

带有储能设备的智能电网电能迭代自适应 动态规划最优控制

王 澄¹ 刘德荣² 魏庆来² 赵冬斌² 夏振超³

摘 要 智能电网是新一代电网建设的目标,也是国际电力工业界的共同选择.本文研究在储能设备接入电网情况下,建立一套基于自适应动态规划(Adaptive dynamic programming, ADP)的智能电网电能自适应优化控制的理论与方法,实现电网发电端以及用户端的智能交互,开辟对智能电网供需优化匹配与调控方法的新途径.论文首先给出动态规划的最优性原理以及带有储能设备智能电网的运行方式并提出优化目标;然后,设计新型迭代自适应动态规划方法实现对储能设备的最优控制,并证明自适应动态规划方法的收敛性,在理论上保证了对智能电网电能的优化;最后,给出仿真例子显示出所提出控制方法的有效性.

关键词 智能电网, 自适应动态规划, 储能设备, 最优控制, 非线性系统

引用格式 王澄, 刘德荣, 魏庆来, 赵冬斌, 夏振超. 有储能设备的智能电网电能迭代自适应动态规划最优控制. 自动化学报, 2014, 40(9): 1984–1990

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01984

Iterative Adaptive Dynamic Programming Approach to Power Optimal Control for Smart Grid with Energy Storage Devices

WANG Cheng¹ LIU De-Rong² WEI Qing-Lai² ZHAO Dong-Bin² XIA Zhen-Chao³

Abstract The smart grid is a new generation of power grids, and also the common choice of the international power industry. This paper aims to establish a new adaptive optimal control theory and a set of methods based on adaptive dynamic programming (ADP) for a smart grid with energy storage devices. The intelligent interactions between the power generation side and the clients can be finally achieved to create a new way of optimal matching of the supply and demand for the smart grid. First, the optimality principle of dynamic programming for the grid with energy storage devices is given, and optimization objective is then presented. Then a new iterative adaptive dynamic programming method is developed to achieve the optimal control of energy storage devices, and convergence of the adaptive dynamic programming method is also proved. Finally, a simulation example is given to show the effectiveness of the method.

Key words Smart grid, adaptive dynamic programming (ADP), energy storage devices, optimal control, nonlinear systems

Citation Wang Cheng, Liu De-Rong, Wei Qing-Lai, Zhao Dong-Bin, Xia Zhen-Chao. Iterative adaptive dynamic programming approach to power optimal control for smart grid with energy storage devices. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(9): 1984–1990

电力是现代社会发展的重要动力. 合理地进行

电网规划不仅可以获得巨大的社会效益,而且也可以获得巨大的经济效益.当前我国电力系统普遍存在低效率运行和严重能源浪费的问题,尤其是在配电和用电两个环节.引起配电网低效率运行和严重能源浪费的根本原因就是电网电能供需匹配失调.文献[1]中指出,解决上述问题的突破点在于负荷资源优化协调控制技术突破.而目前,我国针对负荷资源优化协调与控制的研究并不多见.其原因是电力生产过程是连续进行的,发电和负荷及损耗之间需要时时刻刻保持着基本的平衡,而电力系统中的用户对电力的需求随时间及外界因素的变化而不断变化[2].传统电力系统通过对可控发电机进行功率调节来维持发电和负荷的平衡,而智能电网包括很多

收稿日期 2013-07-15 录用日期 2013-12-05
Manuscript received July 15, 2013; accepted December 5, 2013
国家自然科学基金(61034002, 61233001, 61273140)和北京市自然科学基金(4132078)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61034002, 61233001, 61273140) and Natural Science Foundation of Beijing (4132078)

本文责任编辑 侯忠生

Recommended by Associate Editor HOU Zhong-Sheng

1. 广东省电力设计研究院 广州 510663 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 3. 广州供电局有限公司 广州 510620

1. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663 2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620

