

基于动态规划的微电网动态经济调度

微电网以一种更为有效的方式集成了分布式能源、储能设备和可控负荷。经济调度是微电网能量管理的核心。在构建微电网日前调度模型的基础上,引入动态规划理论,对调度模型进行重新描述,并提出了基于前向动态规划的微电网动态经济调度求解方法。算例对动态调度结果和静态调度结果进行对比分析,验证了动态规划方法的可行性。

蒋一鑫/国网江苏省电力公司常州供电公司

卫春峰/国网上海市电力公司嘉定供电公司

0 引言

微电网可以有效提高终端用户的用电可靠性和经济性,是发展智能电网的重要技术手段之一。微电网有效集成了分布式发电(Distributed Generation, DG)、储能装置及可控负荷,通过公共联接点(Point of Common Coupling, PCC)与外网连接,具备并网/孤岛两种运行模式,这些特点使得微电网的能量管理系统相比传统电网能量管理系统更为复杂^[1-2]。其中,调度模块作为能量管理系统的中枢,具有重要的研究意义。

微电网经济调度需要在建立各类分布式电源稳态输出及成本模型的基础上,决策如何安排各机组出力,以使整个微电网运行在一个经济合理的状态。文献[3]在分析微电网内分布式电源选择、控制方式和出力优化的基础上,提出了微电网能量管理系统建设构想,并指出与大电网能量管理系统的区别,为研究微电网调度指明了方向;文献[4]是国内研究微电网能量优化调度的先例,它对比分析了当微电网与主网之间在不同的能量交互策略下微电网的运行特点;文献[5]针对微电网运行的环保性和

运行经济性分别建立目标函数模型,提出多目标优化求解策略,相比单一目标优化更具合理性;文献[6-7]通过以热定电方式将微型燃气轮机也纳入了调度范畴。上述文献都是以当前时段微电网各DG运行环境下的运行成本最低为目标,确定各分布式电源出力优先级,并没有考虑各时间段分布式电源出力的协调优化,仍属于静态调度。微电网运行方式复杂,内部分布式电源多样,约束条件繁多,计及相邻时段内联系的动态调度更加符合系统的实际运行要求。对于调度模型的求解,目前智能优化算法应用居多,主要有遗传算法、粒子群算法等^[8-10],但是智能算法对约束条件的处理能力有限,考虑时间动态特点困难,难以实现动态调度。

本文在对微电网内各分布式电源稳态建模的基础上,构建了联网运行微电网常规日前调度模型。引入动态规划理论,对调度模型进行重新描述,并提出了基于前向动态规划的微电网动态经济调度求解方法。算例将利用动态规划实现的动态调度结果与应用遗传算法进行的静态调度结果对比分析,验证了动态规划是一种实现微电网动态经济调度的理想方法。

1 微电网电源稳态建模

1.1 不可控微电源稳态输出模型

1.1.1 风机模型

风力发电机是将风能转化为机械能进而由机械能转化为电能的装置。风力



蒋一鑫/助理工程师

关键词/Keywords

微电网·
分布式电源·
动态经济调度·
动态规划·

发电机输出与风速近似呈三次方函数关系^[11], 计算公式为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in} \text{ or } v \geq v_{out} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_N^3 - v_{in}^3} P_{WTN} & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_{WTN} & v_N \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{WTN} 为风机额定输出功率; v_{in} 、 v_{out} 和 v_N 分别为切入、切出风速和额定工作风速; v 为风机轮毂高度处的实际风速。

1.1.2 光伏组件模型

光伏发电系统是将太能直接转化为电能系统。光伏组件的输出主要由辐照度、组件工作温度等因素决定。实际上, 常通过标准测试条件(太阳光入射强度 $1\,000\text{ W/m}^2$, 环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$)下光伏组件输出近似得到当前工况下的输出^[12]

$$\begin{cases} P_{PV} = P_{STC} \frac{G_C}{G_{STC}} [1 + k(T_C - T_{STC})] \\ T_C = T_a + 30 \times \frac{G_C}{1000} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{STC} 、 G_{STC} 和 T_{STC} 分别为标准测试条件下光伏组件的最大输出功率、辐照度和参考温度; G_C 和 T_C 分别为当前工况下的辐照度和温度; T_a 为当前周围环境温度。

