

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202019

离网型微电网稳态功率控制策略研究与实践

郝飞¹, 袁贞², 袁志彬³, 庄怀东¹, 施烨¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 中电建路桥集团南京工程勘察设计有限公司, 江苏 南京 211100; 3. 国网吉林电力有限公司松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要: 为了更好地解决离网型微电网的“源-荷”匹配问题, 减轻以往能量管理过多依赖预测信息的弊端, 在对储能电池 SOC 状态的变化趋势研究和工程实践的基础上, 针对不同运行方式和运行场景, 采用了基于专家规则的控制策略, 充分利用微网能量管理系统的一体化数据采集和处理, 保证能量管理可以依据储能 SOC 所属区间, 按照事先制定的策略表, 进行微网的稳态功率调控。在实际工程应用中, 合理地设计了功率控制的控制网络, 保证控制的快速性和准确性。该控制方法实现了光伏、风电、蓄热锅炉的功率自动控制, 提高了离网型微电网稳态“源-荷”平衡控制的准确性和鲁棒性。

关键词: 离网型微电网; 能量管理系统; 负荷预测; 功率预测; 规则推理

Research and practice on off-grid microgrid steady power control strategy

HAO Fei¹, YUAN Zhen², YUAN Zhibin³, ZHUANG Huaidong¹, SHI Ye¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Power China Road-bridge Group Nanjing Engineering Consultants Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Songyuan Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: There is a need to better match the source and load of an off grid micro grid and reduce the disadvantages of over reliance on prediction information of energy management. Based on the research and engineering practice of the SOC state change trend of an energy storage battery, a control strategy based on expert rules is adopted for different operation modes and scenarios, and the micro grid energy management system is fully utilized. Integrated data acquisition and processing ensures that energy management can not only control the stable power of the microgrid according to the range of the SOC, but also according to the strategy table. In practical engineering application, the control network of power control is designed reasonably to ensure the rapidity and accuracy of control. The control method achieves the power automatic control of photovoltaic, wind power and a heat storage boiler, and improves the accuracy and robustness of the off grid micro grid steady-state source load balance control.

This work is supported by National Major Special Project (No. 2018YFB0904800) and Strategic International Science and Technology Innovation Cooperation Key Project of National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFE0200400).

Key words: off-grid microgrid; energy management system; load forecast; power forecast; rule reasoning

0 引言

在“高原、海岛、边防、无人区”(高海边无)地区由于存在着很多供电的盲区, 无法依靠电网输

电来解决用电问题, 当地用电只能依赖于发电机, 严重影响当地居民的生活品质。微电网是利用分布式能源的有效方式, 具有投资成本小、建设方式灵活、清洁环保的特点^[1-2]。同时, 还可以有效利用“高海边无”地区的良好自然资源, 建设离网型微电网, 解决当地居民的日常用电和取暖问题。对于离网型微电网来说, 要采用分层调控的方式来保证电网的正常运行, 调频调压主要由储能系统的 PCS 来

基金项目: 国家重大专项资助(2018YFB0904800); 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项资助(2020YFE0200400)

完成，二次调频和调压也由储能系统承担；稳态的能量管理和功率控制由微电网能量管理系统完成；微网协调控制器采用切机或甩负荷的方式，以应对电压或频率出现的大波动情况^[3-7]。本文主要对微电网能量管理进行研究，通过结合实时数据和趋势分析的功率控制，保证离网型微电网的能量平衡。

在已有研究中，多时间尺度的优化调度策略已成为处理微电网能量管理问题的主流方法^[8-10]。该方法基于分布式电源(Distributed Generation, DG)和负荷的功率预测信息，将微网的能量管理过程分为日前、日内和实时等不同时间尺度的混合整数线性规划问题进行分层协调处理，其兼顾了系统未来运行趋势和实时运行状态，但其优化调度结果却严重依赖于 DG 功率预测信息。然而，对于“高海边无”地区，由于当地的气象条件比较恶劣，进行较准确的 DG 功率预测的难度较大。