分布式电源, 其对外界气候、天气等因素比较敏感, 因此分布式电源发电的功率难以控制. 如果系统不能保证发电和负荷之间的平衡, 轻则电能质量恶化, 造成电压和频率偏差, 重则引发停电事故, 甚至会诱发电力系统的崩溃. 这就需要电力系统保留一定的裕量, 但又降低了系统的运行效率. 要从根本上解决这一问题, 最有效的方法就是从电源侧入手, 系统中安装一些大容量的储能元件, 系统电力充沛时储存能源, 电力紧缺时释放电力, 解决供需矛盾, 达到负荷资源优化协调控制的目的^[3]. 当前储能设备优化方面的研究比较缓慢, 而且所提出的算法大多是基于离线优化或静态优化 (如线性规划等)^[4-7]. 其原因在于电网的实时性、复杂性等特点, 难于建立机理数学模型, 而使得传统的优化控制算法失效. 同时, 在传统电网中负载端是被动的接受供电, 而无法与电网进行通讯和馈电, 这也是电网低效率运行和能源浪费的主要原因之一. 用电环节在不断智能化的同时, 也加大了电网负载侧的不确定性, 使得传统的基于模型的静态优化算法越来越不适用. 因此, 如何在发电、配电、用电网络日趋庞大复杂, 负载日益多样化、用户电能质量要求越来越高的情况下, 突破传统的基于模型的、静态优化的方法, 采用基于数据的优化方法, 实时有效地实现智能电网电能供需自适应优化匹配与调控是智能电网发展必须克服的瓶颈.

众所周知, 动态规划方法是解决最优控制的强有力工具^[8]. 然而, 很难将传统动态规划方法直接应用到实际系统当中去, 其中主要的原因是因为最优控制需要依时间顺序作用到系统中, 同时对于控制序列需要给出最优性能指标, 而整体的性能指标函数值在序列完成前是未知的, 即为熟知的“维数灾”问题. 自适应动态规划 (Adaptive dynamic programming, ADP) 由 Werbos 于 1977 年首次提出, 是解决动态规划“维数灾”问题的一种强有力的方法. 其本质上是基于增强式学习原理, 模拟人通过环境反馈进行学习的思路, 近年来被认为是一种非常接近人脑智能的方法. 它利用函数近似结构, 如神经网络来逼近动态规划中的代价函数和控制策略, 以满足最优性原理求解最优控制及性能指标函数, 从而实现非线性系统最优控制的求解问题^[9]. 在文献 [10] 中, Werbos 给出了自适应动态规划的基本自适应评判结构. 典型的自适应评判结构包括三个模块: 评判模块、模型模块以及执行模块, 其中每个模块均可用神经网络近似来实现. 这些模块组成了自适应动态规划系统或增强式学习系统. 在自适应动态规划系统中, 神经网络被设计用来近似性能指标函数, 计算性能指标函数的导数, 并估计 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程的解.

近几年来凭借其自身的强大优势, 自适应动态

规划理论不断进行自身的发展演化^[11], 已经渗透到了大量的科学领域并取得了卓越的成果^[12-19], 并且成为了现代复杂系统的科学与工程领域研究的一种及其重要的方法^[20-21]. 自适应动态规划算法已经被应用于其他理论研究工作和实际工程中, 如控制种群规模和无人直升机的跟踪控制^[22-23]. 然而, 在自适应动态规划的理论研究中, 采用自适应动态规划方法解决智能电网能量分配问题的研究却非常少见. 虽然在文献 [24] 中, Huang 等讨论了关于电网储能设备的自适应优化调控问题, 但是对算法收敛性却没有进行分析. 因此, 本文采用迭代自适应动态规划方法解决带有存储设备的智能电网能量优化的问题. 第 1 节首先给出了动态规划方法原理, 然后介绍了带有储能设备的智能电网运行原理并提出优化目标; 第 2 节给出了完整的自适应动态规划求解方案; 并在第 3 节中首次分析了智能电网自适应动态规划性能指标函数收敛性; 第 4 节的仿真例子验证了所提出控制方法的有效性; 最后, 对论文进行总结.

1 问题阐述

1.1 带有储能设备的智能电网工作原理

带有储能设备的智能电网运行模式如图 1 所示. 智能电网储能设备具有三种模式:

- 1) 充电模式: 当系统负载低、同时实时电价低时, 电网直接向负载供电, 同时储能设备考虑储能设备储能级别 (或储电量) 进行充电.
- 2) 空闲模式: 当实时电价不高或储电设备储能级别较高时, 电网直接向负载供电, 储能系统不动作.
- 3) 放电模式: 当实时电价高 (如用电高峰时段) 时, 不使用电网能源, 而由储电设备单独向负载供电.

