

并网型风光储微电网容量改进优化配置方法

窦晓波¹,袁 简¹,吴在军¹,倪益民²,樊 陈²,晓 宇¹

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 中国电力科学研究院电力自动化研究所,北京 100192)

摘要:合理配置风机、光伏、储能等微电源的容量是保证微电网经济、可靠运行的前提。针对并网型微电网容量的配置,借鉴现有分布式光伏运营方式,提出2种并网型微电网的商业运营模式;为充分利用配电网资源和提高微电网孤岛能力,设计了一种综合能量调度策略;对综合考虑微电网经济性、可靠性和可再生能源利用率的风光储容量配置模型的目标函数,提出了结合上述运营模式和调度策略的计算方法;从工程应用角度详述了计算满足电力系统运行规范、微电网友好接入条件的联络线功率限值的方法,作为风光储容量配置模型的约束条件;针对容量配置模型的求解,提出了基于限定搜索范围、增加随机个体等措施的改进遗传算法;利用江苏某岛的风光资源数据进行了仿真分析,验证了所提出的风光储容量配置方法的有效性和优越性。

关键词:微电网;风光储系统;能量调度策略;遗传算法;容量配置;优化;风电;光伏;储能

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.005

0 引言

风速和光照强度的随机性导致风力发电和光伏电池的输出功率不稳定,在一定程度上降低了电网对风力发电和光伏发电的容纳能力。微电网作为解决分布式清洁能源大规模应用的有效形式已被各国学者所关注。由于风力发电和光伏发电输出功率的随机性,要保证微电网运行的安全可靠,配置储能系统是必不可少的。因此,合理利用自然资源,协调配置储能和微电源的容量以满足负荷需求,成为了微电网规划设计领域中的核心课题。

根据微电网的运行状态,可以将其分为独立运行的微电网和并网运行的微电网。文献[1-7]介绍了独立运行微电网的容量优化配置方法。其中文献[1-4]以微电网经济成本最小为优化目标,考虑容量、可靠性以及蓄电池运行工况等约束条件,选择不同的优化算法来确定各微电源的最优容量,均为单目标优化计算方法。文献[5-8]采用多目标优化计算方法,其中文献[5]以微电网经济成本、供电可靠性、燃料消耗量等为主要优化目标,采用二元对比定权法确定不同指标的权重后转换为单目标问题来求解最优容量;文献[6-7]则以经济性、可靠性和环境效益等为主要目标,通过多目标进化算法来获取其 Pareto 最优解集。对于并网运行的微电网,文献[9-10]的优

化方法与独立微电网相似,以计及购电成本的系统总成本为目标,计算考虑可靠性等约束条件的最优容量配置。文献[11-12]介绍了微电网在独立运行和并网运行情况下的容量优化方法,其中文献[11]以孤岛运行微电网的优化配置容量为基础,采用分时优化策略对其并网运行时的储能进行修正;文献[12]分2步来确定微电网的最优容量,首先以经济最优为目标来确定各微电源的容量,然后根据储能系统的运行模式来进一步确定储能的优化容量。

随着微电源成本的下降以及微电网运行控制等技术的日趋成熟,并网型微电网将逐步在城市和农村中推广。在微电网运行过程中,上述文献优先利用微电网内部资源来达到供求平衡。但以目前的成本来看,使用储能系统中单位能量的成本高于电网电价,因此,在联络线交换功率未超标的情况下,采用该策略的经济性不足。另一方面,相对于独立运行的微电网,并网型微电网在容量优化过程中需考虑微电网的接入对配电网的影响,上述文献在考虑其接入条件时,一般采用联络线交换功率上下限来约束,但该限值的确定方法却少有提及。

基于此,本文提出了考虑微电网运营模式并充分利用配电网资源的容量优化配置新方法,首先详细阐述了影响容量配置目标函数运算的商业运营模式和能量调度策略,结合以上2点提出了考虑微电网系统投资收益、可靠性和可再生能源利用率的目标函数及其计算方法;其次提出了包含蓄电池运行、微电源容量约束和微电网友好接入等运行约束的容量配置约束条件模型;综合上述目标函数及约束条件,建立了风光储容量优化配置模型,采用改进的遗传算法进行了优化计算;最后以江苏某岛屿的风光资源统计数据为系统输入,实现了该配置方法的实

收稿日期:2015-01-06;修回日期:2015-12-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2014AA052002);国家自然科学基金资助项目(51307023);江苏省基础研究计划项目(BK20130624);国家电网公司总部科技项目(SGTYHT/14-JS-188)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA-052002),the National Natural Science Foundation of China(51307023),the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20130624) and the Science and Technology Research Program of SGCC(SGTYHT/14-JS-188)

