

计及无功奖惩收费的微电网日前有功无功协调调度

卢志刚, 刘雅文, 杨 芳, 耿丽君, 刘美思

(燕山大学河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘 要: 为解决因电网用户过度消耗无功功率造成的电网电压过低, 不稳定运行的问题, 提出计及无功奖惩收费的微电网日前有功无功协调调度的方法。从提高微电网的功率因数角度考虑, 设计3种不同方式的无功功率奖惩收费模型, 优化调度配电网中可再生能源的有功无功出力分布。同时结合电动汽车(electric vehicle, EV)的V2G(vehicle-to-grid)特性和可中断负荷(interruptible load, IL)的响应特性, 在保证微电网安全运行的同时进一步实现微电网运行效益的最大化。通过仿真分析计算证明所提收费方法的可行性和有效性。

关键词: 有功功率; 无功功率; V2G; 无功奖惩; 微电网; 协调调度

中图分类号: TM71

文献标志码: A

0 引 言

微电网作为新能源发电与大电网的交互层, 能够在分布式电源渗透率最大化的同时, 通过有效的管理和调度策略, 降低或者消除分布式电源接入对大电网的危害^[1]。但是由于大电网的经济性较好, 从自身运行成本的角度考虑, 微电网希望由大电网承担交互功率的波动和所需无功功率, 这就容易造成大电网“峰上加峰”和“无功匮乏”现象^[2]。因此, 控制微电网与大电网之间交互的有功、无功功率, 不仅关系到大电网的稳定运行, 也是微电网自身经济、稳定运行必须考虑的问题。

目前, 有关统一研究有功/无功功率的报道较少。文献[3]介绍一种根据各配电电压等级将无功设备投资和运行成本按照无功电量使用量比例平摊的方法进行无功优化。文献[4-5]提出一种有功无功解耦, 继而分别优化的最优潮流无功定价方法, 以无功生产费用最小为目标函数进行优化调度。文献[6]提出一种考虑系统安全性的无功定价方式。文献[7]针对独立运行模式下的微电网能源管理问题, 提出了将储能状态分成四区间的微电网实时能量调度方法, 优化有功电量。文献[8]提出考虑太阳能、风能的产能利用率和带载能力的优化调度模型, 但是主要考虑太阳能、风能的有功输出, 并未可考虑无功出力。文献[9-12]考虑了并网光伏电源既有

有功出力又有无功出力的能力, 以无功补偿方案的全寿命周期净收益现值为目标函数进行微电网日前调度。文献[13]提出风力发电系统无功极限的计算方法, 该方法考虑了网侧变换器在其功率允许范围内的无功出力能力。在求解方面, 遗传算法、粒子群算法、专业优化软件 IBM ILOG CPLEX^[14-17]等进行模型求解。使用智能算法的优点是可以优化精细模型、多目标模型, 对模型中出现的不连续、非线性化条件可以准确求解, 但是在单目标优化过程中, 智能算法容易陷入局部最优。

综上所述, 本文统筹协调微电网中各种有功无功可调资源, 设计3种无功奖惩收费方法, 并将其引入到微电网日前有功无功统一调度模型中, 优化调度分布式能源的有功出力和无功出力。采用 Matlab 中非线性优化求解方法求解单目标函数, 相较智能算法, 不仅优化调度精度更准确, 而且可减少模型运算时间和计算量。

1 电源模型

本文所考虑的联网运行的微电网系统结构如图1所示, 微电网与大电网相连, 但是大电网会对之间的交互功率因数进行限制, 以确保自身稳定运行。微电网中包括光伏、风力既可发出有功功率又可发出无功功率的

收稿日期: 2018-03-02

基金项目: 河北省自然科学基金京津冀合作专项(F2016203507); 国家自然科学基金面上项目(61374098)

通信作者: 卢志刚(1963—), 男, 博士、教授, 主要从事电力系统经济运行分析与控制方面的研究。zhglu@yus.edu.cn

分布式发电设备;微型燃气轮机、燃料电池等只发出有功功率的灵活可调度发电单元;蓄电池储能(energy storage system, ESS)仅考虑有功功率的储能系统;EV、IL作为微电网中参与需求侧响应的负荷,其中EV还可向微电网中倒送功率。

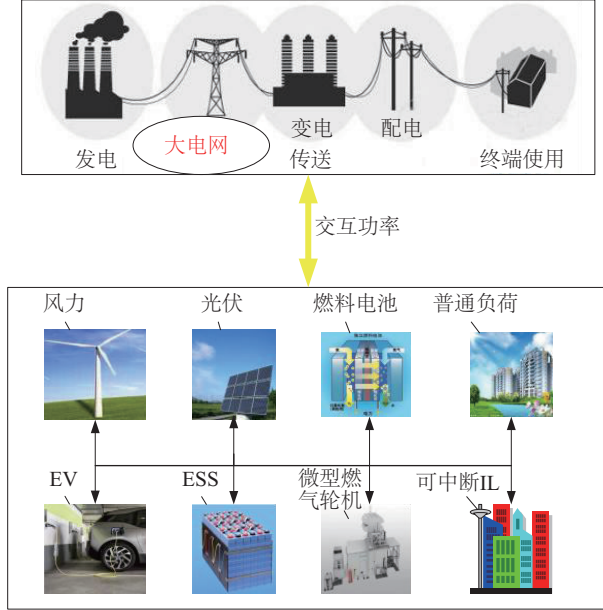


图1 联网运行的微电网系统

Fig. 1 Microgrid of networking operation

1.1 光伏发电电源模型

太阳能光伏发电是最早被利用的新能源发电方式,其发电预测的不准确性、波动性是当今主要难题。

1.1.1 光伏有功出力

本文采用传统光伏发电预测模型并充分考虑其无功出力情况,典型的光伏有功出力模型如式(1)所示:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_T}{G_{STC}} [1 + K(T_c - T_r)] \quad (1)$$

