

包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度

石庆均,江全元

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 提出一种包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度方法。该方法将全天 24 h 划分为峰、平、谷 3 种时段,在实时调度时,根据当前调度时刻所处的不同时段和蓄电池荷电状态所处的不同范围,采用不同的运行调度策略,同时以各微电源的有功输出与无功输出作为优化变量建立能量优化模型,设计了蓄电池放电罚函数并计入能量优化模型的目标函数中,可确保蓄电池随时维持一定的储能量以便在非计划孤网突然发生时为微网提供紧急功率支撑。该方法不仅可实现微网的可靠、经济运行,还有助于对主网进行“削峰填谷”。算例分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 蓄电池; 储能; 微网; 实时调度; 优化; 模型

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.014

0 引言

近 20 年来,在能源需求与环境保护的双重压力下,以光伏(PV)发电和风力(WT)发电为代表的分布式发电(DG)技术得到了快速发展。然而,由于上述分布式电源的间歇性与波动性,随着 DG 渗透率的增加,大量 DG 系统分散、无联络地接入电网,将会增加对电力系统稳定性的负面影响。微网概念的提出为 DG 运行提供了一个新的模式。所谓微网,是指由分布式能源(DER)系统、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控系统、控制保护装置汇集而成的小型发配电系统,它既可以与外部电网并网运行,也可以独立运行^[1-4]。它不仅解决了 DG 系统的大量分散接入问题,还为用户带来了其他多方面的效益^[2],成为外部电网的有益补充。由于这些潜在优势,作为未来可能的一种能源供应模式,微网正得到越来越多的重视和研究。

蓄电池是微网中常见的储能形式,由于蓄电池等储能系统具有能量可双向流动、功率响应较快等特点^[5],其主要在微网独立运行时作为压频控制单元为微网提供稳定的电压与频率,微网并网运行时由主网为微网提供电压与频率支撑,蓄电池可退出运行,但为了充分发挥蓄电池为微网带来的运行效益,本文利用蓄电池储能在不同时间段的充放电来实现

微网与主网的“双赢”。

目前,针对微网的经济运行问题国内外的研究尚少。文献[6-7]建立了微网运行优化模型,但没有考虑储能单元;文献[8]是基于制定好的调度原则与控制策略安排各微电源的出力,且对蓄电池的使用是不断地反复充电放电;文献[9]建立了微网负荷优化分配的数学模型,其对蓄电池的利用只是在微电源不足以满足所有负荷需求时起到暂时性的支撑作用;文献[10]同样建立了微网有功优化模型,并提出 4 种优化目标;文献[11]建立了包含蓄电池储能的微网多目标有功优化模型,其中蓄电池只是基于先前制定好的规则进行逐次交替充放电,其在微网中的作用不明确。从国内外的研究来看,针对微网经济运行问题的建模,都只考虑了各微电源的有功功率输出,并未考虑微网网络结构及微电源的无功功率输出,且对储能单元的使用是基于先前制定的原则,没有充分发挥储能单元对提高微网运行效益的作用。

考虑到微网中可再生能源的间歇性和波动性特点,长时间尺度的功率预测偏差较大,其调度计划不能类似常规电网预先安排。本文提出一种包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度方法,该方法首先将全天 24 h 划分为峰、平、谷 3 种时段,在微网运行时实时监测蓄电池的荷电状态 SOC(State Of Charge),根据当前调度时刻所处的不同时段和蓄电池荷电状态所处的不同范围,采用不同的运行调度策略,并通过求解对应的能量优化模型安排各可控型微电源的有功输出与蓄电池的充放电功率,以及无功可调节型微电源的无功输出。与上述已有的实现方法相比,本文提出的方法主要有以下几点改进:

a. 同时以可控型微电源的有功功率和无功输出可调节型微电源的无功功率作为优化变量,并考虑微网自身的网络损耗建立能量优化模型,以同时安排

收稿日期:2012-06-24;修回日期:2013-04-07

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009-AA05Z221,2011AA05A113);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0489);浙江省科技计划项目(2009C34013);浙江省自然科学基金资助项目(R1080089)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2009AA-05Z221,2011AA05A113),Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China(NCET-08-0489),Technology Program of Zhejiang Province(2009-C34013) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province(R1080089)