际应用并对优化结果进行了分析。

1 目标函数模型

1.1 微电网的商业运营模式

微电网项目结算方式的不同直接关系到运营商的收益,因此,在容量优化配置之前,首先需确定微电网的运营模式。目前关于微电网项目商业运营模式的标准或政策文件基本处于空白,但分布式光伏的运营模式已较为成熟,欧洲各国主要采用上网电价、净电量结算和自消费 3 种方式对光伏发电项目进行结算,我国提出的 3 种模式(统购统销;自发自用;自发自用、余量上网)与欧洲的运营模式基本一致。借鉴分布式光伏的运营模式,微电网也可采用以下 2 种方式进行运营。

a. 统购统销:微电网发出的电能由电力公司统一全部收购,用户用电则由电力公司统一销售。微电网中不同的清洁能源收购价格不同,但均高于售电价,超出部分由国家补偿。该方式对能量调度策略依赖性小,不同微电源的上网电价可执行现有的分布式光伏和风电并网标准,但因要对每个微电源出口和负荷进行准确计量,且采用不同的标准进行结算,该运营方式增加了电力公司管理成本。

b. 自发自用、余量上网:微电网发出的电能首先满足自身用电需求,若不能满足,则按正常电价从配电网购电;若有结余,则统一按照协议电价上网。这种方式下,电力公司仅需将计量点设在公共耦合点(PCC)处,管理方便,且电力公司可根据微电网地理位置及发电形式的不同,与微电网运营商协商,合理确定购电和售电的价格。而该方式下的微电源容量配置依赖于能量调度策略。

1.2 综合能量调度策略

微电网容量优化配置实质上是利用合适的算法从不同的容量组合中选择使目标函数达到最佳状态的组合方式。各微电源的出力大小决定了容量组合方式,而微电源各时刻的出力大小由能量调度策略决定。传统的调度策略(以下简称传统策略)大多将配电网作为微电网的备用电源来处理,即负荷与微电源间的不平衡功率优先由储能系统来平抑,超出部分则通过向配电网购电或售电来维持平衡^[13],这显然未能较好地利用配电网资源,且目前储能系统成本普遍较高,因此,传统策略的经济性明显偏低。

基于此,本文提出一种微电网综合能量调度策略,旨在满足微电网基本功率平衡的基础上,尽量减少对高成本储能系统的调度,以提高微电网经济性。

本文将全年分为若干个时段(时间间隔为 Δt),并假设在 Δt 时段内风机、光伏的出力以及负荷需求恒定。则 t 时刻微电网功率的不平衡量 $\Delta P(t)$ 为:

$$\Delta P(t) = P_w(t) + P_{pv}(t) - P_L(t) = P_{bat}(t) + P_g(t) \quad (1)$$

其中, $P_w(t)$ 、 $P_{pv}(t)$ 分别为 t 时刻风机、光伏电池的输出功率; $P_L(t)$ 为负荷功率; $P_{bat}(t)$ 为蓄电池功率(吸收为负,输出为正); $P_g(t)$ 为联络线功率(向配电网输送功率为正)。

具体的能量调度策略分 2 步完成,首先判断蓄电池系统的荷电状态(SOC),确定是否采用预设优先充电 SOC 值策略,若不是,则计算边际成本,确定调度次序,采用负荷跟踪策略计算各电源出力。

(1) 负荷跟踪策略:微电网首要目标是满足负荷需求。当微电网供小于求时,需调度联络线或储能系统功率来满足基本负荷需求。为保证微电网运行的经济性,通过比较使用储能系统和从配电网购电的边际成本大小来确定电源的调度顺序。边际成本的计算方法如下:

$$C_{BM} = C_{rep} / E_{lifetime} \quad (2)$$

$$C_{GM} = p(t) \quad (3)$$

其中, C_{BM} 为使用储能系统的边际成本; C_{rep} 为设备的替换费用现值; $E_{lifetime}$ 为储能系统使用寿命; C_{GM} 为从配电网购电的边际成本; $p(t)$ 为 t 时刻电网的电价。

(2) 预设优先充电 SOC 值策略:当储能系统的 SOC 低于某一设定值时,在满足负荷需求和联络线交换功率不超标的情况下,尽可能给储能充电。当 $\Delta P(t) > 0$ 时,若充电功率不足,从配电网购电来保证储能系统的充电功率;当 $\Delta P(t) < 0$ 时,则尽可能少利用储能中的容量,当功率不平衡量较小时,还可利用配电网资源来给储能系统充电。该策略能延长储能使用寿命,同时也可增强微电网的孤岛能力。