除了多时间尺度的优化调度策略，还有基于鲁棒优化、概率优化等不确定性方法的调度策略。其中鲁棒优化调度算法结果偏保守，计算效率和算法收敛性均欠佳^[11-15]；随机优化调度算法依赖于随机变量的概率分布模型，而“高海边无”地区的分布式资源一般缺少统计数据，导致分布式资源随机变量概率分布模型的求取较复杂，增加了能量管理策略的实现难度^[16-19]。综上所述，为了实现高海边无地区离网型微电网的能量管理，需要对蓄电池储能的微网实时能量优化调度方法进行深入研究，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运行区间，采用不同的运行调度策略^[20-22]；并能够基于储能 SOC 状态制定微电网能量优化调度策略，保证重要负荷的供电。

本文借鉴已有的研究成果，根据具体工程项目的实际控制需求，以能量管理系统为载体，对离网型微电网的稳态功率控制问题进行系统性的分析和设计，主要包括以下 3 个方面：能量管理系统的系统架构设计、“源-网-荷-储”分层优化调度策略、基于专家规则的实时校正控制。最后，结合现场工程实践和稳态控制效果，对离网型微电网的稳态功率控制进行总结分析，并给出具体的改进建议。

1 离网型微电网控制要求

1.1 微电网结构

离网型微电网一般都建在“高海边无”地区，这些地方没有成熟的供电网络，传统的供电方式都是柴油发电机。由图 1 可以看出，本项目微电网的构成情况，在电源侧系统总装机 29 MW。其中，光伏每段母线装机 10 MW，共 20 MW；风机每段母

线装机 3 MW，共 6 MW；柴发每段装机 1.5 MW，共 3 MW；储能每段装机 8 MW，共 16 MW；在负荷侧可以按照负荷重要程度的不同，分成一类、二类、三类 3 种不同类型的负荷，柔性负荷主要为蓄热锅炉，最大用电负荷能达到 10 MW。从地理和气候特征来看，该地区夏季光照时间较长，有效光照可以达到 10 个小时，冬季光照辐射相对较弱，有效光照时间在 8 个小时左右；由于地处峡谷地带，风力资源有限，间歇性强，风向多变。

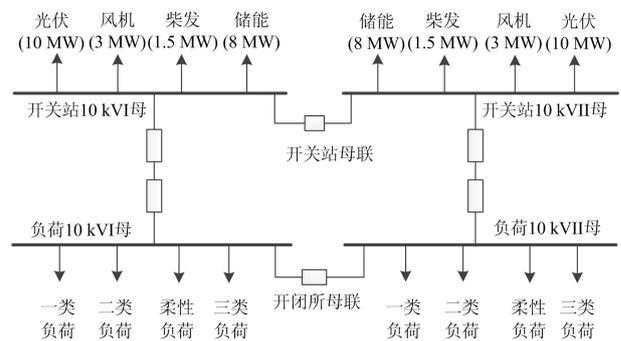


图 1 离网型微电网的构成

Fig. 1 Structure of the off-grid microgrid

在季节变化中，系统呈现非取暖季为大电源小负荷的状况，在光照良好的天气，以限功率运行为主；在阴天、雨天等光照不良的条件下，以最大功率运行，需要充分利用风电短时发电功率，对储能进行充电，保证夜间的用电和 SOC 运行在安全范围；在取暖季蓄热锅炉的用电负荷较大，而该时段光伏的出力受光照强度减弱和有效光照时间的缩短的影响，发电效率下降。因此，需要制定较为详细的控制策略，在保证系统稳定运行的前提下，满足负荷侧供电、供暖的需求。

1.2 微网能量管理系统

微网能量管理系统作为微电网的大脑，主要负责协调“源-荷”匹配，即在电源过剩的情况下，通过控制风力发电和光伏发电的出力保证能量平衡，并避免频率过高；在电源不足的情况下，通过控制蓄热锅炉的负荷，来保证重要用户供电，并避免电网频率过低。