各微电源的有功功率和无功功率运行点;

b. 通过在不同时段对蓄电池设计不同的充放电惩罚函数并计入能量优化模型的目标函数中,引导微网在谷、平时段从主网购电并将多余电能充入蓄电池,而在峰时段让蓄电池放电并向主电网售电,从而利用微网对主网进行“削峰填谷”,同时,由于主网谷、平时段电价较低,而峰时段电价较高,这样对微网而言也能获取更多的利润,提高了微网的运行效益,实现微网与主网的“双赢”;

c. 在峰时段时能量优化模型的目标函数中的蓄电池放电惩罚函数设计为蓄电池荷电状态与放电功率的函数,能引导蓄电池在剩余储能量较少时减小放电功率,使蓄电池随时保持一定储能量,能为微网转为非计划孤网运行时提供紧急功率支撑,提高了微网运行可靠性。

1 实时运行调度策略

荷电状态是反映蓄电池剩余电量的一个重要技术参数。其可以表示为^[12]:

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^t (I_{bat} - I_{loss}) d\tau \quad (1)$$

其中, SOC_0 为初始荷电状态; C_{bat} 为蓄电池的额定安时容量; I_{bat} 为充放电电流, 其值大于 0 表示充电, 小于 0 表示放电; I_{loss} 为损耗反应电流。

实时运行调度策略如图 1 所示, 图 1 中 SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为设置的蓄电池荷电状态的上限、下限, t 为当前实时调度时刻, n_T 为全天总的调度时段数, % 为求余运算符。根据外部电网负荷情况将全天 24 h 划分为峰时段、平时段和谷时段。在微网实时运行时, 以 5~15 min 为一实时调度周期, 在每次调度时刻首

先预测当前的负荷及可再生能源系统(PV、WT等)出力,并监测蓄电池的荷电状态,根据当前调度时刻所处的不同时段和荷电状态所处的不同范围,采用不同的运行调度策略,以确定微网内各可控型微电源的有功功率输出、蓄电池的充放电功率、与电网交互的有功功率和无功可调节型微电源的无功功率输出。如果当前调度时刻处于谷时段或平时段,若满足 $SOC < SOC_{max}$, 则确定蓄电池只可放电,并进行优化 1;若满足 $SOC < SOC_{max}$, 则确定蓄电池既可充电又可放电,并进行优化 2。如果当前处于峰时段,若满足 $SOC > SOC_{min}$, 则确定蓄电池只可放电,并进行优化 3;若不满足 $SOC > SOC_{min}$, 则确定以恒定功率对蓄电池充电,并进行优化 4。

2 微网系统运行的能量优化模型

在图 1 所示的微网实时运行调度策略中,涉及优化 1、优化 2、优化 3、优化 4 共 4 组能量优化模型。

2.1 能量优化模型 1

能量优化模型 1 对应优化 1,其目标是在满足系统运行的约束条件下优化微网中各可控型微电源的有功出力、蓄电池储能单元的放电功率及各无功输出可调节型微电源的无功出力,以使微网总运行成本最低。微网中的微电源大多是以电力电子与交流电网接口的发电单元,通过相应的控制技术可调节其无功输出^[13-15],称此类微电源为无功可调节型微电源。并网运行时各微电源一般按 PQ 控制(即定有功无功控制)方式运行,本文同时将微电源的有功和无功作为优化变量建立能量优化模型,可为 PQ 控制型微电源同时提供有功和无功运行参考点。

2.1.1 目标函数

$$\min F = \sum_{i \in S_C} [U_i C_{Fi}(P_i) + U_i C_{OMi}(P_i) + U_i(1 - U_{i,P})C_{Si}] + \gamma_{bat} + U_P P_{Pgrid} c_P - U_S P_{Sgrid} c_S \quad (2)$$

$$\gamma_{bat} = \sigma P_{bat} \quad (3)$$

$$C_{OMi}(P_i) = K_{OMi} P_i \quad (4)$$

其中, S_C 为可控型微电源集合; i 为系统中可控型微电源编号; P_i 为可控型微电源的输出功率; U_i 为当前调度时段内可控型微电源的状态,其值为 0 表示处于停运状态,其值为 1 表示处于运行状态; $U_{i,P}$ 为前一调度时段内可控型微电源的运行状态; U_P 为从主网购电标记符,其值为 0 表示不购电,其值为 1 表示购电; U_S 为向主网售电标记符,其值为 0 表示不售电,其值为 1 表示售电; $C_{Fi}(P_i)$ 为可控型微电源的能耗成本; $C_{OMi}(P_i)$ 为可控型微电源的运行维护成本; C_{Si} 为可控型微电源的启动成本; γ_{bat} 为所设计的蓄电池充放电惩罚函数; P_{Pgrid} 为微网从主网购电功率; P_{Sgrid} 为微网向主网售电功率; c_P 为微网从主网购电电价; c_S 为微网向主网售电电价; σ 为所设计的罚系数,其取值