1.2 可控微电源稳态输出模型

1.2.1 燃料电池模型

燃料电池(Fuel Cell, FC)通过阴阳极化学反应, 输出电、热以及循环水。它与普通化学电池不同, 在燃料持续供应的情况下, 可维持稳定输出。

燃料电池的燃料成本与净输出功率的关系可表示为^[13]

$$C_{f_FC} = C_{ng} \frac{1}{LHV_{ng}} \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} \quad (3)$$

式中, P_{FC} 和 η_{FC} 分别为燃料电池的净输出功率和效率; C_{ng} 和 LHV_{ng} 分别为天然气价格和低热值。

1.2.2 柴油发电机模型

柴油发电机(Diesel Engine, DE)属于传统同步发电单元, 其燃料成本与输出功率呈二次函

数关系^[13], 计算公式为

$$C_{f_DE} = aP_{DE}^2 + bP_{DE} + c \quad (4)$$

式中, P_{DE} 为柴油机发电功率; a 、 b 和 c 为柴油机燃料成本系数。

1.2.3 储能蓄电池模型

反映储能蓄电池工作特性的参数主要有荷电状态(State of Charge, SOC)、充放电功率以及充放电效率。蓄电池工作过程中, 荷电状态变化过程可近似表示为^[11, 14]

$$SOC_{t+1} = SOC_t - \frac{\eta_{ESS} P_{ESS,t}}{E_{ESS}} \quad (5)$$

式中, η_{ESS} 为蓄电池充放电效率; $P_{ESS,t}$ 为 t 时段蓄电池的充放电功率, 放电为正, 充电为负。

2 微电网经济调度模型

2.1 目标函数

本文研究联网型微电网经济运行问题, 采用常规日前调度模型, 目标函数是微电网综合运行费用最小, 主要计及4部分: ①运行周期内可控微电源燃料成本; ②微电源运行维护成本; ③污染物治理成本; ④微电网与外网交互成本。其数学表达式为

$$\left\{ \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N F_i(P_{i,t}) + c_{Grid,t} P_{Grid,t} \right\} \right. \\ \left. F_i(P_{i,t}) = C_{f_i}(P_{i,t}) + C_{OM_i}(P_{i,t}) + C_{e_i}(P_{i,t}) \right\} \quad (6)$$

式中, T 为运行周期, 取一天 24 h ; N 为可控微电源数; $P_{i,t}$ 为第 i 台可控微电源在 t 时段的出力; C_{f_i} 为燃料成本; C_{OM_i} 为运行维护成本; C_{e_i} 为污染物治理成本; $c_{Grid,t}$ 为实时电价; $P_{Grid,t}$ 为 t 时段微电网与外网之间交互功率, 买电为正, 卖电为负。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{ESS,t} + P_{Grid,t} = P_{Load,t} - P_{PV,t} - P_{WT,t} \quad (7)$$

式中, $P_{Load,t}$ 为 t 时段的负荷值; $P_{PV,t}$ 为 t 时段光伏出力; $P_{WT,t}$ 为 t 时段风机出力。

(2) 可控微电源出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (8)$$

式中, $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 台可控微电源出力上下限。

(3) 联络线传输容量约束

$$-P_{\text{Grid,max}} \leq P_{\text{Grid},t} \leq P_{\text{Grid,max}} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{Grid,max}}$ 为联络线传输容量上限。

(4) 蓄电池充放电约束

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\max} \\ -\frac{0.2E_{\text{ESS}}}{\Delta t} \leq P_{\text{ESS},t} \leq \frac{0.2E_{\text{ESS}}}{\Delta t} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\text{SOC}_{\min}$ 和 $\text{SOC}_{\max}$ 分别为荷电状态上下限; Δt 为一个调度时段; E_{ESS} 为蓄电池容量。

3 基于动态规划的调度模型求解

3.1 动态规划理论基础

动态规划的基本思想是将一个多阶段决策问题分解成一系列相互联系的单阶段决策子问题,并存储各子问题的解而避免计算重复的子问题,继而由子问题的解得到原问题的解。这种方法大大降低了问题的复杂度,并且计及了各子问题之间的相互关系,是真正意义上的动态过程。

根据动态规划递推算法的不同实现方式,动态规划划分为前向动态规划和后向动态规划。其中,后向动态规划目前研究应用较多,顾名思义,它从问题的最后阶段向初始阶段递推,但是当阶段数较多时,后向算法难以满足实时性要求。前向算法顺应事件发展过程,实时处理能力强,更适用于求解实际动态规划问题^[15]。