由图 2 可以看出：能量管理系统采集微电网中各个子系统数据，实现一体化集中监控；并通过多时间尺度的分层综合优化，保证电网的稳定运行，具体包括日前优化调度、日内滚动优化和实时闭环控制。其中，日前优化调度根据气象数据，进行功率及负荷预测，结合“源-网-荷-储”运行特征，制定未来一天的发电计划和负荷调控预案；日内滚动优化根据超短期预测数据和调度员方式设定，进行

能量计划的滚动修正；实时闭环控制基于储能SOC、频率越限、电压越限等情况，实现对可控电源、储能充放电、柔性负荷的闭环控制，并具备紧急情况下的一键黑启动功能。

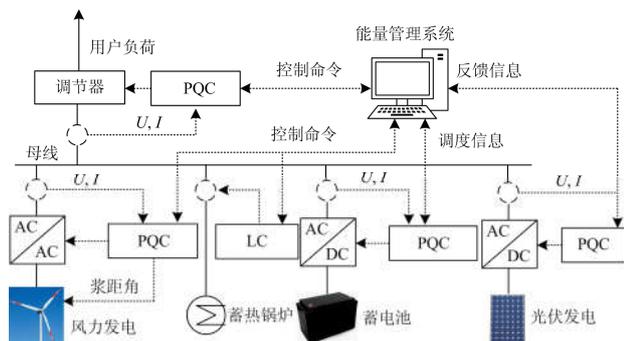


图2 微网能量管理系统的控制方案

Fig. 2 Control strategy of microgrid management system

1.3 分层综合优化

分层综合优化主要解决“源-荷”匹配的问题，让发电和负荷能在各个时刻保持平衡；除此，还要考虑储能充电、电锅炉蓄热的要求，既要保证夜间SOC运行在高位，又要留有足够的调控裕度，以应对系统的电压或频率的波动；运行目标约束是要结合成本、损耗等经济性指标，利用好风、光、储的互补关系，发挥各自的特点。

从图3可以看出，分层综合优化需要风光功率预测、负荷预测作为优化的输入数据，同时要结合调度优化的约束条件，如能量平衡、储能充放电、运行目标等。日前优化调度根据短期负荷预测、风光功率预测、设备检修计划，考虑源端、网侧、负荷和储能的约束条件，优化生成风电机组、光伏发电、蓄热锅炉的日功率计划曲线，并初步制定储能电池的充放电策略；日内滚动优化滚动结合超短期预测的数据，对未来1h内风电机组、光伏发电、蓄热锅炉的功率计划、储能电池的充放电策略和负荷调控计划进行修正，生成实时控制设定值的基础值。

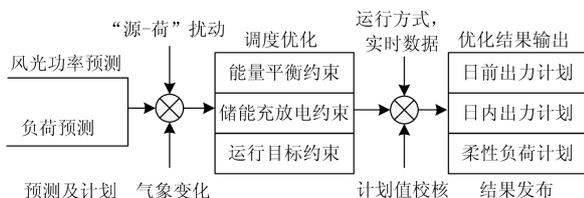


图3 分层综合优化的实现过程

Fig. 3 Realization process of hierarchical comprehensive optimization

2 稳态功率控制

在离网型微电网的稳态功率控制中，分层综合优化的结果只能作为参考，由于“高海边无”地区的自然条件较差，气象多变，风光功率预测精度较差，导致优化调度结果出现较大偏差，不能满足实际运行的要求。因此需要结合天气、负荷情况对微电网的运行场景进行分析，在稳态控制中加入专家控制策略，以保证电网的安全稳定运行。在离网型微电网的实时控制中，储能是保证系统稳定的重要基础。储能中央控制系统和储能协调控制器，实时控制储能的充放电功率，保证电网电压和频率运行在合理区间；微网协调控制器承担着紧急控制和运行模式切换角色，通过切机和切负荷的方式，避免电网崩溃和失电；而为了防止储能电池的频繁充放电，延长电池的使用寿命，需要能量管理系统能综合“源-网-荷-储”各个环节的运行态势，制定稳态功率的控制策略，对电源发电出力 and 负荷功率作出及时的调整，避免系统出现大的波动。在本项目中由于蓄热所需负荷功率较大，占到负荷的80%左右，因此在制定控制策略时，分为非取暖季和取暖季。