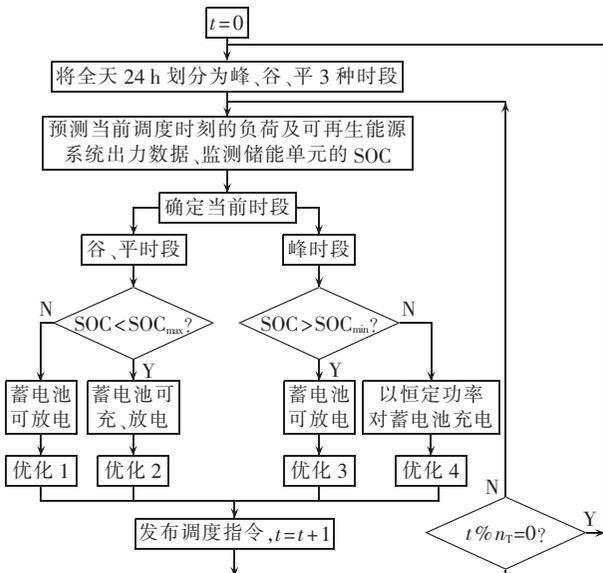


图 1 微网实时运行调度策略流程图

Fig.1 Flowchart of real-time microgrid power dispatch

比平、谷时段从主网购电的价格值稍高; P_{bat} 为蓄电池的充放电功率, 其值大于 0 表示放电, 其值小于 0 表示充电; K_{OMr} 为可控型微电源的运行维护系数。

式(2)中等号右边第 1 项为微电源运行成本, 第 2 项为设计的蓄电池充放电罚函数, 第 3 项为微网从主网购电成本, 第 4 项为微网向主网售电收益。

2.1.2 约束条件

a. 潮流约束条件。

$$\begin{cases} P_{\text{Ri}} - \sum_{j=1}^n [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = 0 \\ Q_{\text{Ri}} - \sum_{j=1}^n [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = 0 \end{cases} \quad i, j \in S_N \quad (5)$$

其中, $P_{\text{Ri}}, Q_{\text{Ri}}$ 为各节点注入有功功率和无功功率; e_i, f_i 为用复数表示的各节点电压的实部和虚部; G_{ij}, B_{ij} 为 i 与 j 节点导纳元素的实部和虚部; n 为微网内总节点数; S_N 为微网内所有节点集合。

b. 可控型微电源容量约束。

$$U_i P_{\text{Li}} \leq P_i \leq U_i \bar{P}_i \quad i \in S_G \quad (6)$$

其中, \bar{P}_i, P_i 分别为可控型微电源的输出功率上限、下限。

c. 蓄电池的放电有功功率约束。

$$0 \leq P_{\text{bat}} \leq U_{\text{Pbat}} \bar{P}_{\text{th}} \quad (7)$$

$$\bar{P}_{\text{th}} = \min[(\text{SOC} - \text{SOC}_{\text{min}})C_{\text{bat}} / \Delta t, \hat{I}_{\text{th}}]U_{\text{bat}} \quad (8)$$

其中, U_{Pbat} 为蓄电池状态, 其值为 1 表示蓄电池充电或放电, 为 0 表示蓄电池不工作; \bar{P}_{th} 为当前调度时刻蓄电池的最大可放电功率; SOC 为蓄电池当前荷电状态; C_{bat} 为蓄电池组的额定安时容量; Δt 为实时调度周期; \hat{I}_{th} 为蓄电池组的最大允许放电电流; U_{bat} 为蓄电池组端电压。

通常情况下, 蓄电池单位时间内最大充放电电流为其额定安时容量的 20%^[16], 则:

$$\hat{I}_{\text{th}} = 0.2 C_{\text{bat}} / \Delta t \quad (9)$$

d. 微网与主网间能够交互的最大容量约束, 这可能是它们之间所达成的供求协议或者联络线的物理传输容量限值。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{Pgrid}} \leq U_P \bar{P}_{\text{Pgrid}} \\ 0 \leq P_{\text{Sgrid}} \leq U_S \bar{P}_{\text{Sgrid}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, \bar{P}_{Pgrid} 为微网从主网购电的最大有功功率限值; \bar{P}_{Sgrid} 为微网向主网售电的最大有功功率限值。

e. 可控型微电源的最短持续运行时间和最短持续停运时间约束。

$$\begin{cases} (T_{i,P}^{\text{on}} - T_{\text{Mri}})(U_{i,P} - U_i) \geq 0 \\ (T_{i,P}^{\text{off}} - T_{\text{Msi}})(U_i - U_{i,P}) \geq 0 \end{cases} \quad i \in S_G \quad (11)$$