1.3 目标函数建模及计算

本文充分考虑微电网经济性、供电可靠性和可再生能源利用效率,设立了微电网总投资收益、全年失负荷率和可再生能源利用率 3 个微电网评价指标,通过惩罚系数合并为一个目标函数,并给出了结合综合能量调度策略的计算方法。

1.3.1 微电网总投资收益

微电网总投资收益由各微电源全寿命周期成本和微电网运营收入 2 部分组成。

(1) 微电源全寿命周期成本现值。

各微电源的全寿命周期成本包括初期投资、运行维护以及替换成本,其等年值 C_{comp} 可表示为:

$$C_{comp} = C_{ins} + C_{rep} + C_{o\&m} \quad (4)$$

其中, C_{comp} 为微电源总成本; C_{ins} 为初始投资费用; C_{rep} 为设备的替换费用; $C_{o\&m}$ 为设备的运行维护费用;以上各成本均为现值。

(2) 微电网运营收入等年值。

a. 统购统销模式。

当微电网采用统购统销模式进行运营时,其收入主要由微电源发电收入和储能系统低充高放的经

济效益构成,微电网的运营收入 I 为:

$$I = \sum_{t=1}^T [p_w P_w(t) + p_{pv} P_{pv}(t) - p(t) P_{bat}(t)] \Delta t \quad (5)$$

其中, p_{pw} 为光伏发电的标杆电价, 元/(kW·h); p_w 为风力发电的标杆电价, 元/(kW·h)。显然, 只有采用峰谷电价时, 储能充放电才会产生经济效益。

b. 自发自用、余量上网模式。

当微电网采用自发自用、余量上网模式进行运营时,其收入主要包括与电力公司进行电力交易而产生的收益 I_{grid} ,如下所示:

$$I_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T [\alpha \times P_g(t) \Delta t] \quad (6)$$

其中, α 为协议电价, 其取值与微电网和配电网交换功率的流向有关, $P_g(t) > 0$ 时 α 为微电网向配电网售电价格, $P_g(t) < 0$ 时 α 为购电价格, 通常取 $p(t)$ 。

此外,采用自发自用、余量上网运行模式时,只对联络线的输送功率进行计量,微电网内部负荷的用电费用被节省了,而其中绝大部分负荷需求并不是由于建设微电网而产生的,因此,采用该模式运营时,被节省的费用应计入微电网的运营收入中。该部分收入可按照电网正常电价进行核算:

$$I_{\text{pl}}=p(t)P_{\text{L}}(t) \quad (7)$$

其中, I_{pl} 为微电网内部负荷用电费用。

此时,微电网的运营收入为两部分之和,即:

$$I = I_{\text{grid}} + I_{\text{pl}} \quad (8)$$

(3) 微电网投资总收益。

微电网投资总收益的现值^[14]为:

$$C_{\text{total}} = \left(I - \sum_{i=1}^K N_{\text{comp}j} \times C_{\text{comp}j} \right) / F(i, R_{\text{proj}}) \quad (9)$$

其中, N_{compj} 为第 j 种微电源的容量; C_{compj} 为单个微电源(第 j 种)全寿命周期成本现值; $F(i, R_{\text{proj}})$ 为资金回收系数, R_{proj} 为工程寿命。

1.3.2 全年失负荷率

本文在考虑微电网的供电可靠性时,采用系统全年失负荷概率来表征。当风光资源较差、微电网供电能力不足时,为保证供电质量,可以切除部分负荷来维持系统稳定运行,令此时切除的负荷功率为 $P_{\text{S}}(t)$,则微电网系统全年失负荷概率为:

$$P_r = \sum_{t=1}^T (P_{LS}(t) \Delta t) / \sum_{t=1}^T (P_L(t) \Delta t) \quad (10)$$

1.3.3 可再生能源利用率

当风光资源较好时,微电网供大于求,为防止微电网上送功率过大而导致部分运行约束超标等问题,可减少光伏或风机的出力来满足微电网运行要求,令该功率为 $P_{\text{waste}}(t)$,则微电网系统全年可再生能源利用率为:

$$r_{\text{uti}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (P_{\text{waste}}(t) \Delta t)}{\sum_{t=1}^T [(P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{w}}(t)) \Delta t]} \quad (11)$$