2.1 非取暖季的控制策略

在非取暖季要保证夜间SOC处于高百分比，满足夜间供电需要。白天储能电池充电以光伏为主，风电为辅。在光照条件不好的情况下，合理利用风电资源；夜间在风力发电稳定的情况下，利用风力来供电，并适当给电池充电。能量管理系统通过风机功率控制器和光伏功率控制器，控制风机和光伏逆变器进行有功功率的闭环控制。

从图4可以看出，储能的运行区间分为限功率慢充电、安全快速充电和限功率慢放电3个主要的区间，其中， SOC_{max} 、 SOC_{high} 、 SOC_{low} 、 SOC_{min} 分



图4 储能的运行区间划分

Fig. 4 Operation range of storage battery

别代表安全充电上限、充电高限、放电低限和安全放电下限。

根据储能电池 SOC 的运行区间控制目标,制定具体的控制策略:

1) 当 $SOC_{low} < SOC < SOC_{max}$ 时,系统的发电出力等于系统负荷加上电池的充电功率。即

$$P_{source_gen_set}(t) = P_{sys_load}(t) + P_{charge_max}(t) \times \xi(t) \quad (1)$$

式中: $P_{source_gen_set}(t)$ 为系统的光伏和风机的发电总出力,正常情况下主要以光伏发电为主; $P_{sys_load}(t)$ 为微电网的总负荷,主要是用户负荷; $P_{charge_max}(t)$ 为储能电池当前时刻最大允许充电功率,在实际计算中采用在线运行的电池数量乘以单体最大允许充电功率; $\xi(t)$ 为充电功率递减因子,随着 SOC 的升高而减小。 $\xi(t)$ 大小的确定是本控制策略的一个关键,它间接地控制了储能充电功率的大小,其要保证在每天日落前将储能电池充电到目标值,并且充电过程要均衡。因此,在确定 $\xi(t)$ 时,需要考虑剩余的可利用充电时间,同时要考虑一天中光照强度的变化。

在晴天光照条件良好的情况下,依靠光伏的出力和储能蓄电完全能满足系统常规负荷的需求。但是,为了提高运行的经济性和储能电池的寿命,在风力条件良好的情况下,允许风机并网运行。具体控制策略如下。

a) 9:00—20:00 光照条件良好,在满足 SOC 和频率控制的前提下,按照计划值对储能电池进行有计划的充电,同时考虑电池的充电约束,保证电池在晚上 20:00 时能达到 SOC 设定值(如 75%); 19:00 一次日 10:00,风机待机运行,并根据夜间负荷和 SOC 运行值,来设定风机的运行功率。

b) 上午光照条件较差,光伏发电功率较弱。光伏和风机同时运行在最大发电功率模式,白天根据 SOC 的充电情况和天气的变化来切换运行模式。

c) 阴天、雨雪天,光伏发电功率很小。下发风机有功出力为最大功率,充分利用风力发电,对电池进行充电;要监视 SOC 状态以免出现 SOC 过低情况。

$\xi(t)$ 的确定可以借鉴下垂控制反比例调节的思想,随着 SOC 的升高, $\xi(t)$ 逐渐减小。从而实现按照类下垂特性的实时调度策略。充电功率递减因子 $\xi(t)$ 可以利用一个简单的公式来设定,例如:

$$\xi(t) = k_B - kSOC \quad (2)$$

式中: k_B 为一次比例函数的截距; k 为反比例系数,一般设置为 1.0 即可。除此,在慢充电过程,可以叠加可充电时间作为调节变量。

在工程应用中可以采用基于专家规则的查表法,根据不同的时间点、光伏理论发电功率、负荷功率的大小来设定 $\xi(t)$ 的数值。同时,为了防止功率的频繁调节,要增加一个控制门槛值。