其中, $T_{i,P}^{\text{on}}$ 为前一调度时段末第 i 台可控型微电源的持续运行时间; $T_{i,P}^{\text{off}}$ 为前一调度时段末第 i 台可控型微电源的持续停运时间; T_{Mri} 为最小持续运行时间;

T_{Msi} 为最小持续停运时间。

f. 可控型微电源有功功率输出变化率限制。

$$\begin{cases} P_i - P_{i,P} \leq \Delta t R_{\text{Ui}} \\ P_{i,P} - P_i \leq \Delta t R_{\text{Di}} \end{cases} \quad i \in S_G \quad (12)$$

其中, R_{Ui} 为可控型微电源本调度时段相对于前一时段的功率增加限制, 即上升率限制; R_{Di} 为下降率限制; $P_{i,P}$ 为前一调度时段内微电源的有功输出。

g. 从主网买卖电互斥约束。

$$U_P + U_S \leq 1 \quad (13)$$

h. 无功可调节型电源的无功功率输出约束。

$$0 \leq Q_k \leq U_k \bar{Q}_k \quad k \in S_Q \quad (14)$$

其中, S_Q 为无功输出可调节型电源集合; U_k 为无功输出状态; Q_k 为无功功率输出; \bar{Q}_k 为最大无功输出限值。

2.2 能量优化模型 2

能量优化模型 2 对应优化 2, 其目标是在满足系统运行的约束条件下优化微网中各可控型微电源的有功出力、蓄电池储能的充电或放电功率及各无功可调节型电源的无功出力, 以使微网总运行成本最低。

2.2.1 目标函数

能量优化模型 2 的目标函数与能量优化模型 1 完全相同。

2.2.2 约束条件

能量优化模型 2 的约束条件与能量优化模型 1 基本相同, 只是约束条件中的蓄电池的放电有功功率约束变为:

$$-U_{\text{Pbat}} \bar{P}_{\text{ch}} \leq P_{\text{bat}} \leq U_{\text{Pbat}} \bar{P}_{\text{th}} \quad (15)$$

$$\bar{P}_{\text{ch}} = \min[(\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC})C_{\text{bat}} / \Delta t, 0.2 C_{\text{bat}} / \Delta t]U_{\text{bat}} \quad (16)$$

其中, \bar{P}_{ch} 为当前蓄电池最大可充电功率。

2.3 能量优化模型 3

能量优化模型 3 对应优化 3, 其目标是在满足系统运行的约束条件下优化微网中各可控型微电源的有功出力、蓄电池的放电功率及各无功输出可调节型微电源的无功出力, 以使微网总运行成本最低。

2.3.1 目标函数

能量优化模型 3 的目标函数与能量优化模型 1 略微不同, 不同之处在于目标函数中的蓄电池罚函数项, 能量优化模型 3 的目标函数为:

$$\min F = \sum_{i \in S_G} [U_i C_{\text{Ri}}(P_i) + U_i C_{\text{OMr}}(P_i) + U_i (1 - U_{i,P}) C_{\text{Si}}] + \lambda_{\text{bat}} + U_P P_{\text{Pgrid}} C_P - U_S P_{\text{Sgrid}} C_S \quad (17)$$

$$\lambda_{\text{bat}} = \delta P_{\text{bat}} \quad (18)$$

$$\delta = a_1 + a_2 d_{\text{SOC}} + a_3 d_{\text{SOC}} P_{\text{bat}} + a_4 P_{\text{bat}} + a_5 d_{\text{SOC}}^2 \quad (19)$$

$$d_{\text{SOC}} = \text{SOC} - \text{SOC}_{\text{min}} \quad (20)$$

其中, λ_{bat} 设计为峰时段蓄电池放电罚函数; δ 为设计的罚因子函数; d_{SOC} 为当前荷电状态与荷电状态下限值间的差值, 其反映了蓄电池剩余储能的比例; a_1 、

a_2, a_3, a_4, a_5 为所设计的系数。

根据在不同 d_{SOC} 时,对不同的放电功率 P_{bat} 取不同的罚值进行描点,各罚值点的取值遵循以下规律:当 d_{SOC} 一定时, P_{bat} 越大,对应的罚值取得越大;当 P_{bat} 一定时, d_{SOC} 越小,对应的罚值取得越大。在取得一系列罚值点后,由式(19)拟合得到 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 。