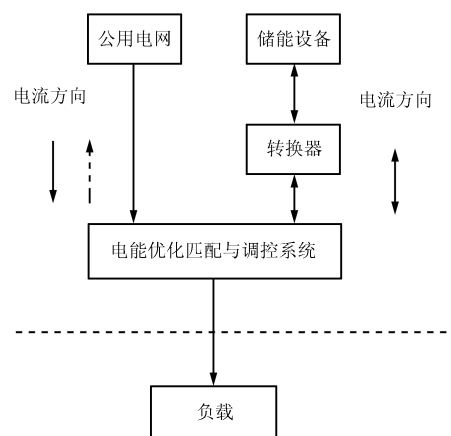


图 1 带有储能设备的智能电网电能供需匹配示意图
Fig. 1 Diagram of the energy management for the smart grid

当储能设备充电时可以表示为

$$\begin{aligned} E_b(t+1) &= E_b(t) - P_b(t+1)\eta(P_b(t+1)), \\ P_b(t+1) &< 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $E_b(t)$ 表示当前储能设备储存的电能, $P_b(t)$ 表示当前时刻储能设备的输出功率, $\eta(P_b(t))$ 表示电转换效率. 当储能设备放电时表示为

$$\begin{aligned} E_b(t+1) &= E_b(t) - P_b(t+1)\eta(P_b(t+1)), \\ P_b(t+1) &> 0 \end{aligned} \quad (2)$$

同时需要考虑储能设备自身的物理性约束.

1) 储能设备存储限制. 定义 $E_b(t)$ 为当前时刻的储能设备的储电等级 (或等量电能), 则 $E_b(t)$ 满足 $E_b^{\min} \leq E_b(t) \leq E_b^{\max}$, 其中 $E_b^{\min}$, $E_b^{\max}$ 表示最小、最大储电等级.

2) 为了安全使用储能设备, 定义 $P_b(t)$ 为充电 (或放电) 速率. 当 $P_b(t) < 0$ 表示充电速率, 当 $P_b(t) > 0$ 表示放电速率, $P_b^{\min} \leq P_b(t) \leq P_b^{\max}$, 其中 $P_b^{\min}$ 表示最小充电 (或放电) 速率, $P_b^{\max}$ 表示最大充电 (或放电) 速率.

对于负载端, 负载的消耗电功率等于储电设备供电功率与电网供电功率之和, 表示为

$$P_L(t) = P_b(t) + P_g(t) \quad (3)$$

其中 $P_L(t)$ 表示负载功率, $P_g(t)$ 表示电网的供电功率, $P_b(t)$ 为储能设备充电 (或放电) 速率. 因此, 优化问题可以描述为使得如下性能指标函数达到极小

$$\begin{cases} \min J(t) = \sum_{k=t}^{\infty} C(t) \times P_g(t) \\ \text{s.t.} \quad \text{所有负载正常运行} \\ \quad \quad \text{储能设备物理约束} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $C(t)$ 表示实时电价, $J(t)$ 性能指标函数. 我们用 $u(t) = -1$ 表示储能设备放电, 用 $u(t) = 0$ 表示储能设备空闲, 用 $u(t) = 1$ 表示储能设备充电.

1.2 动态规划最优控制原理

根据式 (4), 我们可以令

$$x(t) = P_g(t) \quad (5)$$

那么电网系统可以表示为考虑如下非线性系统

$$x(t+1) = F(x(t), u(t)) \quad (6)$$

其中 $x(t)$ 为系统状态, 表示当前 t 时刻储能设备实时状态信息、清洁能源实时状态信息以及实时电价等, $u(t)$ 为系统控制输入, 包括当前 t 时刻储能设备的实时工作包括储能设备的工作控制模式和分布式

电源工作控制模式, 系统函数 $F(\cdot)$ 为未知函数. 性能指标函数定义为

$$J(x(t)) = \sum_{j=0}^{+\infty} U(x(t+j), u(t+j)) \quad (7)$$

其中 $U(x(t), u(t)) > 0$ 为效用函数, 其表示为当前 t 时间段内的用户用电成本. 定义最优性能指标函数 $J^*(x(t))$ 为

$$J^*(x(t)) = \min_{u(t), u(t+1), \dots} \left\{ \sum_{j=0}^{+\infty} U(x(t+j), u(t+j)) \right\} \quad (8)$$