2) 当 $SOC \geq SOC_{max}$ 时,采用限功率方法,对光伏的功率进行限制,以防止电池充爆。

2.2 取暖季的控制策略

取暖季一般在 10 月中旬到次年 4 月中旬,蓄热锅炉需要的负荷较大,即使在白天完成了蓄热,晚上供热系统正常运转也需要较大的负荷。因此,在取暖季要最大程度地利用光伏和风电,白天保证储能电池充电和蓄热锅炉蓄热,晚上充分利用风电资源,支撑整个系统的稳定运行。

在取暖季中,主要的负荷可以分为常规供电负荷、供暖系统运行负荷、系统自用负荷、电池充电负荷、电锅炉蓄热负荷 5 种,前 3 种负荷的占比较小,但是这部分负荷是必须要保证的,无疑增加了控制策略的复杂程度。具体的控制策略可以按照时间段来分析:

1) 11:00—19:00 为有效光照时间,光伏和风电都运行在最大功率模式,实时计算电池的最大允许充电功率 $P_{charge_max}(t)$ 和蓄热锅炉的最大允许蓄热功率 $P_{boiler_max}(t)$ 。

(1) 在电池充电功率小于 $P_{boiler_max}(t)$ 的 80% 时,并且 SOC 小于 50% 时,优先给电池充电;

(2) 当充电功率大于 $P_{boiler_max}(t)$ 的 80%,或 SOC 大于 50% 时,缓慢增加蓄热锅炉的功率值,并保证电池在慢充状态;

(3) 当电池 SOC 接近限值死区范围内时,为防止限功率指令的下发,要提前加大锅炉蓄热功率,根据电源的“源-荷”平衡关系,最大程度满足锅炉蓄热的要求;

(4) 当电池和蓄热锅炉都达到限值时,AGC 根据实时运行的情况进行控制,控制对象为锅炉负荷指令、光伏出力、风机出力,要协调好三者个关系,保证系统安全的情况下,不浪费发电功率。

2) 19:00—次日 11:00,该时段电源主要来自于风机,风机装机是 6 MW,在这个时段主要的负荷是常规负荷、电锅炉的供热系统负荷、蓄热的补充。

(1) 风机发电功率大于所有负荷、SOC 已经接近限值并且锅炉蓄热过程已经完成,下发风机的限功率指令;

(2) 风机发电功率大于所有负荷, SOC 有充电空间,蓄热锅炉可以继续蓄热,优先电池充电;

(3) 风机发电功率小于所有负荷,保证锅炉的供

热系统负荷, 限制蓄热负荷, 通过电池放电来满足负荷平衡;

(4) 当电源严重不足时启动事故预案, 保证系统的稳定运行, 考虑启动柴油发电机, 补充电源功率。

综上分析, 根据非取暖季的功率控制公式, 可以得到取暖季的控制策略:

1) 蓄热锅炉计划模式: 蓄热锅炉的负荷运行在计划值的模式, 根据当天的天气情况设定好每个时段的运行负荷 P_{boiler} , 那么电源的出力为

$$P_{source_Gen_Set}(t) = P_{sys_Load}(t) + \{P_{boiler}(t+1) - P_{boiler}(t)\} + P_{Charge_Max}(t) \times \xi(t) \quad (3)$$

式中: $P_{boiler}(t+1)$ 为蓄热锅炉下一时间点的负荷功率计划值, 可以采用电锅炉负荷功率预测结果; $P_{boiler}(t)$ 为蓄热锅炉当前时刻的实际负荷。在蓄热锅炉控制器中可以利用模型预测控制的方法^[23-24], 提高负荷指令跟踪的准确性和快速性。