本文以微电网总投资收益最大为目标,根据用户要求和配电网相关规程设定全年失负荷率的上限和可再生能源利用率的下限,并通过惩罚系数引入目标函数。

综上,考虑综合能量调度策略的目标函数计算流程图如图 1 所示。

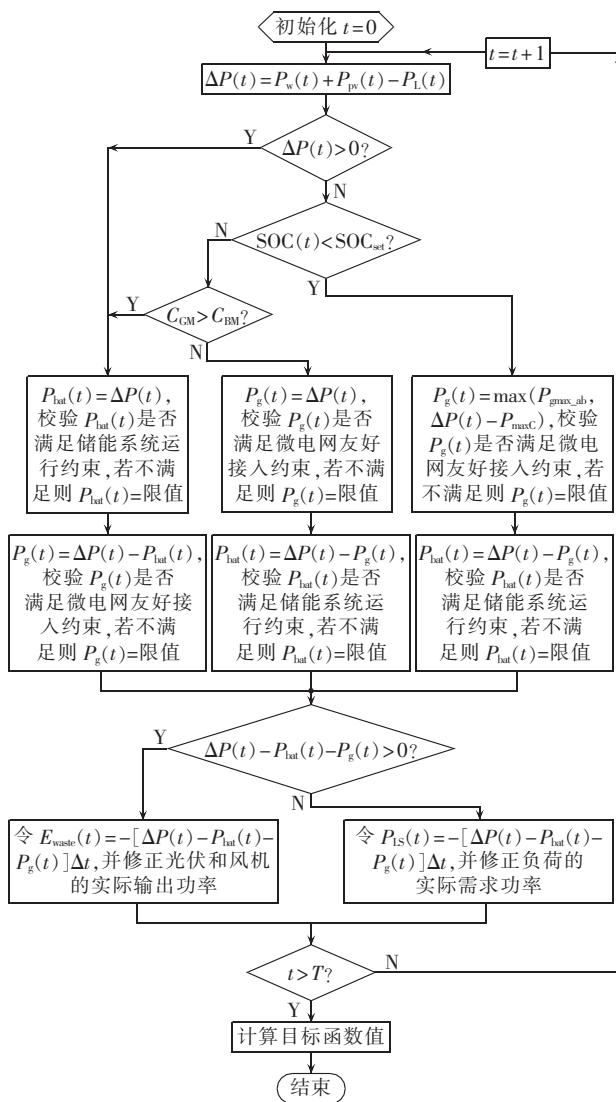


图 1 目标函数计算流程图

Fig.1 Flowchart of objective function calculation

2 约束条件模型

2.1 优化变量约束

容量配置时,在单台风力发电机、单块光伏电池板和单块铅酸蓄电池的参数已知情况下,选择光伏电池板阵列个数 N_{pv} 、风力发电机并入台数 N_{w} 和蓄电池安装个数 N_{bat} 作为优化变量。

考虑微电网规划设计过程中微电源的规划面积^[11],优化变量受到一定约束,即:

$$N_{\text{pv min}} \leq N_{\text{pv}} \leq N_{\text{pv max}} \quad (12)$$

$$N_{w \min} \leq N_w \leq N_{w \max} \quad (13)$$

$$N_{\text{bat_min}} \leq N_{\text{bat}} \leq N_{\text{bat_max}} \quad (14)$$

其中, $N_{\text{pv_max}}$ 、 $N_{\text{w_max}}$ 、 $N_{\text{bat_max}}$ 分别为光伏、风机、蓄电池根据实际场地确定的最大安装数量; $N_{\text{pv_min}}$ 、 $N_{\text{w_min}}$ 、 $N_{\text{bat_min}}$ 分别是其相应的最小安装数量,一般设置为 0。

2.2 蓄电池运行约束

微电网运行过程中,为确保蓄电池充放电的安全和使用寿命,其充放电过程中的 SOC 和充放电功率需满足如下关系式:

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (15)$$

$$P_{\max}(t) = \min \left\{ P_{\max C}, \frac{E_{\text{batN}} [\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}(t-1)]}{\Delta t \eta_c} \right\} \quad (16)$$

$$P_{\max d}(t) = \max \left\{ P_{\max D}, \frac{\eta_d E_{\text{batN}} [\text{SOC}(t-1) - \text{SOC}_{\min}]}{\Delta t} \right\} \quad (17)$$

其中, $\text{SOC}_{\min}$ 和 $\text{SOC}_{\max}$ 分别为蓄电池荷电状态的下限和上限; $P_{\max C}$ 和 $P_{\max D}$ 分别为蓄电池组额定的最大充电功率和放电功率; η_c 和 η_d 分别为蓄电池充电、放电效率; E_{batN} 为蓄电池组的额定容量。在优化过程中,蓄电池的 SOC 运行范围设置为 0.3~0.95,最大充放电电流为 $0.5C$ (C 为充放电倍率)。