根据 Bellman 最优性原理可知最优性能指标函数 $J^*(x(t))$ 满足如下 HJB 方程

$$J^*(x(t)) = \min_{u_k} \{U(x(t), u(t)) + J^*(x(t+1))\} \quad (9)$$

可以看到, 为了求解 $J^*(x(t))$, 首先需要获得 $J^*(x(t+1))$. 这种求解方式就造成了“维数灾”问题, 即在动态求解最优性能指标函数的过程中, 状态变量维数增加时, 求解过程计算量会呈指数倍增加, 极大地限制了使用动态规划算法求解问题的能力^[25]. 因此, 本文提出新型的迭代自适应动态规划方法进行求解.

2 迭代自适应动态规划方法以及性能分析

本节中, 我们将采用一种迭代自适应动态规划方法求解系统最优控制.

迭代自适应动态规划方法求解带有储能设备的智能电网电能最优控制. 其思想是以任意半正定函数 (本文中初始函数设为 0) 为初始函数, 随着迭代指标的不断增加, 不断更新迭代控制策略与迭代性能指标函数, 最终使得性能指标函数收敛到 HJB 方程的解. ADP 方法的具体实践过程如下:

引入迭代指标 i . 首先令 $i = 0$, 初始迭代性能指标函数 $V_0(x(t)) \equiv 0$. 那么获得初始迭代控制律 $v_0(x(t))$ 如下:

$$v_0(x(t)) = \arg \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_0(x(t+1))\} \quad (10)$$

迭代性能指标函数为

$$\begin{aligned} V_1(x(t)) &= \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_0(x(t+1))\} = \\ &U(x(t), v_0(x(t))) + V_0(x(t+1)) \end{aligned} \quad (11)$$

对于迭代指标 $i = 1, 2, \dots$, 迭代自适应动态规划算法可以在如下两式之间进行迭代:

$$v_i(x(t)) = \arg \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_i(x(t+1))\} \quad (12)$$

以及

$$V_{i+1}(x(t)) = \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_i(x(t+1))\} = U(x(t), v_i(x(t))) + V_i(x(t+1)) \quad (13)$$

可以看到式 (9) 中的 $J^*(t)$ 被 $V_i(x(t))$ 所替代, 由于式 (13) 不是 HJB 方程, 因此一般的 $J^*(t) \neq V_i(x(t))$. 下面我们将证明当 $i \rightarrow \infty$, $V_i(x(t)) \rightarrow J^*(t)$.

引理 1. 令 $\mu(t)$, $t = 0, 1, \dots$, 为任意控制序列. 令 $v_i(x(t))$ 在式 (12) 中定义, 性能指标函数 $V_{i+1}(x(t))$ 在式 (13) 中定义. 定义一个新的性能指标函数 $\Lambda_i(x(t))$ 表示为

$$\Lambda_{i+1}(x(t)) = U(x(t), \mu(t)) + \Lambda_i(x(t+1)) \quad (14)$$

其中 $\Lambda_0(x(t)) \equiv 0$. 那么对 $\forall i = 0, 1, \dots$, 我们有:

$$V_i(x(t)) \leq \Lambda_i(x(t)) \quad (15)$$

定理 1. 令 $v_i(x(t))$ 在式 (12) 中定义, 性能指标函数 $V_{i+1}(x(t))$ 在式 (13) 中定义. 如果系统可控, 那么存在一个上界 Y 使得 $0 < V_{i+1}(x(t)) \leq Y$.

证明. 令 $\eta(t)$ 为任意容许控制序列 (Admissible control sequence). 定义新性能指标函数 $P(x(t))$ 为

$$P_{i+1}(x(t)) = U(x(t), \eta(t)) + P_i(x(t+1)) \quad (16)$$

那么得到:

$$P_{i+1}(x(t)) = \sum_{j=0}^{i-1} U(x(t+j), \eta(t+j)) + P_0(x(t+i)) = \sum_{j=0}^{i-1} U(x(t+j), \eta(t+j)) \quad (17)$$

