并网型微网的优化配置与评估

薛美东1,2,赵 波2,张雪松2,江全元1

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江省杭州市 310027; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院,浙江省杭州市 310014)

摘要:在考虑微网并网性能指标的情况下,通过微网配置和运行联合优化,提出一种并网型微网优 化配置方法,实现微网全寿命周期成本最小。首先,采用自平衡度、冗余度、可再生能源利用率等指 标作为约束条件参与配置优化,从不同角度评价微网并网性能;其次,针对风光资源的不确定性,采 用场景生成和场景缩减技术在多重随机场景下修正配置方案,以提高微网配置方案的鲁棒性;最 后,采用实际工程数据对微网配置进行优化,并对配置方案进行分析和评估。

关键词:微网(微电网);优化配置;全寿命周期成本;自平衡度;鲁棒性

0 引言

近年来,以可再生能源为代表的分布式电源得 到快速发展,并将成为未来电网的重要组成部分。 欧盟计划到 2020 年,可再生能源发电量占总发电量 的 20%^[1]。微网(又称微电网)作为分布式电源的 集成和管理方式,在海岛和偏远地区得到广泛应 用^[2-4]。随着微网技术的发展,并网型微网的研究越 来越受到重视,在可再生能源利用、负荷管理、电动 汽车管理、电能质量改善、系统可靠性提高等方面体 现出更大价值,弥补传统电网的不足。

但是,目前的优化配置研究中仍以独立型微网 为主,包括基于特定运行策略的配置优化[4-6]和基于 准稳态数学模型的多目标优化[7-15]。不同于独立型 微网,并网型微网优化配置具有以下特点:①部分分 布式电源的发电成本仍高于现有集中供电模式,需 要考虑微网全寿命周期成本,体现分布式电源在微 网运行中的作用;②微网作为自治系统,需要具备足 够的自发自用能力,限制微网运行中与外电网的交 换电量:③提高联络线(TL)的利用率和可再生能源 利用率,防止电网资产和可再生能源的浪费;④充分 考虑风光资源随机性对微网的影响,提高配置方案 的鲁棒性。文献「16-18]采用微网配置和运行联合 优化,仅考虑并网型微网经济性。文献「19-20]考虑 了并网情况下分布式电源对电网网损和电压的影 响,但只是分布式电源容量和位置优化,没有构成微 网。文献[21]考虑了购/售电费用和交换功率约束

收稿日期:2013-12-16;修回日期:2014-07-07。 国家自然科学基金资助项目(51207140)。 的多目标优化,但是也没有考虑风光出力的不确定 性。在微网运行优化^[22]中,采用场景生成构建不同 运行状况,通过大量数据场景仿真提高运行计划的 鲁棒性。

本文提出一种并网型微网优化配置方法,综合 考虑了微网的经济性、鲁棒性、自治能力以及 TL 和 微网设备利用率,通过实际数据进行仿真验证,并对 配置方案进行评估分析。

1 微网性能评价指标

经济性是微网优化配置的首要目标。除此之 外,本文根据并网型微网特点,定义了以下4个微网 性能评价指标。

1)全寿命周期成本

全寿命周期成本 C 为微网寿命周期内,安装成本 C₁、维护成本 C_M、运行成本 C₀ 和交易成本 C_T的总和。

$$C = C_{\rm I} + C_{\rm M} + C_{\rm O} + C_{\rm T} \tag{1}$$

2) 自平衡度

自平衡度 α 为微网设备的年负荷供电量占负荷 年用电量的比例。

$$\alpha = \frac{\sum_{t \in T} P_{1,t} - \sum_{t \in T} P_{\text{buy},t}}{\sum_{t \in T} P_{1,t}}$$
(2)

式中: $P_{1,t}$ 为负荷需求; $P_{buy,t}$ 为微网购电功率;T为时间的集合。

3) 冗余度

冗余度 β 为微网上网电量占微网设备总发电量 的比例。

$$\beta = \frac{\sum_{t \in T} P_{\text{sell},t}}{\sum_{t \in T} (P_{1,t} - P_{\text{buy},t} + P_{\text{sell},t})}$$
(3)

式中:P_{sell,t}为微网售电功率。

4)可再生能源利用率

可再生能源利用率 γ 为可再生能源实际发电 量占最大发电量的比例。

$$\gamma = \frac{\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in a_{WT}} P_{wi,t} + \sum_{i \in a_{PV}} P_{pi,t} \right)}{\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in a_{WT}} P_{wi,t_{Max}} + \sum_{i \in a_{PV}} P_{pi,t_{Max}} \right)} \qquad (4)$$