令阶段变量为 t ; t 阶段末状态变量为 x_t ; t 阶段决策变量为 u_t , 决策集合为 U_t , 阶段指标为 $\varphi_t(x_t, u_t)$; 从开始阶段至第 t 阶段末的最优总指标记为 $f_t(x_t)$, 则前向动态规划递推形式可表示为

$$\begin{aligned} f_t(x_t) &= \text{opt}_{u_t \in U_t} \{ \varphi_t(x_t, u_t) + f_{t-1}(x_{t-1}) \} \\ \text{s.t. } x_t &= g_t(x_{t-1}, u_t) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, g_t 为状态转移函数, 它反映相邻状态之间的相互关系。

3.2 调度模型的动态规划描述

微电网经济调度问题属于一类多阶段决策问题, 可按上述动态规划思想从时间域对调度问题

进行阶段划分。状态变量选择各时段末蓄电池荷电状态, 状态转移过程如图1所示。决策变量选择各时段可控微电源出力和微电网与外网交互功率, 结合式(7)和式(5)写出状态转移方程为

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + \frac{\left(\sum_{i=1}^{N+1} u_{i,t} - V_t \right) \eta_{\text{ESS}}}{E_{\text{ESS}}}, t = 1, 2, \dots, T \\ \text{s.t. } u_{i,t} = P_{i,t}, i = 1, 2, \dots, N \\ u_{N+1,t} = P_{\text{Grid},t} \\ V_t = P_{\text{Load},t} - P_{\text{PV},t} - P_{\text{WT},t} \end{cases} \quad (12)$$

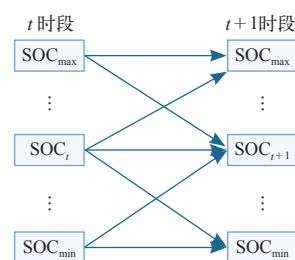


图1 状态转移过程

给定初始状态 x_0 , 采用动态规划各基本要素重新描述式(6)表示的微电网经济调度模型为

$$\min J_{\pi}(x_0) = \sum_{t=1}^T \varphi_t(x_t, u_t) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } u_t = [u_{1,t}, u_{2,t}, \dots, u_{N,t}, u_{N+1,t}]^T$$

原问题即寻找最优策略 $\pi^* = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_T^*\}$ 使得 $J_{\pi^*}(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_{\pi}(x_0)$, 其中 Π 为策略集合。原调度模型中约束条件可以通过限制决策变量和状态变量来实现。

3.3 求解流程

在设计算法时, 首先将状态变量空间离散化。令

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{m} \quad (14)$$

式中, $x_{\max} = \text{SOC}_{\max}$; $x_{\min} = \text{SOC}_{\min}$ 。

则状态变量空间可用集合表示为 $X = \{x_{\min}, \dots, x_k, \dots, x_{\max}\}$, 其中 $x_k = x_{\min} + k\Delta x$ 。

仿照式(11)写出调度问题的动态规划递推形式为

$$J_t(x_t) = \min_{u_t \in U_t} \left\{ \sum_{i=1}^N F_i(u_{i,t}) + F_{N+1}(u_{N+1,t}) + J_{t-1}(x_{t-1}) \right\} \quad (15)$$

将式 (15) 改写成如下形式

$$J_t(x_k) = \min_{x_k \in X} \left\{ F \left(\frac{x_k - x_j}{\eta_{ESS}} E_{ESS} + V_k \right) + J_j(x_j) \right\} \quad (16)$$

其中

$$F \left(\frac{x_k - x_j}{\eta_{ESS}} E_{ESS} + V_t \right) = \min \left\{ \sum_{i=1}^N F_i(u_{i,t}) + F_{N+1}(u_{N+1,t}) \right\}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{N+1} u_{i,t} = \frac{x_k - x_j}{\eta_{ESS}} E_{ESS} + V_t \quad (17)$$