根据引理 1, 有:

$$V_{i+1}(x(t)) \leq P_{i+1}(x(t)) \quad (18)$$

根据式 (17), 有:

$$P_{i+1}(x(t)) \leq \sum_{j=0}^{\infty} U(x(t+j), \eta(t+j)) \quad (19)$$

由于 $\eta(t)$ 为容许控制序列, 因此有:

$$\sum_{j=0}^{\infty} U(x(t+j), \eta(t+j)) \leq Y \quad (20)$$

是有界的. 因此有 $V_{i+1}(x(t)) \leq Y$ 有界. $\square$

定理 2. 令 $v_i(x(t))$ 在式 (12) 中定义, 性能指标函数 $V_{i+1}(x(t))$ 在式 (13) 中定义. 如果系统可控, 那么有 $V_i(x(t))$ 为单调非减有限序列, 即

$$V_{i+1}(x(t)) \leq V_i(x(t)) \quad (21)$$

证明. 此定理可采用数学归纳法证明. 首先, 令 $i = 0$, 由于 $V_0(x(t)) \equiv 0$, 那么有:

$$V_1(x(t)) \geq V_0(x(t)) \quad (22)$$

如果对于 $j-1$, $j = 1, 2, \dots$ 结论成立. 那么对于 j 有:

$$V_{j+1}(x(t)) = \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_j(x(t+1))\} \geq \min_{u(t)} \{U(x(t), u(t)) + V_{j-1}(x(t+1))\} = V_j(x(t)) \quad (23)$$

$\square$

3 迭代自适应动态规划方法实现

从上面的分析我们可以看到迭代自适应动态规划算法具有很好的收敛性. 在对储能设备的控制问题上, 我们看到储能设备的控制方案是有限的 (即 $-1, 0, 1$). 因此, 基于上述分析带有储能设备的电网电能供需优化自适应动态规划方法实现可由图 2 表示.

自适应动态规划实现方法步骤如下:

步骤 1. 根据电网系统运行数据训练评判网络, 初始化性能指标函数, 令 $i = 0, 1, \dots$ 为迭代指标.

步骤 2. 令 $i = 0$, 获得响应的状态数据. 将可选择控制策略 $u(t)$ 及状态数据带入评判网络, 根据式 (10) 并通过比较获得迭代控制策略 $v_0(k)$.

步骤 3. 针对当前状态训练执行网络, 根据式 (11), 获得迭代性能指标函数设为 $V_1(x(t))$.

步骤 4. 令 $i = i + 1$, 获得响应的状态数据. 将可选择控制策略 $u(t)$ 及状态数据带入评判网络, 根据式 (12) 并通过比较获得迭代控制策略 $v_i(k)$.

步骤 5. 针对当前状态训练执行网络, 根据式 (13), 获得迭代性能指标函数设为 $V_{i+1}(x(t))$.

步骤 6. 如果 $|V_{i+1}(x(t)) - V_i(x(t))| \leq \varepsilon$, 那么转到步骤 7; 否则, 转到步骤 4.

步骤 7. 算法输出 $v_i(k)$.

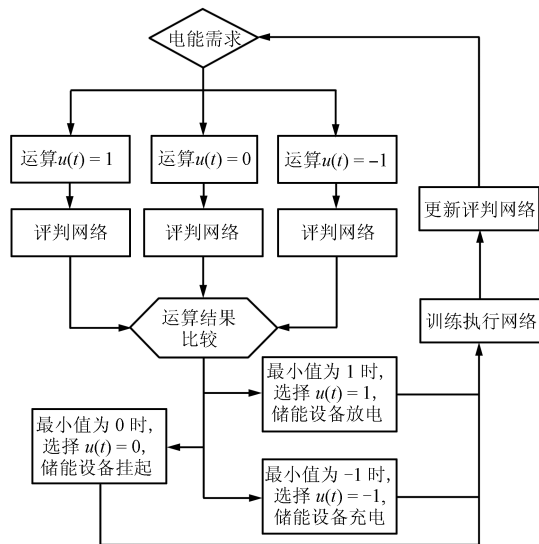


图 2 带有储能设备的智能电网电能供需自适应优化匹配与调控方案示意图

Fig. 2 The diagram of the optimal energy management of smart grid with batteries

4 仿真研究

在本节中, 我们将给出仿真实例验证本文提出的带有储能设备的智能电网电能迭代自适应动态规划调控方案的有效性. 令系统函数如式 (1) 表达, 令性能指标函数为式 (7). 控制量 $u(t)$ 为储能设备的充放电控制策略. 接下来, 采用神经网络实现自适应动态规划算法, 其具体构建方案如图 3 所示.