式中: $P_{pi,t}$, $P_{wi,t}$ 分别为光伏发电设备(PV)和风力 发电设备(WT)的功率; $P_{pi,tmax}$, $P_{wi,tmax}$ 分别为 PV 和 WT 的最大输出功率; Ω_{WT} 为 WT 的集合; Ω_{PV} 为 PV 的集合。

全寿命周期成本体现了微网综合经济效益,考 虑了微网一次性投资以及运行中产生的置换成本和 运行维护费用,考虑了微网设备成本以及与电网互 动中产生的交易成本和接入费用。并网型微网主要 特征就是与电网间的功率交互,但是微网应该具备 一定的自治能力。在电网故障或者计划孤网状态 下,微网能够依靠分布式电源独立运行,自平衡度体 现了微网自治能力。

为了充分利用可再生能源,微网需要向电网出 售过剩电量。然而目前还没有明确的微网运营模式 和电价机制,但是可以预见,在价格激励下微网会尽 可能地出售过剩电量,引起电网潮流反向与功率波 动。通过冗余度限制售电电量,合理配置可再生能 源,避免资源浪费。提高设备使用效率是微网优势 之一,尤其是提高可再生能源利用率,体现了微网的 节能和环保效益。

2 全寿命周期配置优化模型

微网配置优化模型以全寿命周期成本为目标函数,进行系统配置和运行联合优化;根据全年的风力 发电、光伏发电和负荷数据,获得分布式电源和储能 设备(ES)的安装容量以及全年运行状况。

2.1 优化目标

全寿命周期成本包括安装成本(见式(5)),维护 成本(见式(6)),运行成本(见式(7))和交易成本(见 式(8))。

$$C_{I} = \frac{C_{Iw} + C_{Ip} + C_{Id} + C_{Is} + C_{Ig}}{\tau} = \frac{1}{\tau} \Big(\sum_{i \in \mathcal{Q}_{WT}} n_{wi} \xi_{wi} P_{wi} + \sum_{i \in \mathcal{Q}_{PV}} n_{pi} \xi_{pi} P_{pi} + \sum_{i \in \mathcal{Q}_{DE}} n_{di} \xi_{di} P_{di} + \sum_{i \in \mathcal{Q}_{ES}} n_{si} (\xi_{sei} E_{si} + \xi_{spi} P_{si}) + \xi_{g} P_{g} \Big)$$
(5)

$$C_{\rm M} = m_{\rm w} C_{\rm Iw} + m_{\rm p} C_{\rm Ip} + m_{\rm d} C_{\rm Id} + m_{\rm s} C_{\rm Is} \quad (6)$$

$$C_{\rm O} = \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in a_{\rm WT}} c_{\rm wi} S_{\rm wi,t} + \sum_{i \in a_{\rm PV}} c_{\rm pi} S_{\rm pi,t} + \sum_{i \in a_{\rm ES}} c_{\rm si} U_{\rm si,t} + \sum_{i \in a_{\rm DE}} (c_{\rm di}"P_{\rm di,t}^{2} + c_{\rm di}'P_{\rm di,t} + c_{\rm di}'P_{\rm di,t}) \right] \quad (7)$$

$$C_{\mathrm{T}} = \sum_{t \in T} \left(c_{\mathrm{buy}} P_{\mathrm{buy},t} - c_{\mathrm{sell}} P_{\mathrm{sell},t} \right)$$
(8)

式中: Ω_{DE} 为柴油发电机(DE)的集合; Ω_{ES} 为 ES的 集合; C_{Id} , C_{Is} , C_{Ip} 和 C_{Iw} 分别为 DE, ES, PV 和 WT 的安装成本; n_{di} , n_{si} , n_{pi} 和 n_{wi} 分别为 DE, ES, PV 和 WT 的安装数量; ξ_{di} , ξ_{pi} 和 ξ_{wi} 分别为 DE, PV 和 WT 的安装成本系数; ξ_{sei} , ξ_{spi} 分别为 ES 的额定功 率和容量安装成本系数; ξ_{g} 为微网接入成本系数; P_{di} , P_{pi} 和 P_{wi} 分别为 DE, ES, PV 和 WT 额定 功率; P_{g} 为 TL 的额定功率; E_{si} 为 ES 安装容量;r为年金现值系数; m_{d} , m_{s} , m_{p} 和 m_{w} 分别为 DE, ES, PV 和 WT 的维护成本系数; c_{pi} , c_{wi} 分别为 PV 和 WT 的运行成本系数; c_{si} 为 ES 的运行(折旧)成 本系数; c_{di}'' , c_{di} '和 c_{di} 为 DE 的运行成本系数; c_{buy} , c_{sell} 分别为购电和售电价格; $S_{di,t}$, $S_{pi,t}$ 和 $S_{wi,t}$ 分别 为 DE, PV, WT 的启停状态; $U_{si,t}$ 为 ES 的充放电状 态; $P_{di,t}$ 为 DE 的输出功率。