$$T_c = T_a + (T_r - 20)G_T/800 \quad (2)$$

式中, P_{PV} ——光伏发电预测有功功率, W; P_{STC} ——标准测试条件下光伏发电的测试功率, W; G_{STC} ——标准测试条件下太阳辐照度, W/m^2 ; G_T ——太阳实际辐照度, W/m^2 ; K ——功率温度系数, 取 $-0.0047/^\circ C$; T_c ——光伏组件实际工作温度, $^\circ C$; T_r ——参考温度, 取 $25^\circ C$; T_a ——环境温度, $^\circ C$ 。

1.1.2 光伏无功出力

考虑光伏电源有功出力间歇性和时序性的并网光伏逆变器无功出力具有很高的等效利用率。并网光伏逆变器可提供的无功功率如式(3)所示:

$$Q_{PV} = \sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV}^2} \quad (3)$$

式中, Q_{PV} ——光伏发电无功功率, var; S_{PV} ——光伏发电视在功率, VA。

1.2 风力发电电源模型

风能作为一种清洁可再生能源,其丰富的蕴量使其受到全世界的重视。针对风力发电的瞬时性,利用电池储能可以平滑风电出力,本文采用风力发电与储能系统结合的模式。

1.2.1 风力有功出力

本文采用传统功率预测曲线建立风力机模型,用蓄电池平滑风能出力并充分考虑风电的无功出力情况,模型如式(4)所示^[18]:

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ av^3 + bv^2 + cv + d, & v_{in} \leq v \leq v_n \\ P_{wt}, & v_n \leq v \leq v_{out} \\ 0, & v > v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{wt}(v)$ ——风力发电的有功功率, W; v_{in} ——切入风速, m/s; v_n ——额定风速, m/s; v_{out} ——切出风速, m/s; P_{wt} ——风力机额定功率, W; a 、 b 、 c 、 d ——4个参数,根据风速-功率曲线拟合。

1.2.2 风力无功出力

配电网中由于风力发电瞬时性、不易控制性,风力发电无功出力经常被忽略和放弃,但是风力发电与蓄电池配合后,其波动性可有效降低,与光伏发电类似,风力发电的无功出力可表示为如式(5)所示:

$$Q_{wt} = \sqrt{S_{wt}^2 - P_{wt}^2} \quad (5)$$

式中, Q_{wt} ——风能无功功率, var; S_{wt} ——风能视在功率, VA。

1.3 微型燃气轮机

微型燃气轮机作为微电网中灵活的发电单元,具有“以热定电”、“即插即用”的特点,其响应速度快,能满足负荷突变的要求,但是由于其发电效率低,研究人员一般都采用热电联供的方式来提高其经济性。本文中微型燃气轮机采用“以电定热”的方式,主要满足微电网日前调度优化所需的发电量,余热进行回收利用,微型燃气轮机出力模型如式(6)所示:

$$P_{MT} = P_{gas} \times \eta_{MT} \quad (6)$$

式中, P_{MT} ——微型燃气轮机的输出功率, W; P_{gas} ——微型燃气轮机消耗的天然气功率, W; η_{MT} ——微型燃气轮机的发电效率, %。

微型燃气轮机的发电成本如式(7)所示:

$$C_M = \frac{P_{\text{gas}} \times C_{\text{gas}}}{P_{\text{MT}}} \quad (7)$$

式中, C_M ——微型燃气轮机的发电成本,元; C_{gas} ——天然气价格,元。

1.4 微型燃气轮机

燃料电池是由多个单电池经过串联组合而成,其燃料电池的燃料成本与净输出功率的关系如式(8)所示:

$$C_F = C_{\text{gas}} \cdot \frac{1}{m_{\text{LHVng}}} \cdot \frac{P_{\text{FC}}}{\eta_{\text{FC}}} \quad (8)$$

式中, C_F ——燃料电池发电成本,元; m_{LHVng} ——天然气低热值, kJ/Nm^3 ; P_{FC} ——燃料电池净输出功率, W ; η_{FC} ——燃料电池效率, %。