式 (17) 定义的子问题可采用优先顺序法进行求解。

采用动态规划方法求解调度问题的具体流程如下。

Step1: 令 $t = 1$, 若 $x_k = x_0$, 则 $J_0(x_k) = 0$, 否则, $J_0(x_k) = +\infty$ 。

Step2: 对于每个 $x_k \in X$, 采用优先顺序法求解 $F \left(\frac{x_k - x_j}{\eta_{ESS}} E_{ESS} + V_t \right)$, $x_j \in X$, 且 x_j 取值必须满足

$$-\frac{0.2E_{ESS}}{\Delta t} \leq \frac{x_j - x_k}{\eta_{ESS} \Delta t} E_{ESS} \leq \frac{0.2E_{ESS}}{\Delta t}$$

然后由式 (16) 的递推形式得到 $J_t(x_k)$ 。

Step3: $t++$ 。

Step4: 若 $t < T$, 则转置Step2; 否则跳至下一步。

Step5: 输出 $J_T(x_0)$ 及对应的最优策略 π^* 。

4 算例分析

4.1 基础数据

为了验证上面提出的模型和方法, 对一个典型联网运行微电网进行分析。微电网中分布式发电设备 (DG) 包括风机、光伏、燃料电池以及柴油发电机, 出力限值如表1所示。其中, 风机、光伏为不可控微电源, 不作为调度对象, 它们的出力曲线如图2所示; 燃料电池型号为40 kW IFC PC-29, 相关参数参见文献[16]; 柴油发电机成本系数参见文献[17]。储能蓄电池容量选择100 kW·h (50 kW × 2 h), 初始荷电状态 (SOC) 设定为100%。微电网与外网联络线功率双向, 限值设定为30 kW, 电价施行峰平谷电价^[18]。负荷需求为典

型居民负荷, 负荷峰值为88.9 kW, 负荷曲线如图3所示。调度时段设定为0:00~24:00。

表1 微电网的DG出力限值

DG类型	功率/kW	
	下限	上限
WT	0	12
PV	0	6
DE	6	30
FC	5	40

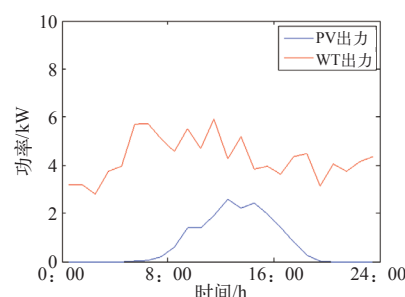


图2 不可控微电源出力

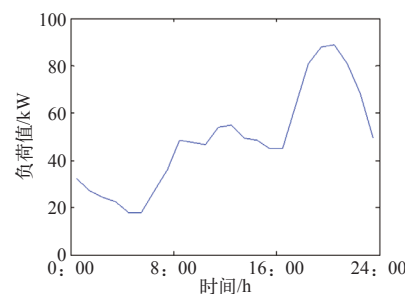


图3 典型日负荷曲线

4.2 调度结果分析

分别采用动态规划方法和遗传算法进行动态调度和静态调度计算最优结果。在利用遗传算法实现静态调度时, 根据调度模型, 优化变量选择各时段可控微电源 (包含蓄电池充放电功率) 及微电网与外网交互功率, 目标函数为各时段微电网综合运行费用最小。图4、图5给出了基于动态规划的调度结果, 动态调度与静态调度的综合运行费用对比如表2所示。

由图4、图5可以看出, 燃料电池 (FC) 比柴油发电机 (DE) 运行更经济, 而且因为柴油发电机发电造成环境污染, 联网运行常态基本不发电, FC优先DE出力。当电价较高时, 可控微电源多发电, 蓄电池放电, 向电网卖电, 以获得更大

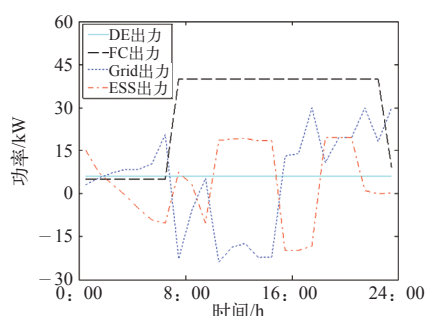


图4 可控微电源出力

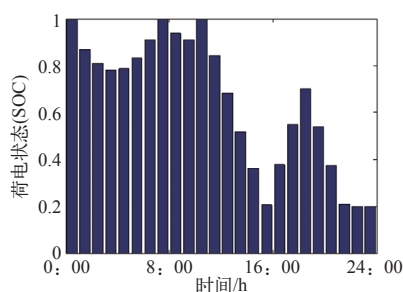


图5 SOC变化过程

表2 调度结果对比

动态调度/元	静态调度/元	减少百分比(%)
576	841.5	31.54

的收益, 电价较低时, 从电网买电, 给蓄电池充电。由表2可以看出动态调度相比静态调度, 方案更合理经济, 原因在于考虑各时段联系的动态调度获得的方案是整体最优, 而静态调度是各时段最优的简单叠加, 整体并不是最优。