2.3 微电网友好接入约束

高渗透率的间歇性能源发电必然会给配电网稳定运行和电能质量方面带来负面影响。目前的解决方案是在微电网入网前,其运营单位与当地电力公司达成供求协议,按指定的联络线交换功率曲线运营。但大部分微电网在规划设计阶段还未制定该曲线,因此,为保证微电网友好接入,本节提出用联络线极限输送功率、电压损耗、电压波动约束、分布式电源接入条件等确定联络线交换功率限值的方法。

(1) 联络线极限输送容量。

联络线极限输送容量由导线静稳极限功率、经济输送容量和热稳定下最大输送功率共同决定:

$$P_{\text{gmax_ab}} \leq P_g(t) \leq P_{\text{gmax_su}} \quad (18)$$

其中, $P_g(t)$ 为联络线输送功率 (以微电网输送功率为正); $P_{\text{gmax_ab}}$ 为微电网能够从配电网吸收的最大功率; $P_{\text{gmax_su}}$ 为微电网能够向配电网输送的最大功率。

(2) 联络线电压损耗约束。

联络线电压损耗 ΔU 可表示为 (忽略横分量):

$$\Delta U = \frac{P_g(t)l}{U_N^2} (R_L + X_L \tan \varphi) \times 100\% \quad (19)$$

其中, l 为联络线长度; U_N 为并网点额定电压; R_L 和 X_L 分别为单位长度导线的电阻和电抗; φ 为联络线负荷的功率因数角。为减少微电网对配电网的影响,一般要求将联络线功率因数限定在较高的水平运行,本文取 $\cos \varphi = 0.9$ 。

根据《电力系统电压和无功电力技术导则》的相关规定,配电线路的最大允许电压损失值为 5%,即:

$$\frac{P_g(t)l}{U_N^2} (R_L + X_L \tan \varphi) \times 100\% \leq 5\% \quad (20)$$

(3) 联络线电压波动约束^[15]。

对于三相对称系统,其电压波动 d 可表示为:

$$d = [R\Delta P_g(t) + X\Delta P_g(t) \cot \varphi] / U_N^2 \times 100\% \quad (21)$$

其中, $\Delta P_g(t)$ 为联络线有功波动; R 和 X 分别为配电网的等效电阻和电抗。根据电能质量的相关要求, 35 kV 以下电压等级的电力系统,公共连接 2 h 的电压波动应小于等于 4%,即:

$$[R\Delta P_g(t) + X\Delta P_g(t) \cot \varphi] / U_N^2 \times 100\% \leq 4\% \quad (22)$$

(4) 分布式电源接入条件。

本文将《分布式电源接入电网技术规定》中的相关要求转换为配电网对微电网接入的要求^[16]。

a. 分布式电源总容量原则上不宜超过上一级变压器供电区域内最大负荷的 25%。

本文将该约束转换为联络线最大上送功率不得超过上一级变压器额定容量的 25%,即:

$$P_g(t) \leq 25\% \times S_N \quad (23)$$

b. 分布式电源并网点短路电流与分布式电源额定电流之比不宜低于 10。

对于分布式电源接入方式, PCC 处的最大功率波动一般小于等于其额定容量,因此,若采用微电网接入方式,当联络线最大电流小于 PCC 处短路电流的 10%,可近似认为与微电网联络线功率等效的分布式电源额定容量小于 PCC 短路容量的 10%,即:

$$|P_g(t)| \leq 10\% \times S_{SC} \quad (24)$$

综上,微电网友好接入约束,即联络线功率限值约束由式(18)(20)(22)(23)(24)等条件共同决定。

3 微电网容量配置的数学模型

结合上述目标函数与约束条件模型,得到的并网型风光储微电网容量配置数学模型如下:

$$\max F = \sum_{i=0}^2 \lambda_i f_i + w$$

s.t. 优化变量约束式(12)(13)(14)

蓄电池运行约束式(15)(16)(17)

联络线功率限值约束式(18)(20)(22)(23)(24)

其中, λ_i 为权重系数; f_i 为 1.3 节中定义的 3 个评价指标; w 为惩罚项系数。此处不再对权重系数及惩罚项系数的选择进行专门讨论。

4 改进遗传算法

4.1 改进措施

微电网容量优化规划中需要考虑的因素会越来越多。具有强大全局搜索能力的遗传算法特别适合于解决这类大规模并行计算问题,但传统的遗传算法存在早熟收敛或收敛速度慢等问题,本文针对