通过式(3)使得取暖季和非取暖季的控制策略保持一致, 只是在负荷端增加了蓄热锅炉的计划值。其中蓄热锅炉控制器会上送各段锅炉系统最大负荷上限值 P_{boiler_max} 和最小负荷下限值 P_{boiler_min} , 在各个时刻都要满足

$$P_{boiler_min} < P_{boiler} < P_{boiler_max}$$

式中: P_{boiler_min} 的功率是一定要保证的, 即使电池放电也要满足最小的负荷要求; P_{boiler_max} 要根据电源出力和锅炉的运行状态来确定。同时, 在制定蓄热锅炉计划值时要考虑各台蓄热锅炉的实际数据。

2) 蓄热锅炉实时控制模式: 将蓄热锅炉作为控制对象, 控制的目标是储能电池在天黑前运行在高百分比, 保证夜间的持续供电和供热需求。

从图5可以看出, 在安全快速充电区间中, 增加了 SOC_{save} 的限值, SOC 在小于该限值时, 要有限保证储能电池的充电功率。具体控制策略如下。

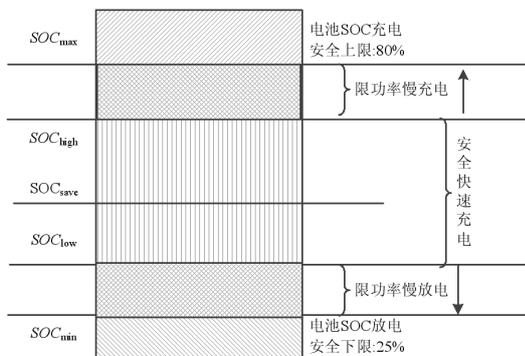


图5 取暖季储能的运行区间划分

Fig. 5 Operation range of storage battery in heating season

(1) 白天在满足电蓄热锅炉及供热基本负荷要求的前提下, 优先给电池充电, 充电功率参照非取暖季的充电要求, 各个SOC阶段的充电快慢, 可以通过调整充电功率递减因子来进行设定; 在快速充电过程中, 如果发电出力有剩余, 提高电锅炉的负荷, 由锅炉控制器对锅炉蓄热进行功率控制; 光伏和风电尽量运行在最大出力状态, 在电池和蓄热锅炉无法消纳发电时实行限功率运行。

(2) 晚上风电出力根据风速设定合理上限值, 减少电网的波动, 要考虑电池的调节能力。当风机发电出力过多时, 如果SOC运行在 SOC_{high} 以下时, 可以对电池进行充电, 充电功率根据设定进行; 如果SOC运行在 SOC_{high} 以上时, 增加蓄热锅炉负荷指令大小, 进行加热, 实现“源-荷”的平衡; 当风机发电出力不足时, 需要通过电池的放电来满足供电和供热的需求, 此时锅炉的负荷指令不能低于蓄热锅炉的最小供电要求, 保证供暖管道的安全。

3 工程应用实践

在工程实际应用中, 由于受外在因素影响, 多时间尺度的优化调度策略无法满足现场实时稳态控制的要求。因此采用了基于储能SOC的多应用场景的专家规则的方法, 来完成现场的功率控制, 从现场应用情况来看, 很好地解决了离网型微电网的稳态功率控制问题。

3.1 控制网络设计

在微网能量管理系统的基础上进行了稳态功率控制的控制网络设计。从图6可以看出: 最上层采用微网能量管理系统完成日前优化调度、日内滚动优化、实时优化控制和能量管理与统计分析; 中间