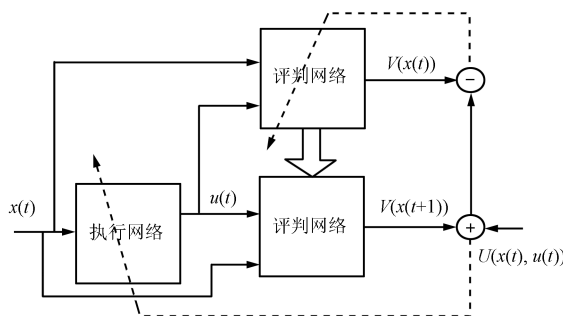


图 3 智能电网电能优化的自适应动态规划方法实现框图
Fig. 3 Flow chart of the adaptive dynamic programming strategy for energy optimization of smart grid

首先, 需要根据离线采集的 (历史) 数据对神经网络进行预学习 (离线学习), 其数据由图 4 与图 5 表示. 其中图 4 给出了每天电价的 24 小时变化数据, 图 5 给出了每天用户的用电负载负荷变化数据.

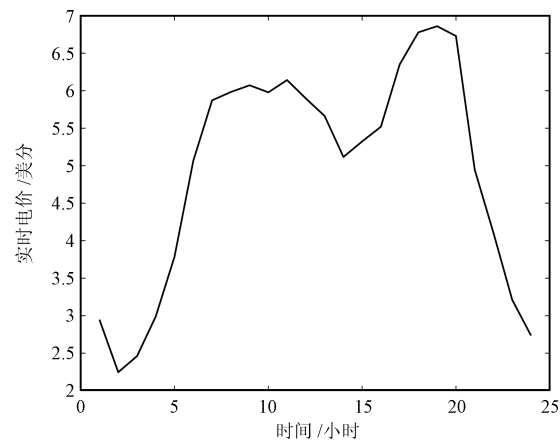


图 4 电价的 24 小时变化数据图
Fig. 4 Electricity price in 24 hours

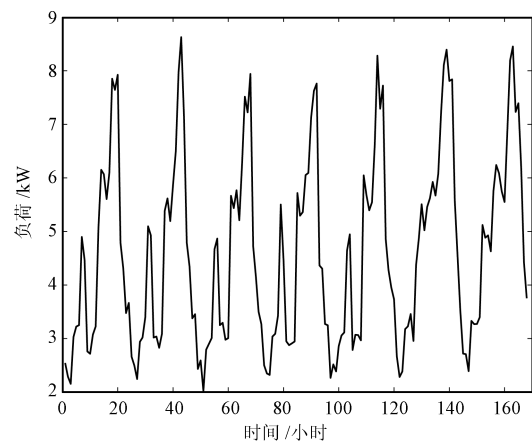


图 5 最优用电费用函数曲线
Fig. 5 Optimal performance index function

当神经网络预学习之后, 自适应动态规划方法将根据电网的实时数据进行最优控制. 应用自适应动态规划进行智能电网电能优化的结果如图 6 所示. 相应的最优用电费用函数曲线如图 7 所示. 可以看到, 当用户负载、电网电价等实时变化的情况下, 应用电网实时数据, 自适应动态规划方法对智能电网电能起到了很好的实时优化作用.

5 结语

本文以电网运行数据为基础, 综合考虑储能设备与实时电价等因素, 采用自适应动态规划理论优化智能电网电能供需分配并获得优化调控策略. 论文给出了性能指标函数收敛的证明, 确保获得的迭代控制可以使得性能指标函数收敛到最优, 仿真结果验证了方法的有效性.

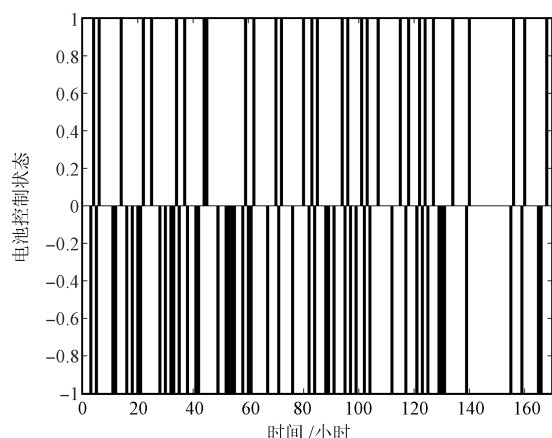


图6 带有储能设备的基于数据的智能电网电能自适应动态规划优化控制图

Fig. 6 Optimal control scheme of smart grid with energy storage devices using adaptive dynamic programming