微电网的特点,对遗传算法提出如下改进措施。

a. 改进优化变量编码解码形式^[17]:编码时,将各微电源的上、下限作为遗传算法的输入量,保证搜索范围始终在有效区域里,增强全局搜索能力。个体基因采用二进制编码,基因长度为:

$$L=\sum_{j=1}^NL_j=\sum_{j=1}^N\text{ceil}\left(\log_2\left(\frac{N_{j,\max}-N_{j,\min}}{\xi_j}+1\right)\right)\quad(25)$$

其中, L_j 、 ξ_j 分别为第 j 种微电源容量的片段长度和精度; $\text{ceil}(x)$ 函数返回大于或等于 x 的最小整数; $N_{j,\max}$ 、 $N_{j,\min}$ 分别为第 j 种微电源容量的上、下限。

相应地,解码时假设 G_j 为个体基因中表示第 j 种微电源容量的片断(列向量),引入系数 $C_M=[1\ 2\ 4\ 8\ \cdots\ 2L_j]$,则其容量 N_j 表示为:

$$N_j=N_{j,\min}+\frac{N_{j,\max}-N_{j,\min}}{2^{L_j}-1}\times C_M\cdot G_j\quad(26)$$

b. 建立优秀个体库:选取满足各项约束条件且适应度值最高的 M 个微电源组合构成优秀个体库,并从中选取父本进行交叉进化,利用优秀个体对种群的推动作用来加速算法的收敛速度。

c. 增加随机变量:迭代过程中加入一定比例的随机种群参与交叉变异,增加种群的多样性,从而有效地避免早熟收敛现象。

4.2 求解流程

结合以上改进措施,该算法具体求解流程如图 2 所示。初始化时设定种群规模 N_p 、进化代数 N_G 、交叉概率、变异概率、优秀个体库个体数 M ,以及各变量的上、下限和精度。图中 r 为随机个体的比例,可随着进化代数的增加而增加。

5 案例分析

5.1 工程概况

江苏某岛屿现由一条 10 kV 支线供电,但该供电线路事故率高、停电次数多且修复时间长,影响岛上居民正常供电。为解决此类问题,当地供电公司决定在岛上建设微电网示范工程,采用 1 回线路就近接入一会所台变(630 kV·A)低压侧母线,并网电压等级为 380 V,并规划在岛上荒地至少安装 2 台 100 kW 的风力发电机组。结合搜集的风光资源月均值,本文利用 HOMER 软件仿真获取风光资源及负荷的全年离散数值,并以此作为输入进行仿真分析。

5.2 仿真结果及分析

针对不同的运营模式和能量调度策略,运用改进的遗传算法求解得到最优配置结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,不论采用何种运营模式,仿真计算所得的容量优化配置方案,其投资收益均为负值,即在当前的市场条件下,在该岛建设微电网不盈

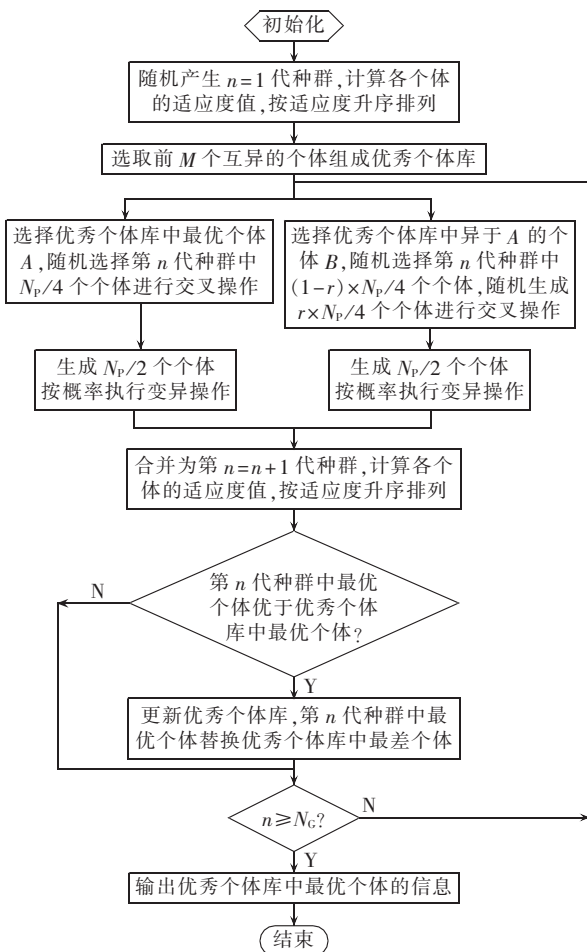


图 2 改进遗传算法求解流程图

Fig.2 Flowchart of improved genetic algorithm

表 1 不同策略及运营模式下最优配置方案比较表

Table 1 Comparison of optimal configuration scheme between different dispatch strategies and operating modes