1.5 储能系统

为平抑新能源发电功率的波动,储能技术受到广泛关注。储能技术主要分为电磁、机械和电化学储能3类。其中电化学储能中的电池储能系统可以平滑风、光等输出功率的波动性,是间歇性可再生能源发电的合作伙伴。本文采用的蓄电池储能(ESS)仅考虑其发出有功功率情况,模型如式(9)所示:

$$SOC_{t+1} = SOC_t - \frac{P_{e+,t} \times \Delta t - P_{e-,t} \times \Delta t}{C_{\text{ess}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, $P_{e+,t}$ ——ESS 放电功率, kW ; $P_{e-,t}$ ——ESS 充电功率, kW ; Δt ——调度间隔, h ; C_{ess} ——ESS 的额定容量, kWh ; SOC ——ESS 的荷电量, %。

1.6 电动汽车

本文所考虑的 EV 模型如式(10)所示,主要通过控制、优化其充放电来满足微电网与大电网的交互功率约束,而 EV 初始电量采用蒙特卡罗随机观察进行抽取:

$$SOC_{v,t+1} = SOC_{v,t} - \frac{P_{v+,t} \times \Delta t - P_{v-,t} \times \Delta t}{C_{\text{EV}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, $P_{v+,t}$ ——EV 放电功率, kW ; $P_{v-,t}$ ——EV 充电功率, kW ; C_{EV} ——EV 的额定容量, kWh ; SOC ——EV 的荷电量, %。

2 微电网运行成本分析

微电网日前调度优化主要是根据历史数据及预测天气等因素制定下一周期的发电策略,需要综合考虑系统的经济性和方案的可实施性。

2.1 运行成本

$$C_a = C_d + C_{\text{MT}} + C_{\text{FC}} + C_{\text{ESS}} + C_{\text{EV}} + C_{\text{IL}} \quad (11)$$

式中, C_d ——微电网与大电网交互成本,元; C_{MT} ——微型燃气轮机发电成本,元; C_{FC} ——燃料电池发电成本,元; C_{ESS} ——ESS 运行成本,元; C_{EV} ——EV 运行成本,元; C_{IL} ——中断负荷成本,元。

2.1.1 向大电网购电成本

$$C_d = \sum_{t=1}^T C_{d,t} P_{d,t} \lambda_t \quad (12)$$

式中, $C_{d,t}$ —— t 时刻微电网向大电网的购电电价,元; $P_{d,t}$ —— t 时刻微电网从大电网买进的功率, kW ; λ_t ——调度时长, h ; T ——调度时段数。

2.1.2 微型燃气轮机发电成本

$$C_{\text{MT}} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^R C_M P_{h,t} \lambda_t \quad (13)$$

式中, R ——微型燃气轮机数量; $P_{h,t}$ —— t 时刻第 h 台微型燃气轮机发电功率, kW 。

2.1.3 燃料电池发电成本

$$C_{\text{FC}} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^F C_F P_{k,t} \lambda_t \quad (14)$$

式中, F ——燃料电池数量; $P_{k,t}$ —— t 时刻第 k 台微型燃气轮机发电功率, kW 。

2.1.4 ESS 运行成本

$$C_{\text{ESS}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^E C_{e+j,t} P_{e+j,t} \lambda_t + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^E C_{e-j,t} P_{e-j,t} \lambda_t \quad (15)$$

式中, E ——ESS 数量; $C_{e+j,t}$ —— t 时刻第 j 台 ESS 的放电电价,元; $P_{e+j,t}$ —— t 时刻第 j 台 ESS 的放电功率, kW ; $C_{e-j,t}$ —— t 时刻第 j 台 ESS 的充电电价,元; $P_{e-j,t}$ —— t 时刻第 j 台 ESS 的充电功率, kW 。

2.1.5 EV 参与辅助运行成本

$$C_{\text{EV}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{v+i,t} P_{v+i,t} \lambda_t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{v-i,t} P_{v-i,t} \lambda_t \quad (16)$$

式中, N ——EV 数量; $C_{v+i,t}$ —— t 时刻第 i 台 EV 的放电电价,元; $P_{v+i,t}$ —— t 时刻第 i 台 EV 的放电功率, kW ; $C_{v-i,t}$ —— t 时刻第 i 台 EV 的延迟充电补偿电价,元; $P_{v-i,t}$ —— t 时刻第 i 台 EV 的延迟充电功率, kW ; $P_{v+i,t}$ ——放电功率, kW ,当 EV 放电时, $P_{v-i,t}$ 等于先前的充电功率,均为正值;当减小或停止 EV 充电时, $P_{v+i,t}$ 为零, $P_{v-i,t}$ 为正值。当 EV 正常充电时,二者都为零。

2.1.6 中断 IL 补偿成本

$$C_{\text{IL}} = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L C_{l,t} P_{l,t} \lambda_t \quad (17)$$

式中, L ——IL 的总户数; $C_{l,t}$ —— t 时刻第 l 个用户中断的补偿电价,元; $P_{l,t}$ —— t 时刻第 l 个用户的中断功率, kW 。