并网运行的微网要预防主网突然发生故障而转为非计划孤网自治运行的情况,孤网运行时蓄电池储能单元通常作为压频控制单元^[12-13],以为微网提供稳定的电压与频率支撑,其将弥补微网内的不平衡功率,通过在并网运行调度时让蓄电池随时维持一定的储能量,以便当非计划孤网发生时为微网提供紧急功率支撑,所以在储能量充足时允许蓄电池多放电,而当储能量较少时少放电,为此设计了蓄电池放电罚函数,并将其计入目标函数中。

所设计的蓄电池放电罚因子 δ 具有如图 2 所示的特性,即当蓄电池剩余储能量较多(d_{SOC} 较大)时罚因子较小,而剩余储能量较少(d_{SOC} 较小)时罚因子较大,且放电功率 P_{bat} 越大,罚因子就越大。通过将所设计的放电罚函数计入目标函数中,将使得蓄电池在剩余储能量较少时减小放电功率。

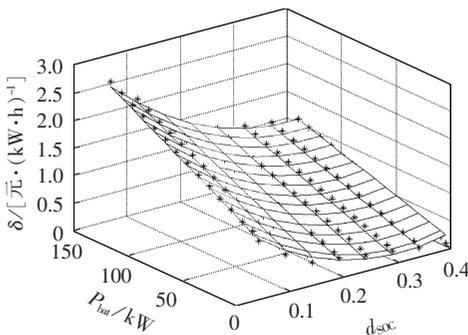


图 2 蓄电池放电罚因子 δ 曲线

Fig.2 Curve of penalty factor δ for battery discharge

2.3.2 约束条件

能量优化模型 3 的约束条件与能量优化模型 1 完全相同。

2.4 能量优化模型 4

能量优化模型 4 对应优化 4,其目标是在满足系统运行的约束条件下优化微网中各可控型微电源的有功出力及各无功可调节型电源的无功出力,以使微网总运行成本最低。

2.4.1 目标函数

能量优化模型 4 的目标函数如式(21)所示,相对能量优化模型 1,其缺少了蓄电池罚函数项。

$$\min F = \sum_{i \in S_C} [U_i C_{Fi}(P_i) + U_i C_{OMi}(P_i) + U_i(1 - U_{i,P})C_{Si}] + U_P P_{Pgrid} C_P - U_S P_{Sgrid} C_S \quad (21)$$

2.4.2 约束条件

能量优化模型 4 的约束条件与能量优化模型 1 的约束条件基本相同,只是没有蓄电池的放电有功功率约束。蓄电池的充/放电功率不参与优化,而以恒定功率对蓄电池充电,此时蓄电池相当于一个恒定的负荷,且将对蓄电池充电的恒定功率计入蓄电池所在微网节点处的负荷中。对蓄电池的恒定充电功率为:

$$P_{bat} = 0.2 C_{bat} U_{bat} / \Delta t \quad (22)$$

3 算例分析

本文选取图 3 所示的微网算例系统^[6,11,17-18],其中与主网的公共耦合点(PCC)保持闭合状态。系统中可再生能源发电系统有 PV、WT,可控型微电源有柴油发电机 DE(Diesel Engine)、微型燃气轮机 MT(Micro-Turbine)和燃料电池 FC(Fuel Cell),储能单元有蓄电池组 Bat(Battery)。其中 PV 系统容量为 150 kW,WT 系统容量为 150 kW,Bat 的最大充电功率、最大放电功率均为 160 kW。无功输出可调节型电源考虑了 WT、MT、FC、Bat,同时认为与主网间交互的无功功率也可调节,对于 PV,假定其按单位功率因数控制,其无功输出始终为 0 kvar,对于 DE,其直接与三相电网连接,假定按额定功率因数 0.98 输出无功。SOC_{min}、SOC_{max} 分别设置为 0.5 与 0.9,微网内各节点间线路的单位长度阻抗取 0.64 + j0.1 Ω /km,各可控型微电源的能耗成本曲线如图 4 所示,各可控型微电源的其他相关信息如表 1 所示。为分析本文