能量 调度策略	投资 收益/万元	光伏容 量/kW	风机容 量/kW	蓄电池容 量/(kW·h)
传统策略	-356.8870	194.6	200	285
	-573.8578	163.7	200	313.3
综合 调度策略	-212.8070	214.8	200	65
	-385.3376	162.9	200	103.9

能量 调度策略	失负 荷率/%	可再生能源 利用率/%	蓄电池 寿命/a	运营模式
传统策略	0.7948	93.87	2.6	统购统销
	0.7992	95.45	2.1	自发自用
综合 调度策略	0.7957	88.37	2.9	统购统销
	0.7798	94.41	2.8	自发自用

利,这是由现阶段微电源和储能成本偏高和当地的风光资源不足造成的。但不难看出,采用综合能量调度策略后,投资微电网的经济效益有所改善,同时蓄电池寿命也有所提高。2 种策略下的失负荷率相差不大,均低于 0.8%,有效保证了供电可靠性。而由于增加了对配电网资源的利用,相较于传统策略,综合策略下可再生能源利用率有所下降。

此外,由于采用统购统销运营模式时风机和光

伏的上网电价分别为 0.61、1.25 元/(kW·h),高于自发自用模式时的 0.6 元/(kW·h),故统购统销运营模式时投资商的经济效益更好。另一方面,由于高上网电价的推动作用,采用统购统销模式时,最优配置组合中的微电源容量较大,而储能容量相对偏小。因此,统购统销运营模式更鼓励用户安装微电源,并向配电网输送功率。而在自发自用、余量上网模式下,由于高峰时的电价高于微电网上送电量的电价,微电源所发电量在用电高峰时自用的经济效益较上送配电网高,进而导致最优结果中微电源容量较统购统销模式时更小,而储能系统容量反而更大,主要用于低谷时存储能量。因此,自发自用、余量上网运营模式更鼓励用户所发电量自用,用户用电价格越高,其经济效益越明显。

为进一步验证综合调度策略的有效性,本文针对第一种容量配置方案(光伏 194.6 kW,风机 200 kW,储能 285 kW·h),对不同策略的运行情况进行了仿真,蓄电池组的全年 SOC 如图 3 所示。

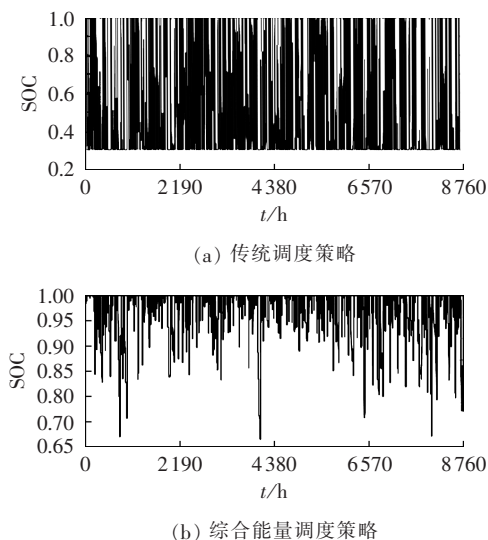


图 3 不同调度策略下蓄电池组的 SOC

Fig.3 SOC of batteries for different dispatch strategies

2 种策略下 SOC 最低值分别为 0.3(传统策略)和 0.67(综合调度策略),显然综合调度策略下放电深度大幅减小,可以有效延长电池寿命;且综合策略下,蓄电池组在运行过程中保持着较高的 SOC 水平,具备更强的转孤岛运行的能力,在对微电网孤岛能力要求不高的情况下,储能配置容量则可降低很多。这样的配置方案在离网情况下,能够维持微电网稳定运行一定的时间,等待恢复供电。

6 结论

a. 本文归纳了微电网的 2 种运营模式,并通过仿真结果分析了 2 种运营模式对容量优化配置结果

的不同引导作用,电力公司可根据其特点,结合微电网安装地电网结构和负荷特点等现状,灵活地设置微电网的运营模式,运用其杠杆作用来引导投资商,建设与配电网更加契合的微电网。

b. 针对并网型的风光储微电网系统,本文从投资商的角度出发,提出了以微电网投资收益最大为主要目标的容量配置方法。该方法基于微电网的运营模式,采用了经济性优于传统策略的综合能量调度策略,实验仿真证明该策略还利于延长蓄电池寿命、增强微电网的孤岛能力。

c. 为充分利用配电网资源、保证微电网友好接入,结合配电网运行和分布式电源接入的相关规范,确立了通过联络线热稳定、电压损耗和波动限值及逆流等约束计算联络线功率限值的一般方法。该方法所用计算参数在规划设计阶段更易获取,考虑的因素更贴近实际工程,该方法也更利于工程应用。

d. 结合本文中的容量配置模型的特点,针对传统遗传算法的局限性,引入了限定搜索范围、建立优秀个体库和增加随机个体的措施,设计了一种改进的遗传算法,并对实际配置问题进行了求解,优化结果体现了改进算法的可行性和优越性。