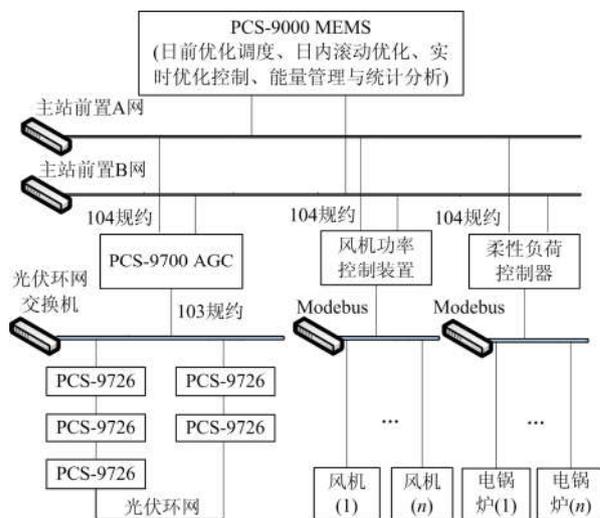


图6 控制网络图

Fig. 6 Control network diagram

层设计了 AGC 功率分配系统、风机功率控制装置、柔性负荷控制器，实现对光伏、风机和电蓄热锅炉的功率分配；最下层是光伏逆变器、风机的调速器以及蓄热锅炉的就地控制设备。整个设计采用了分层、分区间，各自组网的方式，对上通信统一采用 104 规约，保证了控制命令的快速性和安全性。

3.2 控制效果分析

从图 7 可以看出在非取暖季，控制策略相对简单，只要保证储能 SOC 进行有计划的充放电，即在白天光照良好时，充电到设定的安全区间，保证夜间的供电需求。

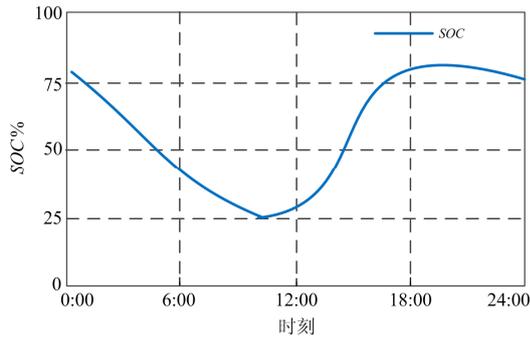


图 7 SOC 的变化曲线

Fig. 7 Change curve of SOC

在取暖季，要根据储能 SOC 的状态、蓄热锅炉的蓄热情况以及用户负荷预测结果来制定光伏的发电功率和蓄热锅炉的负荷指令，以协调好充电和蓄热的关系。从图 8 可以看出光伏发电功率、蓄热锅炉负荷功率和储能充电功率的控制曲线。在夜间，蓄热锅炉辅助设备运行需要 2 MW 左右的负荷，在没有光伏的情况下需要电池来供电，保证持续的供暖；在白天，通过能量管理系统的功率控制，利用蓄热锅炉的可调节特点，先启动储能电池进行快速充电，然后加大蓄热锅炉负荷指令，进行有序地蓄热，充分利用光伏的有效发电时间，协调好充电和蓄热的关系，保证了夜间的供热和供电需求。