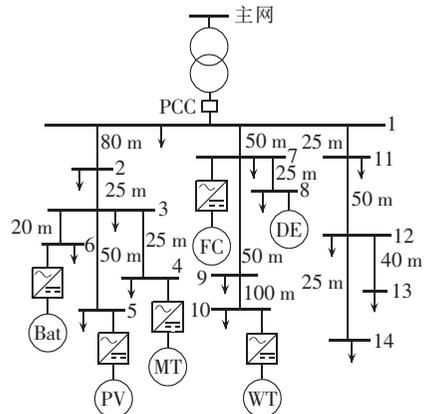


图 3 微网算例系统结构图

Fig.3 Structure of microgrid system for case study

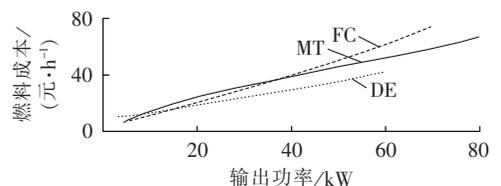


图 4 可控型微电源的供能成本曲线

Fig.4 Curves of cost vs. power output of controllable micro-sources

表 1 各可控型微电源的相关信息
Tab.1 Data of controllable micro-sources

微电源	容量/kW		运行维护系数/ [元·(kW·h) ⁻¹]	开机启动 费用/元	最小连续运 行时间/h	最小连续停 运时间/h	有功输出变化率限制/(kW·h ⁻¹)	
	下限	上限					上升率	下降率
DE	3	60	0.0859	1.5	2	1.5	120	140
MT	5	80	0.0401	3	2	2	140	160
FC	4	70	0.0286	2	2	2	120	160

提出的微网实时调度方法在长时间跨度上的“削峰填谷”功效,对一整天(选取某一天)的每一调度时段都进行计算。

在算例中实行分时电价政策,谷时段为 00:00—08:00,平时段为 08:00—11:00、16:00—19:00 和 22:00—24:00,峰时段为 11:00—16:00 和 19:00—22:00。算例中应用的分时电价见表 2。

表 2 购电与售电电价

Tab.2 Purchasing and selling prices

项目	价格/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	1.56	0.70	0.43
售电	1.28	0.54	0.32

为提高可再生能源的利用率,PV 和 WT 均工作在最大功率点跟踪模式,其输出功率遵循图 5 所示的典型曲线,图中有功功率为标么值,将其作为算例分析所需的全天数据。

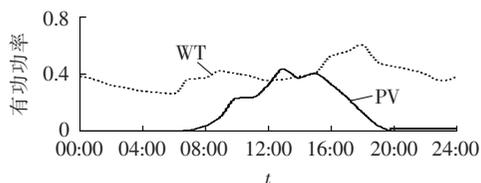


图 5 光伏发电系统和风力发电系统全天有功输出曲线

Fig.5 Power output curves of photovoltaic and wind-turbine generation systems for a day

为使测试系统更接近实际情况,将系统中的负荷分为工业负荷和家庭负荷 2 类,并假定各节点负荷都遵循如图 6 所示的典型曲线^[19],图中有功功率为标么值。

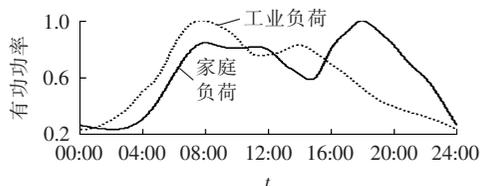


图 6 工业负荷和家庭负荷全天典型分布曲线

Fig.6 Typical load curves of industry and household for a day

微网系统中总共 14 个节点负荷,其负荷相关信息如表 3 所示,其中假定各节点负荷的功率因数恒定。

以 15 min 为实时调度周期,根据提出的调度方法,在 MATLAB 环境下编写程序并对算例进行计算,

得到各可控型微电源、蓄电池及主网的全天有功功率输出如图 7 所示,无功输出可调节型电源的全天无功输出如图 8 所示,蓄电池组全天的荷电状态曲线如图 9 所示,各调度周期内的微网运行成本如图 10 所示。

由图 7、9 可见:在谷、平时段微网从电网购电,

表 3 微网中各节点负荷相关信息

Tab.3 Data of node loads in microgrid

负荷处 节点号	有功功率/kW		负荷功率 因数
	家庭负荷	工业负荷	
1	0	15	0.9545
2	6	16	0.9487
3	12	0	0.9751
4	0	20	0.9751
5	10	0	0.9798
6	15	0	0.9615
7	12	24	0.9740
8	0	12	0.9781
9	7	0	0.9417
10	9	0	0.9654
11	8.8	0	0.9772
12	12	0	0.9487
13	10	0	0.9728
14	4	0	0.9790