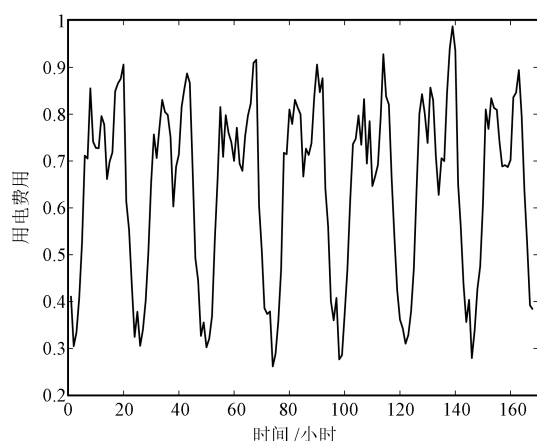


图7 用电负载负荷的变化数据图

Fig. 7 Diagram for the power load

References

- Ma Qi-Yan, Qin Li-Jun. Key technologies of smart distribution grid. *Modern Electric Power*, 2010, **27**(2): 39–44 (马其燕, 秦立军. 智能配电网关键技术. 现代电力, 2010, **27**(2): 39–44)
- Gellings C W. *The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 2009.
- Zhen Xiao-Ya, Yin Zhong-Dong, Sun Zhou. Advanced energy storage technology in the application of the smart grid and its prospect. *Electric Age*, 2011, (1): 44–47 (甄晓亚, 尹忠东, 孙舟. 先进储能技术在智能电网中的应用和展望. 电气时代, 2011, (1): 44–47)
- Xu Yan-Wei, Jia Rong. Application of artificial immune theory-based ant colony system (AIACS) in reconfiguration of distribution networks. *Power System Protection and Control*, 2010, **38**(18): 89–93 (徐延伟, 贾嵘. 基于人工免疫思想的蚁群算法 (AIACS) 在配电网重构中的应用. 电力系统保护与控制, 2010, **38**(18): 89–93)
- Hung M H, Shu L S, Ho S J, Hwang S F, Ho S Y. A novel intelligent multiobjective simulated annealing algorithm for designing robust PID controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, **38**(2): 319–330
- Green R C, Wang L F, Alam M, Singh C. Intelligent and parallel state space pruning for power system reliability analysis using MPI on a multicore platform. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2011, **18**(2): 1–8
- Qi Fang, Zhang Li-Zi, Wei Bin, Que Guang-Hui. Study on electricity tariffs based on Ramsey pricing theory. *Power Demand Side Management*, 2010, **12**(2): 24–27 (齐放, 张粒子, 魏玢, 阙光辉. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究. 电力需求侧管理, 2010, **12**(2): 24–27)
- Zhang Hua-Guang, Zhang Xin, Luo Yan-Hong, Yang Jun. An overview of research on adaptive dynamic programming. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 303–311 (张化光, 张欣, 罗艳红, 杨珺. 自适应动态规划综述. 自动化学报, 2013, **39**(4): 303–311)
- Powell W B. *Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality*. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- Werbos P J. *Approximate dynamic programming for real-time control and neural modeling. Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches (Chapter 13)*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- Wang F Y, Zhang H G, Liu D R. Adaptive dynamic programming: an introduction. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2009, **4**(2): 39–47
- Liu D R, Zhang Y, Zhang H G. A self-learning call admission control scheme for CDMA cellular networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, **16**(5): 1219–1228
- Zhang H G, Wei Q L, Luo Y H. A novel infinite-time optimal tracking control scheme for a class of discrete-time nonlinear systems via the greedy HDP iteration algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, **38**(4): 937–942
- Zhang H G, Wei Q L, Liu D R. An iterative adaptive dynamic programming method for solving a class of nonlinear zero-sum differential games. *Automatica*, 2011, **47**(1): 207–214
- Heydari A, Balakrishnan S N. Finite-horizon control-constrained nonlinear optimal control using single network adaptive critics. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, **24**(1): 145–157
- Zhang H G, Luo Y H, Liu D R. Neural-network-based near-optimal control for a class of discrete-time affine nonlinear systems with control constraints. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, **20**(9): 1490–1503
- Zhao Dong-Bin, Liu De-Rong, Yi Jian-Qiang. An overview on the adaptive dynamic programming based urban city traffic signal optimal control. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 676–681 (赵冬斌, 刘德荣, 易建强. 基于自适应动态规划的城市交通信号优化控制方法综述. 自动化学报, 2009, **35**(6): 676–681)
- Hou Zhong-Sheng, Xu Jian-Xin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 650–667 (侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望. 自动化学报, 2009, **35**(6): 650–667)
- Hou Zhong-Sheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective. *Control Theory & Applications*, 2006, **23**(4): 586–592 (侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望. 控制理论与应用, 2006, **23**(4): 586–592)