2.2 约束条件

2.2.1 电功率平衡约束

$$P_{d,t} + P_{wt,t} + P_{pv,t} + \sum_{j=1}^E (P_{e+j,t} - P_{e-j,t}) + \sum_{i=1}^N (P_{v+i,t} + P_{v-i,t}) + \sum_{l=1}^L P_{l,t} + \sum_{h=1}^R P_{h,t} + \sum_{k=1}^F P_{k,t} = P_{load,t} \quad (18)$$

$$Q_{pv,t} + Q_{wt,t} + \sum_{i=1}^N (Q_{v+i,t} - Q_{v-i,t}) + \sum_{l=1}^L Q_{l,t} + Q_{d,t} = Q_{load,t} \quad (19)$$

$$Q_{l,t} = P_{l,t} \tan \phi \quad (20)$$

$$Q_{v+i,t} = P_{v+i,t} \tan \phi \quad (21)$$

$$Q_{v-i,t} = P_{v-i,t} \tan \phi \quad (22)$$

式中, ϕ ——中断用户的功率因数; φ ——EV 的功率因数角; $P_{load,t}$ —— t 时刻的电负荷的有功功率, W; $Q_{load,t}$ —— t 时刻的电负荷的无功功率, var; $Q_{l,t}$ ——可中断 IL 用户的无功功率, var; $Q_{v+i,t}$ ——EV 的放电无功功率, var; $Q_{v-i,t}$ ——EV 的延迟充电的无功功率, var; $\tan \phi$ ——中断用户的功率因数。

2.2.2 光伏出力约束

$$0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,t}^{\max} \quad (23)$$

$$P_{pv,t}^2 + Q_{pv,t}^2 \leq S_{pv,t}^2 \quad (24)$$

式中, $P_{pv,t}^{\max}$ —— t 时刻光伏的预测功率, W; $P_{pv,t}$ —— t 时刻实际光伏有功功率出力, W; $Q_{pv,t}$ —— t 时刻实际光伏无功功率出力, var; $S_{pv,t}$ ——光伏的装机容量, VA。

2.2.3 风电出力约束

$$0 \leq P_{wt,t} \leq P_{wt,t}^{\max} \quad (25)$$

$$P_{wt,t}^2 + Q_{wt,t}^2 \leq S_{wt,t}^2 \quad (26)$$

式中, $P_{wt,t}^{\max}$ —— t 时刻风电场预测的有功功率, W; $P_{wt,t}$ —— t 时刻风电场实际有功功率出力, W; $Q_{wt,t}$ —— t 时刻风电场实际无功功率出力, var; $S_{wt,t}$ ——风电的装机容量, VA。

2.2.4 机组出力约束

$$P_{h,t}^{\min} \leq P_{h,t} \leq P_{h,t}^{\max} \quad (27)$$

$$P_{k,t}^{\min} \leq P_{k,t} \leq P_{k,t}^{\max} \quad (28)$$

式中, $P_{h,t}^{\min}$ 、 $P_{h,t}^{\max}$ ——微型燃气轮机机组在纯凝工况下的最小、最大出力, W; $P_{k,t}^{\min}$ 、 $P_{k,t}^{\max}$ ——燃料电池的最小、最大出力, W。

2.2.5 ESS 约束

$$0 \leq P_{e+j,t} \leq P_{e+j,t}^{\max} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{e-j,t} \leq P_{e-j,t}^{\max} \quad (30)$$

$$SOC_{j,t}^{\min} \leq SOC_{j,t} \leq SOC_{j,t}^{\max} \quad (31)$$

式中, $P_{e+j,t}^{\max}$ 、 $P_{e-j,t}^{\max}$ ——第 j 台 ESS 的最大放电出力、最大充电出力, W; $SOC_{j,t}^{\min}$ 、 $SOC_{j,t}^{\max}$ ——第 j 台 ESS 的最小、最大荷电量, %。

2.2.6 EV 约束

$$0 \leq P_{v+i,t} \leq P_{v+i,t}^{\max} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{v-i,t} \leq P_{v-i,t}^{\max} \quad (33)$$

$$SOC_{v,i,t}^{\min} \leq SOC_{v,i,t} \leq SOC_{v,i,t}^{\max} \quad (34)$$

式中, $P_{v+i,t}$ 、 $P_{v-i,t}^{\max}$ ——第 i 台 EV 的最大放电功率和最大延迟充电功率, W; $SOC_{v,i,t}^{\min}$ 、 $SOC_{v,i,t}^{\max}$ ——第 i 台 EV 的最小和最大荷电量, %; $SOC_{v,i,t}$ ——第 i 台 EV 的荷电量, %。

3 最优合同容量

3.1 分时电价

为调节负荷峰谷差、减缓发电侧电力投资、增大新能源渗透率、提高供电可靠性, 大电网针对有功电量施行分时电价策略。大电网根据日前预测, 提前向用户、相联微电网等下发分时电价, 各个用户、微电网根据电价和自身条件合理安排用电量。

3.2 无功奖惩

无功功率是电能转换为其他能量的前提。电网为了防止用户过多的摄取无功功率、也为了自身的稳定运行, 针对不同的电压等级用户规定了不同的功率因数。因此, 微电网日前优化调度必须综合考虑与大电网交互的有功功率、无功功率, 为平抑交互功率的功率因数, 提出以下 3 种无功奖惩收费模型:

3.2.1 超出限定条件罚款方法

针对微电网从大电网买进电量的功率因数限制, 在微电网日前调度优化中引入无功罚款成本, 当买进功率因数超过限定值时, 对超出部分进行无功罚款, 将有功功率与无功功率相耦合, 由此引导微电网自行补偿所需无功功率, 合理优化调度新能源发出有功功率与无功功率的配比, 无功成本为:

$$C_b = \sum_{t=1}^T \max[C_{pf}(Q_{d,t} - Q_{d0,t})\lambda_t, 0] \quad (35)$$

$$Q_{d0,t} = P_{d,t} \tan \phi \quad (36)$$

式中, C_b —— t 时刻大电网对微电网的罚款成本, 元; C_{pf} ——罚款系数; $Q_{d0,t}$ ——大电网规定的最大摄取无功功率, var; λ_t ——调度时长, h。

3.2.2 无功收费方法

对微电网从大电网中摄取的所有无功电量均采用

收费方式,以此来抑制微电网过多摄入无功电量,无功成本为:

$$C_b = \sum_{t=1}^T C_{pf} Q_{d,t} \lambda_t \quad (37)$$

3.2.3 无功奖惩结合方法

当微电网摄取的无功功率低于允许限值时,对微电网进行奖励,当无功功率高于限值时,对微电网进行惩罚;为大电网稳定、安全运行,不允许无功功率上网,以免造成无功过剩、电压升高或大量无功功率在电网中来回传送造成电网故障等问题,则:

$$C_b = \sum_{t=1}^T C_{pf} (Q_{d,t} - Q_{d0,t}) \lambda_t \quad (38)$$

将各时段违约费用纳入微电网日前运行成本后,则式(11)可改写为:

$$C_a = C_d + C_{MT} + C_{FC} + C_{ESS} + C_{EV} + C_{IL} + C_b \quad (39)$$

4 求解方法

4.1 非线性优化

非线性优化算法 fmincon 命令用来求解单目标优化问题,此命令在求解中等规模优化问题时使用序列二次规划方法(sequential quadratic programming, SQP)来求解,并用内点法复核运算结果(interior point algorithm, IPA)。在求解过程中用到拉格朗日函数 Hessian 矩阵,而 Hessian 矩阵是通过拟牛顿法得到。在每一步迭代中求解二次规划子问题,并用 BFGS 法更新拉格朗日 Hessian 矩阵。

4.2 日前调度优化模型求解

微电网日前调度是典型的多阶段非线性决策过程,以每小时为调度间隔,那么日前调度过程分为 24 个时间段。在进行每个阶段优化时,不仅要考虑本阶段的指标,还要综合考虑本时段对其他时间段产生的影响,应考虑从本调度时段到调度结束的全局最优结果。储能容量只依赖上一阶段的存储量,而和以前的存储过程、动态均无关系。

5 算例分析

5.1 算例数据

以某连网运行的微电网为例,进行算例分析,大电网与微电网交互功率因数为 0.8,当超过时,对微电网进行警告和罚款。ESS 为容量为 3000 kWh, SOC 最小和最大容量限制为 0.10 和 0.95。微电网中含有一个电动

汽车充电站,包括电动汽车数量为 300 辆, EV 电池容量为 900 kWh,均使用常规方式充电。电网电价如图 2 所示,天然气价格为 2.20 元/m³;系统装机情况和蓄电池需要参数见表 1(分时电价)。

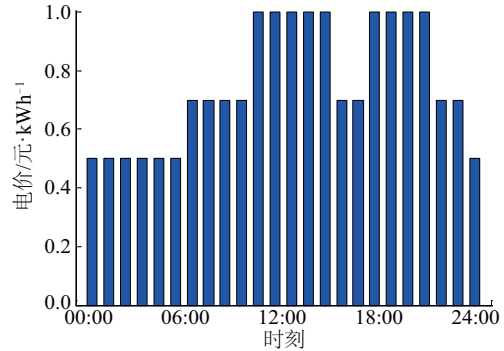


图2 外部电网电价

Fig. 2 Power price of the external grid

表1 系统装机情况(kW)

Table 1 Distribution of active power(kW)

装机	数值	装机	数值
太阳能光伏发电	1000	燃料电池	500
风力发电	2000	ESS	3000
5台微型燃气轮机	300	EV	900

5.2 算例分析

为分析交互无功功率对微电网的运行的影响,设置以下 5 种情景:情景 1,系统不包含 EV 和可中断 IL 且不考虑无功奖惩收费;情景 2,系统包含 EV 和可中断 IL 但不考虑无功奖惩收费;情景 3,系统包含 EV 和可中断 IL 且以超出限定条件罚款方法对无功进行收费;情景 4,系统包含 EV 和可中断 IL 且对所有无功进行收费;情景 5,系统包含 EV 和可中断 IL 且以无功奖惩结合方法对无功进行收费。

5.2.1 交互功率结果分析

由表 2 可看出,情景 1 比情景 2 微电网的日运行费用多 1442.87 元,其中燃气轮机和燃料电池的花费相同,情景 2 由于电动汽车和柔性负荷参与优化的辅助成本增加花费 11871.71 元,但是与大电网交互的有功花费减少 13214.59 元。情景 3~情景 5 由于有 3 种无功奖惩收费方式使得微电网与大电网交互的有功电量花费、微型燃气轮机花费和燃料电池花费均有一定的降低,而电动汽车和可中端 IL 的补偿收费增加,而情景 3~情景 5 的微电网总体调度成本减小。