5 结束语

本文将微电网经济优化调度问题视为一类多阶段决策问题, 从动态规划的角度对调度问题进行了重新定义, 并给出了基于动态规划的模型求解流程。算例针对一个联网型微电网, 考虑微电网与大电网之间的双向功率交互, 分别进行动态调度和静态调度, 从调度结果可知, 考虑各调度时段之间联系的动态调度结果更具合理经济性, 从而验证了所提模型和方法的有效性。

参考文献

[1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 10-14, 23.

[2] Wencong Su, Jianhui Wang. Energy management systems in microgrid operations [J]. The Electricity Journal, 2012, 25 (8): 45-60.

[3] Katiraei Farid, Iravani Reza, Hatzigiorgiou Nikos, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6 (3): 54-65.

[4] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微电网系统的稳态建模与优化运行 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (24): 78-82.

[5] Mohamed Faisal A, Heikki N Koivo. System modelling and online optimal management of microgrid using multiobjective optimization [C]. IEEE Computer Society. 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 2007: 148-153.

[6] Chris Marnay, Giri Venkataramanan, Michael Stadler, et al. Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (3): 975-982.

[7] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (8): 22-27.

[8] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (3): 100-107.

[9] Liao Gwoching. Solve environmental economic dispatch of smart microgrid containing distributed generation system—using chaotic quantum genetic algorithm [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43 (1): 779-787.

[10] 顾伟, 吴志, 王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (4): 177-185.

[11] 符杨, 蒋一鏊, 李振坤. 基于混合量子遗传算法的微电网电源优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (24): 50-57.

[12] Mohamed Faisal A, Koivo Heikki N. System modelling and online optimal management of

- microgrid using mesh adaptive direct search [J].
Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32 (5): 398-407.
- [13] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [14] Zhao Zheng, Makram E B, Tong Yuliang. Impact study of energy storage for optimal energy scheduling in microgrid [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012: 1-7.
- [15] 黄勇, 曲长文, 苏峰, 等. 基于MATLAB的动态规划顺序算法的实现 [J]. 烟台师范学院学报, 2004, 20 (4): 272-274.
- [16] 李乐. 微网的经济运行研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [17] Basu A K. Microgrids: planning of fuel energy management by strategic deployment of CHP-based DERs – an evolutionary algorithm approach [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 44 (1): 326-336.
- [18] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- (收稿日期: 2016-01-07) **EA**

(上接第32页)



图4 1号主变压器B相吊罩检查图

低压侧出口短路。由于故障位置在变压器差动保护外侧, 所以变压器差动保护不动作; 故障虽然在电容器过电流保护范围内, 但由于612开关发生故障无法断开, 所以故障无法隔离。最终由于短路电流长时间存在, 造成变压器绕组严重过热, 引起变压器油分解成烃类气体, 1号主变压器B相

重瓦斯动作, 切除故障。

5 结束语

本次故障反映出该变压器低压侧绕组抗短路能力的不足, 从而表明变压器的设计水平, 对变压器本身运行的安全稳定性有着举足轻重的影响。应该提高变压器设计水平, 确保变压器能够耐受出口短路, 这有助于提高变电站设备乃至电网运行的安全性与稳定性。

参考文献

- [1] 赵家礼, 张庆达. 变压器故障诊断与修理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 谢鹏, 张国栋, 彭刚. 一起500kV 电力变压器故障诊断及处理 [J]. 变压器, 2007, 44 (5): 51-52.
- [3] 刘东华, 王光临. 一起变压器出口短路故障的分析与处理 [J]. 变压器, 2007, 44 (4): 56-57.
- [4] 胡海宁, 周力行, 李季高, 等. 近区短路对变压器的影响及诊断方法 [J]. 变压器, 2013, 50 (11): 73-76.

(收稿日期: 2016-08-03) **EA**