$		
	$\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}=S$	$\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}=M$	$\tilde{\lambda}_{\text{rtp_Lj}}=B$
S	S	S	M
M	S	M	B
B	M	B	B

2005 年,美国日平均上下班时间为 52 min,日平均驾里程为 50 km^[15],电动汽车充电时间平均为 5 h。对美国新英格兰 2006 年冬季典型日负荷曲线进行适当尺度的变换,作用于新英格兰 IEEE 39 节点测试系统。假设各节点电动汽车电池的初始平均荷电状态为 15%,采样时间取为 1 h(与负荷数据采样周期相同,实际中可以取更小)。运行混合模型建模仿真,各 CA 按自身的目标根据模糊推理规则对 RTP 进行响应,其中智能体 CA₁, CA₂, CA₆, CA₉, CA₁₁, CA₁₂ 的各时段响应电量如图 2 所示。

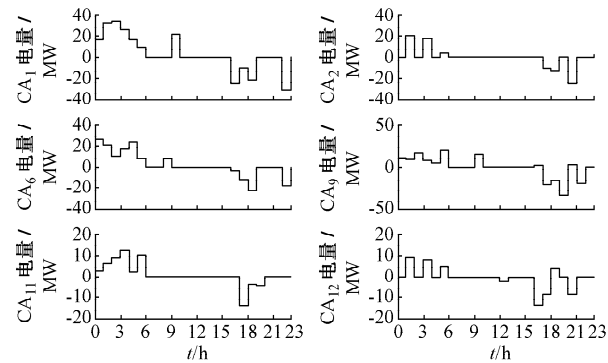


图 2 CA 的响应电量
Fig. 2 Responsive electricity quantity of CA

可以看出,大部分 CA 都选择在 00:00—06:00 的负荷低谷时段进行充电操作,而选择 16:00—

21:00 的负荷高峰时段向电网进行送电操作,反映了用户在 GCI 机制下积极参与电网的运行调节,系统负荷曲线变化的情况如图 3 所示。

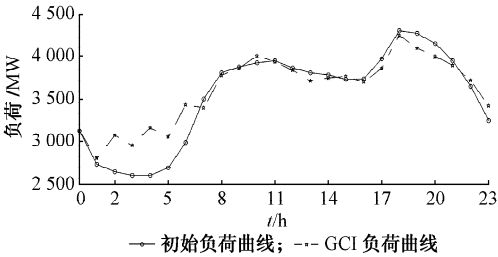


图 3 初始负荷曲线与 GCI 负荷曲线对比
Fig. 3 Comparison of initial load curve and GCI load curve

表 2 列出了 GCI 对负荷曲线的定量模拟结果。最大负荷 P_{peak} 较初始负荷曲线下降了 54.86 MW,最小负荷 P_{valley} 提高了 198.82 MW,平均负荷 P_{ave} 上升了 68.33 MW,峰谷差 $P_{\text{peak-valley}}$ 减少了 253.68 MW,日负荷率提高了 2.66%,说明 GCI 改善了负荷曲线的形状,在接入清洁能源的同时提高了电力系统的资产利用率。

表 2 负荷曲线指标对比
Tab. 2 Comparison of load curves' indices

条件	$P_{\text{peak}}/\text{MW}$	$P_{\text{valley}}/\text{MW}$	P_{ave}/MW	$P_{\text{peak-valley}}/\text{MW}$	日负荷率/%
初始	4 305.18	2 601.53	3 534.77	1 703.65	82.11
GCI	4 250.32	2 800.35	3 603.10	1 449.97	84.77

5 结语

需方响应以及电网-用户之间的互操作性成为智能电网的核心特征,智能电网应该利用需方资源与电网友好互动。GCI 操作对社会、电力企业、电力用户的影响必须进行定量分析才能给负荷预测、电网规划提供建设性的参考。根据 GCI 的模糊性与自适应性提出了模拟框架,建立了控制中心智能体、发电智能体、用户智能体,并基于智能工程混合模型建模技术在电力市场环境下进行 GCI 模拟。结果表明 GCI 实现了电网与用户的友好互动,电网在利用用户侧资源的同时改善了负荷曲线的形状。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. "GRID 2030" a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. [2009-05-09]. http://climatevision.gov/sectors/electricpower/pdfs/electric_