表 2 调度费用

Table 2 Scheduling cost

情景	交互有功	燃气轮机	燃料电池	电动汽车	柔性负荷 IL	合计/元
1	47134.06	12388.42	3795.81	0	0	63318.29
2	33819.47	12388.42	3795.81	7124.64	4747.07	61875.42
3	35723.03	11700.00	3263.48	5610.00	5888.89	62185.40
4	30085.12	11958.56	3500.00	7229.85	9212.44	61985.97
5	35723.03	11700.00	3263.48	5610.00	5888.89	62185.40

由于调度结果只有在 07:00~19:00 时刻微电网与大电网存在交互功率,其他时刻微电网能量能自给自足,所以微电网与大电网交互功率图如图 3a 和图 3b 所示,仅显示了 07:00~19:00 时刻的优化调度结果。

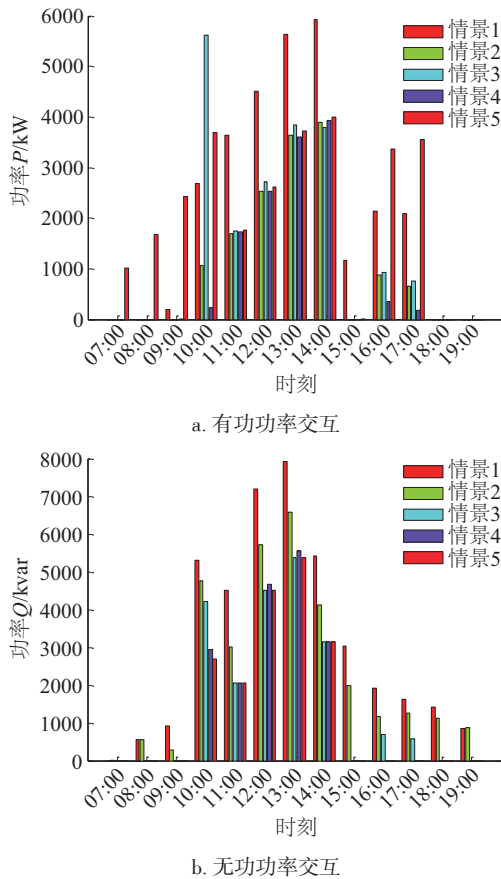


图 3 交互有功功率和无功功率

Fig. 3 Active power and reactive power between power grid and microgrid

图 4 是储能系统充放电图形。从图 3 及图 4 中可以看出,情景 1 的交互有功功率、无功功率明显高于其他时刻,主要由于情景 1 未考虑 EV 和 IL 参与需求侧响应停止充电和中断负荷,使得微电网在 11:00~14:00 电

价高峰时段,交互功率会比其他情景高。其他 4 种情景中交互有功功率相差不多,情景 3 中有功功率突然升高,是因为电价在 11:30 会上升而且考虑了功率因数罚款,电池会综合功率因数高低、电价高低两种因素来决定充放电,所以电池在 10:30 充满电量;而情景 4 中对所有无功均收取一定费用,所以电池只时按照电价一种因数进行充放电;情景 5 中功率高低会存在奖惩两种情况,所以电池会在功率因数奖励、惩罚力度和电价高低 3 种因素决定。

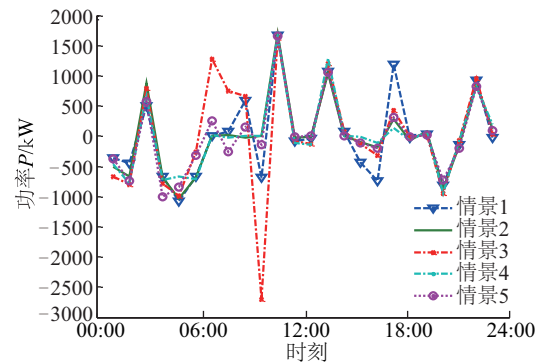


图 4 ESS 充放电功率

Fig. 4 Charge and discharge power of ESS

5.2.2 光伏优化结果分析

光伏有功功率与无功功率优化图如图 5。可以看出,由于情景 1、情景 2 未考虑无功收费问题,因此在情景 1、情景 2 中,在白天存在微电网与大电网交互功率的基础上,光伏有功出力一定是最大有功出力。因此从图 5 中可以判定在 06:00、10:00、12:00 及 13:00 时刻,情景 3~情景 5 的光伏有功出力均未达到上限,不同的是,在 06:00 因为微电网与大电网不存在交互功率问题,且光伏无功出力并未升高,所以在 06:00 光伏是由于微电网不能消纳所有新能源发电而弃光的现象。10:00、12:00 及 13:00 时刻,微电网从大电网中大量吸收无功功率,使得交互功率因数很低,超出了交互功

率因数限制,微电网以减小光伏有功出力从而增强光伏无功出力的方法,来提高交互功率的功率因数,避免无功罚款。由于情景3~情景5采用不同的无功管理模式,所以有功减少程度不同,情景3和情景5无功收费方法削弱强度最大且程度相同,这是由于情景3和情景5收费方式相同,只是情景5中存在无功奖励,但是因为光伏发出有功功率和无功功率均会有一定收益,而有功功率和无功功率又是耦合的三角函数关系,因此光伏会根据两者电价的不同选择最大收益情况,在此收益情况下未达到无功奖励条件,所以情景3和情景5优化结果相似。