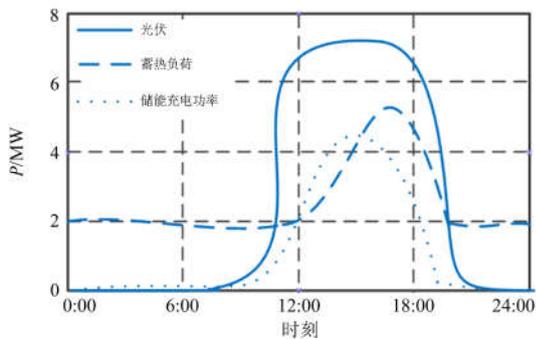


图 8 功率控制曲线

Fig. 8 Curve of power control

4 结论

本文以具体的离网型微电网为研究对象，以能量管理系统为载体，根据稳态功率控制的实际需求，充分考虑天气、负荷、设备状态等影响因素，强化实时控制在微网能量管理系统中的作用，提出了基于专家规则的实时功率控制方法，并成功应用到实际工程中，很好地解决了“高海边无”地区无法准确获取光伏功率预测的能量管理问题。文中引入了充电功率递减因子，很好地解决了专家策略和实际控制功率输出的关系，更加易于工程实现。该控制策略通过能量管理系统来自动进行制定和执行，实现了光伏、风电、蓄热锅炉的功率自动控制，提高了离网型微电网稳态“源-荷”平衡控制的准确性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] YAN B, LUH P B, WARNER G, et al. Operation and design optimization of microgrids with renewable[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2017, 14(2): 573-585.
- [3] 王波, 张保会, 郝治国. 基于功率监测和频率变化率的孤岛微电网紧急切负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 39(8): 33-37.
WANG Bo, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Emergency load shedding control for islanded microgrid based on power monitoring and rate of frequency change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 39(8): 33-37.
- [4] 沈军, 刘连凯, 郝飞, 等. 孤立电网的稳态控制问题分析[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(5): 39-43.
SHEN Jun, LIU Liankai, HAO Fei, et al. Analysis on steady-state control problem for isolated power grid[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017, 38(5): 39-43.
- [5] 喻磊, 雷金勇, 田兵, 等. 含多类型电源的离网型微电网经济运行策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 80-86.
YU Lei, LEI Jinyong, TIAN Bing, et al. Economic operation strategy for off-grid microgrid with multiple types of power sources[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 80-86.
- [6] MOREIRA C L, LOPES J A P, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [7] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管

- 理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
- CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 83-91.
- [8] 张海涛, 秦文萍, 韩肖清, 等. 多时间尺度微电网能量管理优化调度方案[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1533-1540.
- ZHANG Haitao, QIN Wenping, HAN Xiaoping, et al. Multi-time scale optimization scheduling scheme of microgrid energy management[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1533-1540.
- [9] 窦晓波, 徐恣慧, 董建达, 等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 48-55.
- DOU Xiaobo, XU Minhui, DONG Jianda, et al. Multi-time scale based improved energy management model for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 48-55.
- [10] XU G, SHANG C, FAN S, et al. A hierarchical energy scheduling framework of microgrids with hybrid energy storage systems[J]. IEEE Access, 2017, 6: 2472-2483.
- [11] BAO Z, ZHOU Q. A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution—part I: model and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5): 2257-2266.
- [12] MASHAYEKH S, STADLER M, CARDOSO G, et al. A mixed integer linear programming approach for optimal DER portfolio, sizing, and placement in multi-energy microgrids[J]. Applied Energy, 2017, 187: 154-168.
- [13] 彭春华, 谢鹏, 詹骥文, 等. 基于改进细菌觅食算法的微电网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2392-2398.
- PENG Chunhua, XIE Peng, ZHAN Jiwen, et al. Robust economic dispatch of microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2392-2398.
- [14] ALAVI S A, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 95: 314-325.
- [15] ALHARBI W, RAAHEMIFAR K. Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 128: 1-10.
- [16] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [17] FIRUZI M F, ROOSTA A, GITIZADEH M. Stability analysis and decentralized control of inverter-based AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 65-86. DOI: 10.1186/s41601-019-0120-x.
- [18] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82.
- SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.
- [19] 张倩, 丁津津, 刘童, 等. 基于满意度原理的光柴储微电网系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 88-95.
- ZHANG Qian, DING Jinjin, LIU Tong, et al. Optimal operation of PV-diesel-battery microgrid based on satisfying degree[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 88-95.
- [20] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫. 微电网离网运行缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.
- YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin. A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.
- [21] DRAGIČEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [22] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporation temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [23] 窦晓波, 晓宇, 袁晓冬, 等. 基于改进模型预测控制的微电网能量管理策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 56-65.
- DOU Xiaobo, XIAO Yu, YUAN Xiaodong, et al. Energy management strategy based on improved model predictive control for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 56-65.
- [24] WANG T, O' NEILL D, KAMATH H. Dynamic control and optimization of distributed energy resources in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2884-2889.

收稿日期: 2020-05-23; 修回日期: 2020-08-26

作者简介:

郝飞(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为综合能源系统优化分析; E-mail: haof@nrec.com

袁贞(1983—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为交通能源系统优化分析; E-mail: yuanz@jsti.com

袁志彬(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网调度控制及运行管理。E-mail: syyuanzhb@jl.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)