- vision. pdf.
- [2] European Commission. European smartgrids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future[EB/OL]. [2009-03-15]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [3] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 张钦, 王锡凡, 付敏, 等. 需求响应视角下的智能电网[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 49-55.
ZHANG Qin, WANG Xifan, FU Min, et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 49-55.
- [5] BELHOMME R, DEASUA R C R, VALTORTA G. ADDRESS—active demand for the smart grids of the future [C]// Proceedings of CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, June 23-24, 2008, Frankfurt, Germany.
- [6] 谭忠富, 曹福成, 王绵斌, 等. 供电公司实施可中断负荷的风险决策优化模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 129-134.
TAN Zhongfu, CAO Fucheng, WANG Mianbin, et al. Research on risk decision-making optimum model of actualizing interruptible load for power supply enterprise[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 129-134.
- [7] 胡兆光, 方燕平. 智能工程及其在电力发展战略研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 45-49.
HU Zhaoguang, FANG Yanping. Intelligent engineering and its application to power development strategy study[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 45-49.
- [8] 胡兆光, 单葆国. 电力供需模拟试验——基于智能工程的软科学实验室[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 丁伟, 胡兆光. 智能工程理论扩展及其在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 15-21.
DING Wei, HU Zhaoguang. Intelligent engineering theory expanding and its application in transmission planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 15-21.
- [10] HEIDELL J, WARE H. Is there a case for broadband utility communications networks? Valuing and pricing incremental communications capacity on electric utility smart grid networks [J]. The Electricity Journal, 2010, 23(1): 21-33.
- [11] CHAO Hungpo. Price-responsive demand management for a smart grid world[J]. The Electricity Journal, 2010, 23(1): 7-20.
- [12] NEWSHAM G R, BOWKER B G. The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: a review[J]. Energy Policy, 2010, 38(7): 3289-3296.
- [13] CENTOLELLA P. The integration of price responsive demand into regional transmission organization (RTO) wholesale power markets and system operations [J]. Energy, 2010, 35(4): 1568-1574.
- [14] 田建伟, 胡兆光, 吴俊勇, 等. 基于多智能体建模的经济-电力动态模拟系统[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 85-91.
TIAN Jianwei, HU Zhaoguang, WU Junyong, et al. Dynamic economy and power simulation system based on multi-agent modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 85-91.
- [15] LANGER G. Poll: traffic in the United States [EB/OL]. [2005-02-13]. <http://abcnews.go.com/technology/traffic/story?id=485098&page=1>.

田建伟(1977—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 智能电网、智能工程理论在电力系统中的应用。
E-mail: 07117318@bjtu.edu.cn

胡兆光(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力技术经济、需求侧管理、智能工程理论。

周景宏(1976—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力规划与电力经济。

Quantitative Simulation of Grid-consumer Interoperability on Load Curve

TIAN Jianwei¹, HU Zhaoguang^{1,2}, ZHOU Jinghong³, XIAO Xiao³, WU Junyong¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China;

3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Grid-consumer interoperability (GCI) implementation foundation and its effects on load curve in a smart grid are analyzed. Basically GCI is fuzzy and adaptive, as a result, it is difficult to quantitatively simulate GCI effect by traditional modeling technology. Intelligent engineering hybrid model is a promising modeling tool to address such difficulty. Based on the characteristics of GCI, an intelligent engineering hybrid model is developed. The model includes control center agent, generation agent and consumer agent. Consumer agent fuzzily inferences its electricity consumption behavior based on the fluctuation of real time price and the size of responsive load in the electricity market environment, then load curve is influenced further. Simulation on IEEE 39-bus New England system demonstrates the validity of proposed quantitative simulation approach and the intelligent engineering hybrid modeling technique.

This work is supported by Energy Foundation of U. S. (No. G-0601-08211).

Key words: grid-consumer interoperability; load curve; quantitative simulation; smart grid; intelligent engineering; hybrid model

附录 A 电动汽车电池组充放电参数

假设每个电动汽车电池组包含 88 个电池单元，每个电池单元的额定电压 V_{nom} 、额定容量 C_{nom} 、充电效率 η 、内阻 R_{int} 、充电最高电压 V_{max} 、放电终止电压 V_{min} 、荷电状态 SOC 等参数、开路电压(open circuit voltage, OCV) 和闭路电压 (closed circuit voltage, CCV) 曲线分别如表 A1、图 A1 所示^[A1]。

表 A1 电动汽车电池参数
Tab.A1 Battery parameters of electric vehicle

V_{nom}/V	C_{nom}/Ah	η	R_{int}/Ω	V_{max}/V	V_{min}/V	$SOC_{min}/\%$	$SOC_{max}/\%$
3.7	50	1	0.004	4.1	2.7	10	90

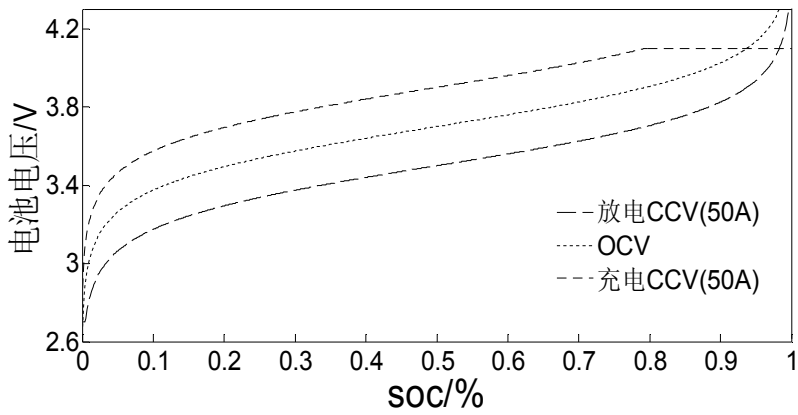


图 A1 电动汽车电池的充放电曲线
Fig.A1 Charging and discharging curve of electric vehicle battery