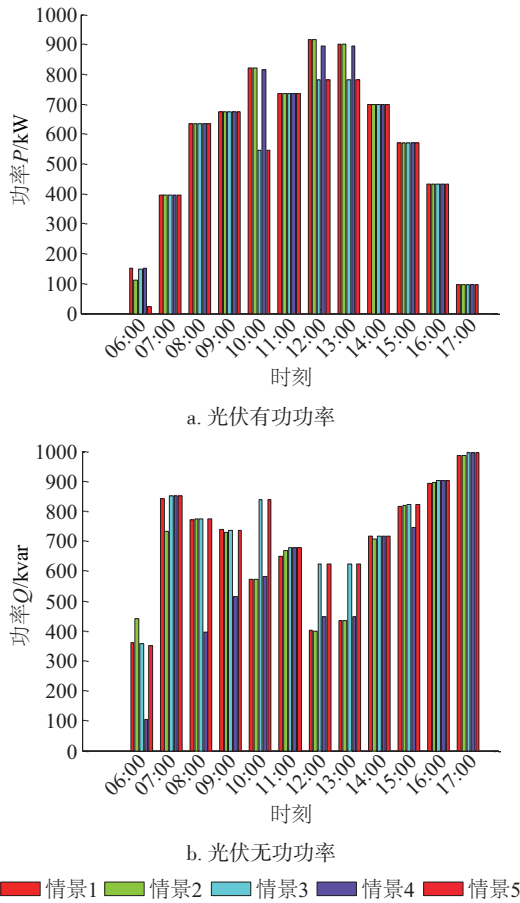


图5 光伏有功功率和无功功率

Fig. 5 Active power and reactive power scheduling of photovoltaic

5.2.3 交互功率因数结果分析

微电网与大电网交互功率及功率因数图如图6~图8所示。从图3可看出,情景2的交互有功功率、无功功率均小于情景1,说明EV和IL在电价高峰时段或用电负荷较高时按照协议停止充电或切断负荷,可有效降级微电网与大电网的交互功率,但由于有功

功率、无功功率同比减小,所以需求侧响应对微电网的功率因数影响的不易确定,此算例中,在09:00、14:00、15:00和16:00,情景2的功率因数高于情景1,需求侧响应提高了微电网的功率因数,但是在08:00、10:00、11:00和12:00,降低了微电网与大电网的交互功率因数。因此只依靠需求侧响应提高功率因数效果较差。

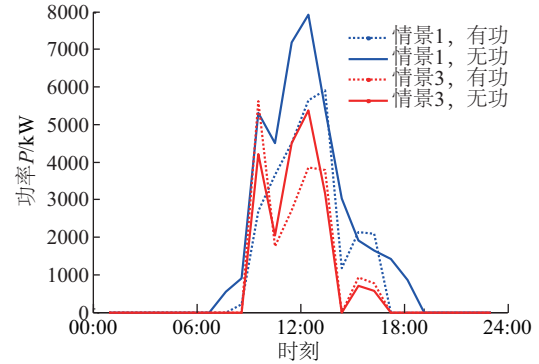


图6 交互功率的功率

Fig. 6 Power between power grid and microgrid

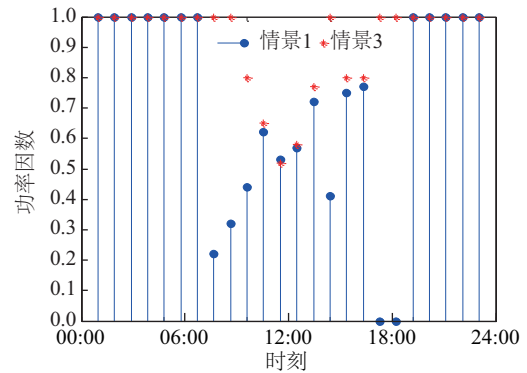


图7 电网与微电网交互功率因数

Fig. 7 Power factor between power grid and microgrid

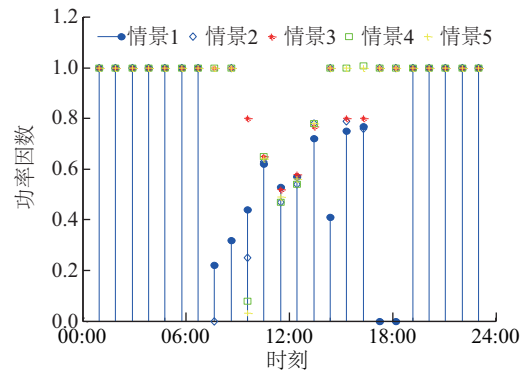


图8 交互功率因数

Fig. 8 Power factor between power grid and microgrid

对比 5 种情景,总体上看 3 种收费方式均能有效提高微电网与大电网交互功率的功率因数。图中有各别点功率因数极低,主要是因为微电网从大电网中吸收无功功率但是没有或者很少消耗有功功率造成的。从提高效果来看,情景 3、情景 5 明显优于情景 4,说明超出限定罚款收费方式和无功奖惩结合方式通过耦合有功功率和无功功率来调度新能源发出有功功率、无功功率对提高交互功率的功率因数的效果强于无功收费和无功奖惩结合收费方式。造成这种结果主要是由于图 5a 中情景 3、情景 5 中的太阳能减小有功发电量增加无功发电量程度大于其他情景。