参考文献:

- [1] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [2] 丁明,王波,赵波,等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术,2013,37(3):575-581.
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [3] EFTIEHIOS K, DIONISSIA K, ANTONIS P, et al. Methodology for optimal sizing of standalone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms[J]. Solar Energy, 2006, 80(9): 1072-1088.
- [4] 江全元,石庆均,李兴鹏,等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):19-26.
JIANG Quanyuan, SHI Qingjun, LI Xingpeng, et al. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 19-26.
- [5] 刘梦璇,王成山,郭力,等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):39-44.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 39-44.
- [6] DUFO-LÓPEZ R, JOSÉ L, AGUSTÍN B, et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-

- alone PV-wind-diesel systems with batteries storage[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4033-4041.
- [7] SAIF A, ELRAB K G, ZEINELDIN H H, et al. Multi-objective capacity planning of a PV-wind-diesel-battery hybrid power system[C]//2010 IEEE International Energy Conference. Manama, Bahrain: IEEE, 2010: 217-222.
- [8] 王晶, 陈江斌, 束洪春. 基于可靠性的微网容量最优配置[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 120-127.
- WANG Jing, CHEN Jiangbin, SHU Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 120-127.
- [9] CHEDID R, RAHMAN S. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 1(12): 79-85.
- [10] MENNITI D, PINNARELLI A, SORRENTINO N. A method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV/wind plants and storage systems[C]//The 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, Czech Republic: IEEE, 2009: 8-11.
- [11] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
- XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [12] 肖峻, 白临泉, 王成山, 等. 微网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 149-157.
- XIAO Jun, BAI Linqun, WANG Chengshan, et al. Method and software for planning and designing of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 149-157.
- [13] GILBERT M. 高效可再生分布式发电系统[M]. 王宾, 董新洲, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [14] 李登峰, 谢开贵, 胡博, 等. 基于净效益最大化的微电网电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 20-26.

- LI Dengfeng, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Optimal configuration of microgrid power supply based on maximizing net benefits[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 20-26.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量——电压波动和闪变: GB12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 国家电网公司. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW480—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [17] 赵小冰. 单目标_多目标遗传算法的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.
- ZHAO Xiaobing. Research of single objective and multi-objective genetic algorithm[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2011.

作者简介:



奚晓波

奚晓波(1979—),男,江苏南京人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网(E-mail: dxb_2001@sina.com);

袁 简(1991—),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要研究方向为微电网系统规划;

吴在军(1975—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微电网、电能质量分析与控制;

倪益民(1967—),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事变电站自动化方面的研究工作;

樊 陈(1982—),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事变电站自动化及 IEC61850 在智能变电站应用方面的研究工作;

晓 宇(1993—),女,安徽六安人,硕士研究生,主要从事微电网运行控制与能量优化方面的研究。

Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid

DOU Xiaobo¹, YUAN Jian¹, WU Zaijun¹, NI Yimin², FAN Chen², XIAO Yu¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Electric Power Automation Research Institute of China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The reasonable capacity configuration of wind turbine, PV (PhotoVoltaic) and energy storage in a microgrid is the prerequisite of its reliable and economical operation. For the grid-connected microgrid, two commercially operating modes are proposed according to the existing operating mode of distributed PV system. A comprehensive energy dispatch strategy is designed to fully use the resources of power distribution network and enhance the islanding ability of microgrid. For the objective function of a wind-PV-storage capacity configuration model comprehensively considering the economy, reliability and renewable energy usage rate of microgrid, a calculation method combining with the operating mode and dispatch strategy is proposed. For the engineering applications, a method for calculating the power limit of tie line to meet the operational specifications of power system and the friendly connection conditions of microgrid is elaborated, which is used as the constraint of the configuration model. An improved genetic algorithm based on the limited searching area and increased random individuals is presented to solve the configuration model. A simulative analysis is carried out based on the wind-PV resource data of an island in Jiangsu province to verify the effectiveness and superiority of the proposed PV-wind-storage capacity configuration method.

Key words: microgrid; PV-wind-storage system; energy dispatch strategy; genetic algorithms; capacity configuration; optimization; wind power; photovoltaic; energy storage