- 20 Lewis F L, Liu D R. *Reinforcement Learning and Approximate Dynamic Programming for Feedback Control*. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- 21 Liu De-Rong, Li Hong-Liang, Wang Ding. Data-based self-learning optimal control: research progress and prospects. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1858–1870
(刘德荣, 李宏亮, 王鼎. 基于数据的自学习优化控制: 研究进展与展望. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1858–1870)
- 22 Zhang T P, Lu Y, Zhu Q, Shen Q K. Adaptive dynamic surface control with unmodeled dynamics. In: *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference (CCC)*. Hefei, China: IEEE, 2012. 2859–2864
- 23 He Yue-Bang, Pei Hai-Long, Ye Xiang, Zhang Qian. Trajectory tracking control of unmanned helicopters by using adaptive dynamic surface approach. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, **41**(5): 1–8
(贺跃帮, 裴海龙, 叶祥, 张谦. 无人直升机的自适应动态面轨迹跟踪控制. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, **41**(5): 1–8)
- 24 Huang T, Liu D R. A self-learning scheme for residential energy system control and management. *Neural Computing and Applications*, 2013, **22**(2): 259–269
- 25 Kirk D E. *Optimal Control Theory: An Introduction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1970.



王 澄 高级工程师, 广东省电力设计研究院网信自动化部副主任. 2004 年获得中山大学硕士学位. 主要研究方向为电力自动化及智能用电的咨询、规划、设计. E-mail: 492633452@qq.com

(**WANG Cheng** Senior engineer, deputy director of the Network Information Automation Division, Guangdong Electric Power Design Institute. He received his master degree from Sun Yat-sen University in 2004. His research interest covers electric power automation and intelligent electricity consultation, planning, and design.)



刘德荣 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为智能控制理论及应用, 自适应动态规划, 人工神经网络, 计算神经科学, 电力系统运行与控制. E-mail: derong.liu@ia.ac.cn

(**LIU De-Rong** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research

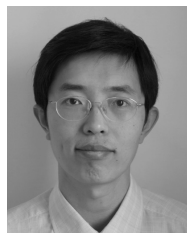
interest covers intelligent control, adaptive dynamic programming, neural networks, computational neuroscience and power systems.)



魏庆来 中国科学院自动化研究所副研究员. 2009 年于东北大学获控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为自适应动态规划, 非线性系统, 最优控制, 智能电网. 本文通信作者.

E-mail: qinglai.wei@ia.ac.cn

(**WEI Qing-Lai** Associate professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received the Ph.D. degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 2009. His research interest covers adaptive dynamic programming, nonlinear system, optimal control, and smart grid. Corresponding author of this paper.)



赵冬斌 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为智能控制理论及应用, 自适应动态规划, 智能电网, 机器人.

E-mail: dongbin.zhao@ia.ac.cn

(**ZHAO Dong-Bin** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers intelligent control, adaptive dynamic programming, smart grid, and robotics.)



夏振超 工程师, 广州供电局有限公司萝岗供电局营销部副主任. 2006 年毕业于天津大学测控技术与仪器专业, 2012 年获得华南理工大学电气工程硕士学位. 主要研究方向为电能计量与智能用电的规划, 管理与研究.

E-mail: xzc0702@163.com

(**XIA Zhen-Chao** Engineer, deputy head of marketing department of Luogang Power Supply Bureau, Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd.. He graduated in the measurement and control technology and instrument from Tianjin University in 2006. He received his master degree in electrical engineering at South China University of Technology in 2012. His research interest covers electric energy measurement and intelligent planning, management and research work of electricity.)