6 结 论

本文针对大电网与微电网之间交互功率的功率因数限制,提出 3 种无功奖惩收费方法,并将其引入到微电网日前优化调度中。3 种收费方法使目标函数中的有功功率与无功功率有了耦合关系,以此来调度微电网中新能源发电的有功功率和无功功率。对微电网日前优化调度设计 5 种情景,并用非线性优化算法对模型进行求解。通过算例分析,表明所述 3 种收费方法可以提高微电网功率因数,对微电网日前优化调度具有良好的优化效果。

[参考文献]

- [1] LASSETER R H. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept[R]. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- [2] 张明锐, 陈洁, 杜志超, 等. 考虑交互功率控制的微电网经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1013-1023.
ZHANG M R, CHEN J, DU Z C, et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [3] 于哲, 史富莲. 电力市场环境下的无功定价方法研究[J]. 能源研究与管理, 2012(2): 15-19.
YU Z, SHI F L. Research of reactive power pricing in electric power market[J]. Energy research and mangement, 2012(2): 15-19.
- [4] MAHESH V, DEEPEEHA J R, KAMARAJ N. Reactive power dispatch and its pricing in re-structured electricity markets [C]//2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), International Conference on IEEE, Dindigul, India, 2013: 377-381.
- [5] EKSTRÖM J, KOIVISTO M, MILLAR J, et al. A statistical approach for hourly photovoltaic power generation modeling with generation locations without measured data[J]. Solar energy, 2016, 132: 173-187.
- [6] 毛晓明, 陈深, 吴杰康, 等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1192-1197.
MAO X M, CHEN S, WU J K, et al. Optimal dispatching of microgrid containing battery under time-of-use price mechanism [J]. Power system technology, 2015, 39(5): 1192-1197.
- [7] FITTRIN D W. Determining optimal schedule and Load capacity in the utilization of solar and wind energy in the microgrid scheme: a case study [J]. Energy procedia, 2015, 65: 48-57.
- [8] 张勇军, 刘瀚林, 朱心铭. 地区电网感性无功补偿优化配置方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 141-145.
ZHANG Y J, LIU H L, ZHU X M, et al. Optimal configuration of inductive reactive power compensators in regional power network[J]. Power system technology, 2011, 35(11): 141-145.
- [9] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.
CHEN L, ZHANG J G, SU H F. Reactive power planning for distribution system with grid- connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [10] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
ZHANG K, MAO C X, XIE J W, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87.
- [11] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.
WANG H C, LU Z X, ZHOU S X. Research on the capacity credit of winf energy resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106.
- [12] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
LANG Y Q, ZHANG X G, XU D G, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2007, 27(9): 77-82.
- [13] YOKOYAMA R, HIDA Y, KOYANAGI K, et al. The role of battery systems and expandable distribution networks for smarter grid [C]//Power and Energy Society General Meeting (IEEE), Detroit, MI, USA, 2011: 1-6.
- [14] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
- HAN X J, CHEN C, JI T M, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [15] 董开松, 丁岩, 谢永涛, 等. 基于需求侧响应的微电网市场优化模型[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 122-126.
- DONG K S, DING Y, XIE Y T, et al. Market optimization model for microgrid with demand response [J]. High voltage apparatus, 2015, 51(6): 122-126.
- [16] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346—354.
- BAI M K, TANG W, ZHANG L, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.
- [17] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180.
- [17] YANG Y H, PEI W, DENG W, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [18] 艾欣, 韩晓男, 孙英云. 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望[J]. 现代电力, 2013, 30(1): 1-7.
- AI X, HAN X N, SUN Y Y. The development status and prospect of grid-connected photovoltaic generation and its related technologies [J]. Modern electric power, 2013, 30(1): 1-7.

ACTIVE POWER AND REACTIVE POWER OPTIMAL DISPATCH OF MICROGRID CONSIDERED REACTIVE POWER REWARDS AND PENALTIES CHARGE

Lu Zhigang, Liu Yawen, Yang Fang, Geng Lijun, Liu Meisi

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the low grid voltage and unstable operation problems caused by the excessive consumption of reactive power by grid users, this paper proposes a microgrid daily active and reactive power coordination scheduling method that takes into consideration the rewards and punishments for reactive power. For improving the power factor of microgrid, three models of reactive power rewards and penalties are designed to optimize the distribution of active and reactive power of renewable energy in network. Combining the V2G characteristics of the electric vehicle and the response characteristics of the interruptible load, the scheduling policies can further maximize the operating benefit and ensure the safe operation of the microgrid. The feasibility and effectiveness of the proposed charging method are testified by simulation analysis.

Keywords: active power; reactive power; vehicle-to-grid (V2G); reactive power reward and penalty; microgrid; coordination dispatching