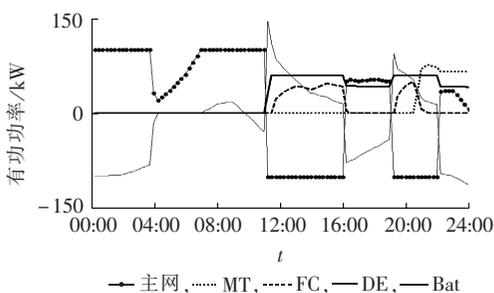


图 7 可控型微电源、蓄电池及主网的全天有功功率输出

Fig.7 Active power output of controllable micro-sources, battery and main grid for a day

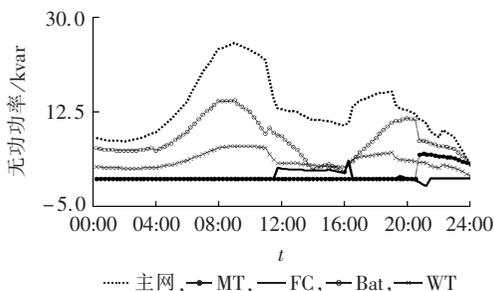


图 8 无功输出可调节型电源的全天无功功率输出
Fig.8 Reactive power output of controllable sources for a day

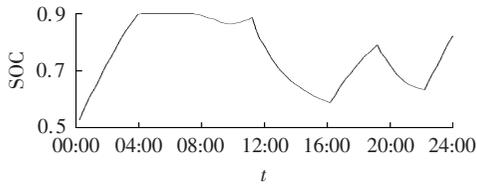


图 9 蓄电池组全天的荷电状态变化曲线

Fig.9 SOC curve of battery for a day

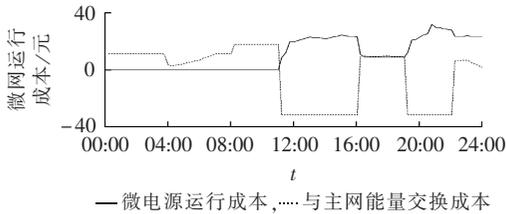


图 10 各调度周期内的微网运行成本

Fig.10 Operating cost of microgrid for different dispatch periods

而在峰时段微网向电网售电,从而实现微网对主网的“削峰填谷”功效;在谷、平时段 00:00—11:00 内,微网内部负荷较轻,优先通过从主网购电供给,不足的电力通过蓄电池放电补充,从主网所购电力在满足所有负荷的前提下对蓄电池充电,且在蓄电池充电容量允许的情况下以最大限度购电;蓄电池的充放电状态与微网和主网间的交互功率方向之间密切相关,在绝大多数实时调度周期内,当微网从主网购电时蓄电池充电,当微网向主网售电时蓄电池放电,可见在实现微网对主网“削峰填谷”功效方面蓄电池发挥了关键作用;在峰时段蓄电池的放电功率随着其荷电状态的减小而减小,蓄电池荷电状态始终维持在 $SOC_{\min} \sim SOC_{\max}$ (0.5~0.9) 之间,同时蓄电池放电至其荷电状态越接近 SOC_{\min} (0.5) 时其放电功率越小,因此本文提出的方法始终能让蓄电池运行在安全的荷电状态范围内,防止了过充电或过放电给蓄电池带来的寿命折损,且蓄电池随时保持了一定储能量(从图 9 知 01:00 以后 SOC 始终在 0.6 以上,比 SOC_{\min} 大),能在非计划孤网突发时为微网提供紧急功率支撑,保证可靠运行。

图 10 展示了微网在各调度周期内的运行成本,基于图 10 得到微网全天总运行成本如表 4 所示。由表 4 可知,微网通过在不同时段与主网间的功率交换获取收益,进一步计算可得从主网购电平均价格为 $634.6/1156.2 \approx 0.55$ (元/(kW·h)),而向主网售电平均价格为 $1024.0/800.0 = 1.28$ (元/(kW·h))(由图 7 计算得全天总计从主网购电 1156.2 kW·h,向主网售电 800.0 kW·h),可见在对主网“削峰填谷”的过程中,微网在谷、平时段以较低价格采购电能,而在峰时段微网又以高于购电时的价格向主网卖电,由此获取差额利润,降低了微网运行总成本。