附录 B 新英格兰 IEEE 39 节点系统

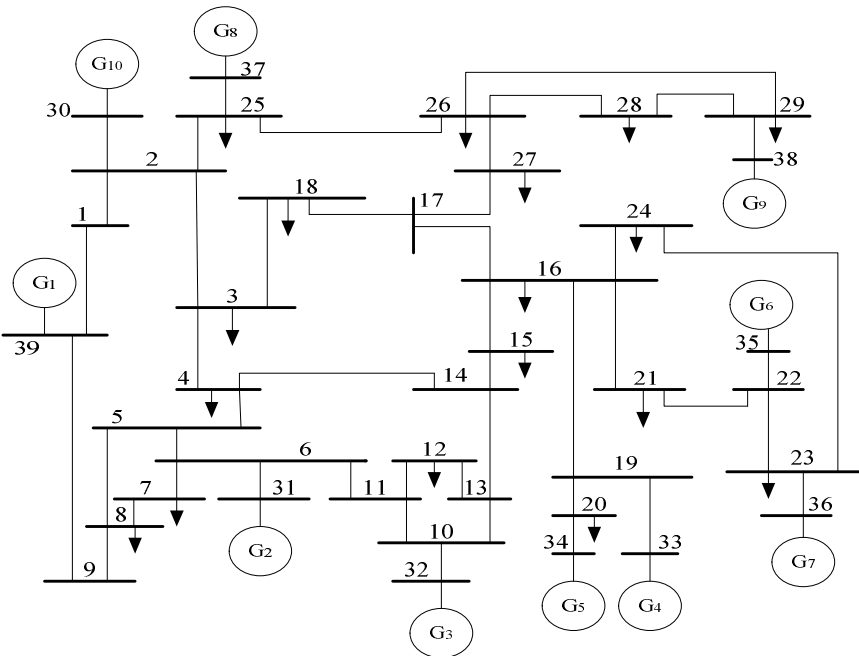


图 B1 新英格兰 IEEE 39 节点系统
Fig.B1 New England IEEE 39-bus system

附录 C GA 和 CA 参数^[C1]

表 C1 GA 参数
Tab.C1 Parameters of GA

GA	$b_g / (\text{美元}/(\text{MW} \cdot \text{h}))$	$c_g / (\text{美元}/(\text{MW}^2 \cdot \text{h}))$	τ_g
GA ₁ (30)	30.00	0.8	35
GA ₂ (31)	36.99	0.7	30
GA ₃ (32)	35.45	0.7	25
GA ₄ (33)	34.94	0.8	30
GA ₅ (34)	35.94	0.8	25
GA ₆ (35)	34.80	0.8	30
GA ₇ (36)	34.40	1.0	30
GA ₈ (37)	35.68	0.8	30
GA ₉ (38)	33.36	0.8	30
GA ₁₀ (39)	34.00	0.6	35

注：括号中的数字代表发电机接入的节点号。

表 C2 CA 参数
Tab.C2 Parameters of CA

CA	$b_L / (\text{美元}/(\text{MW} \cdot \text{h}))$	$c_L / (\text{美元}/(\text{MW}^2 \cdot \text{h}))$	$[\tau_{d_min}, \tau_{d_max}]$	n
CA ₁ (3)	42.58	-0.8	[130,170]	5000
CA ₂ (4)	43.50	-0.7	[130,170]	7600
CA ₃ (7)	41.40	-0.6	[130,170]	3600
CA ₄ (8)	43.13	-0.6	[135,175]	8000
CA ₅ (12)	40.07	-0.8	[130,170]	130
CA ₆ (15)	42.56	-0.8	[130,170]	4900
CA ₇ (16)	42.31	-0.7	[135,175]	5000
CA ₈ (18)	40.95	-0.6	[130,170]	2400
CA ₉ (20)	45.44	-0.8	[135,175]	10000
CA ₁₀ (21)	41.92	-0.7	[130,170]	4200
CA ₁₁ (23)	41.73	-0.7	[130,170]	3800
CA ₁₂ (24)	41.85	-0.6	[135,175]	4700
CA ₁₃ (25)	41.34	-0.6	[135,175]	3400
CA ₁₄ (26)	40.97	-0.7	[130,170]	2100
CA ₁₅ (27)	41.97	-0.7	[130,170]	4300
CA ₁₆ (28)	41.65	-0.8	[130,170]	0
CA ₁₇ (29)	41.98	-0.7	[140,180]	0

注：括号中的数字代表负荷接入的节点号; n 为电动汽车的辆数。

参考文献

- [A1] OTA Y, TANIGUCHI H, Nakajima T, et al. An autonomous distributed vehicle-to-grid control of grid-connected electric vehicle[C]// Proceedings of ICHS 2009, December 28-31, 2009, Kandy, SriLanka.
- [C1] ALVARADO F L, MENG Jianping, DEMARCO C L, et al. Stability analysis of interconnected power systems coupled with market dynamics. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 695-701.