表 4 微网全天总运行成本

Tab.4 Total operating cost of microgrid for a day

微电源运行成本	从主网购电成本	向主网售电收益	从主网获取收益	微网运行总成本
1003.9	634.6	1024.0	389.4	614.5

4 结语

本文提出一种包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度方法。该方法将全天 24 h 划分为峰、平、谷 3 种时段,在实时调度时监测微网内蓄电池的荷电状态,根据当前调度时刻所处的不同时段和荷电状态所处的不同范围,采用不同的运行调度策略,建立的能量优化模型可同时为 PQ 控制微电源提供有功功率和无功功率的运行点指令,设计了蓄电池放电罚函数并计入能量优化模型的目标函数中,可确保蓄电池随时维持一定的储能量以便在非计划孤网突然发生时为微网提供紧急功率支撑。本方法不仅可实现微网的可靠、经济运行,还有助于对主网进行“削峰填谷”,实现微网与主网 2 个主体的“双赢”。本文提出了微网实时运行调度策略,建立了所涉及的 4 组能量优化模型,通过算例验证了文中所提出方法的有效性,为微网优化运行管理提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):100-107.
- [2] HATZIARGYRIOU N,ASAND H,IRAVANI R,et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(4):78-94.
- [3] 王成山,杨占刚,王守相,等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):99-105.
WANG Chengshan,YANG Zhangang,WANG Shouxiang,et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):99-105.
- [4] 茆美琴,丁明,张榴晨,等. 多能源发电微网实验平台及其能量管理信息集成[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):106-111.
MAO Meiqin,DING Ming,ZHANG Liuchen,et al. Testbed and information integration of EMS for a microgrid with multi-energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(1):106-111.
- [5] KATRAEI F,IRAVANI R,HATZIARGYRIOU N,et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2008,6(3):54-56.
- [6] MOHAMED F A,KOIVO H N. System modelling and online optimal management of microgrid using multi-objective optimization[C]//Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power. Capri,Italy:[s.n.],2007:148-153.
- [7] SEON-JU A,SEUNG-IL M. Economic scheduling of distributed generators in a microgrid considering various constraints [C]//

- Proceedings of Power & Energy Society General Meeting. Seoul, Korea: [s.n.], 2009: 1-6.
- [8] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
- NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [9] 陈达威, 朱桂萍. 微电网负荷优化分配[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 45-49.
- CHEN Dawei, ZHU Guiping. An investigation on optimal load distribution of microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 45-49.
- [10] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 78-82.
- [11] MOHAMED F A, KOIVO H N. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization[C]// Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Setubal, Portugal: [s.n.], 2007: 231-236.
- [12] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Power Sources, 2001, 96(1): 113-120.
- [13] LOPES P J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [14] 薛迎成, 邵能灵, 刘立群, 等. 微网孤岛运行模式下的协调控制策略[J]. 中国电力, 2009, 42(7): 36-40.
- XUE Yingcheng, TAI Nengling, LIU Liqun, et al. Co-operation control strategies for islanded microgrids[J]. Electric Power, 2009, 42(7): 36-40.
- [15] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetic control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [16] HONGXING Y, WEI Z, LIN L, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.
- [17] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [18] 周华锋, 涂卫平, 刘皓明. 孤岛运行方式下微网有功功率优化策略研究[J]. 广东电力, 2010, 23(7): 1-4.
- ZHOU Huafeng, TU Weiping, LIU Haoming. Optimal strategy of active power in microgrid islanded operation[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(7): 1-4.
- [19] RUDION K, ORTHS A, STYCZYNSKI Z A, et al. Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of DG integration[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: [s.n.], 2006: 1-6.

作者简介:

石庆均(1987-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 主要研究方向为微网能量管理及运行控制、分布式发电技术(E-mail: shi583031882@126.com);

江全元(1975-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、分布式发电与集中式可再生能源发电、高速铁路牵引供电(E-mail: jqy@zju.edu.cn)。

Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage

SHI Qingjun, JIANG Quanyuan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage is proposed, which divides the day into peak period, normal period and valley period, and adopts different dispatch strategies according to current period and the SOC(State Of Charge) level of battery storage. The energy optimization model with the active and reactive power outputs of micro-sources as the optimization variables is established and the objective function of the model includes a designed battery discharge penalty function to maintain a certain amount of stored energy at any time as the emergency power support for microgrid during non-planned islanding. The proposed dispatch strategy improves the reliability and economy of microgrid operation and helps the "peak clipping and valley filling" of main grid. Case analysis verifies its effectiveness.

Key words: electric batteries; energy storage; microgrid; real-time dispatch; optimization; models