结合实际情况,微网设备以基本单元形式表示 (如单台 30 kW 的 WT),从而优化设备数量;可以 进行设备选型(如 30 kW 的 WT 和 10 kW 的 WT 同时参与优化),根据经济性选择安装一种或多种同 类型设备。同时,TL 功率也作为优化变量,规划微 网最大交换功率和年交换电量,提高 TL 利用率。

全寿命周期成本采用等年值形式,其中维护成 本、运行成本和交易成本已经是对应的年费用,而安 装成本是一次性投资,通过年金现值系数τ转换为 等年值。

2.2 运行约束条件

系统运行约束包括功率平衡约束(如式(9)所示)、交换功率约束(如式(10)所示)和设备运行约束。设备运行约束中考虑技术较成熟、应用相对广泛的小型WT、小型PV、DE和蓄电池储能。

$$\sum_{i \in \mathfrak{A}_{\mathrm{ES}}} (P_{\mathrm{sdi},t} - P_{\mathrm{sci},t}) + \sum_{i \in \mathfrak{A}_{\mathrm{PV}}} P_{\mathrm{pi},t} + \sum_{i \in \mathfrak{A}_{\mathrm{WT}}} P_{\mathrm{wi},t} + \sum_{i \in \mathfrak{A}_{\mathrm{DE}}} P_{\mathrm{di},t} + (P_{\mathrm{buy},t} - P_{\mathrm{sell},t}) = P_{1,t} \qquad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{\mathrm{buy},t} \leqslant U_{\mathrm{g},t} P_{\mathrm{g}} \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{sell},t} \leqslant (1 - U_{\mathrm{g},t}) P_{\mathrm{g}} \end{cases} \qquad (10)$$

式中: $P_{sci,t}$, $P_{sdi,t}$ 分别为 ES 的充、放电功率; $U_{g,t}$ 为 微网购电/售电状态," $U_{g,t} = 1$ "代表微网处于购电

状态,"Ug,t=0"代表微网处于售电状态。

小型 WT 的功率调节能力差,通常以 WT 投切进行功率控制,如下式所示。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{w}i,t} = S_{\mathrm{w}i,t} P_{\mathrm{w}i,t\mathrm{max}} \\ 0 \leqslant S_{\mathrm{w}i,t} \leqslant n_{\mathrm{w}i} \end{cases}$$
(11)

小型 PV 的输出功率可调,但是受辐照度影响, 存在调节范围,如下式所示。

$$\begin{cases} S_{\text{p}i,t} P_{\text{p}i,\min} \leqslant P_{\text{p}i,t} \leqslant S_{\text{p}i,t} P_{\text{p}i,\max} \\ 0 \leqslant S_{\text{p}i,t} \leqslant n_{\text{p}i} \end{cases}$$
(12)

式中:Ppi,min为PV的最小输出功率。

DE 的输出功率可调,由于低功率下运行效率 较低,存在功率下限,如下式所示。

$$\begin{cases} S_{di,t} P_{di,\min} \leqslant P_{di,t} \leqslant S_{di,t} P_{di} \\ 0 \leqslant S_{di,t} \leqslant n_{di} \end{cases}$$
(13)

式中:Pdi,min为 DE 的最小输出功率。

蓄电池储能的充/放电功率满足功率限值,即逆 变器功率;而充放电状态决定蓄电池在同一时刻或 者充电或者放电,"U_{si,t}=1"代表蓄电池处于放电状 态,"U_{si,t}=0"代表蓄电池处于充电状态。同时考虑 蓄电池在充放电过程中的能量损耗以及能量状态限 制,如下式所示。

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{sdi,t} \leqslant U_{si,t} n_{si} P_{si} \\ 0 \leqslant P_{sci,t} \leqslant (1 - U_{si,t}) n_{si} P_{si} \\ E_{si,t} = E_{si,t-1} + \eta_{ci} P_{sci,t} \Delta T - \frac{P_{sdi,t} \Delta T}{\eta_{di}} \end{cases}$$
(14)

式中: $E_{si,t}$ 为 ES 的能量状态; η_{ci} , η_{di} 分别为 ES 的 充、放电效率; ΔT 为时间间隔; ϵ_1 , ϵ_h 为 ES 的能量 状态限值。

2.3 配置约束条件

配置约束包括自平衡度、冗余度、可再生能源利 用率和 TL 利用率(如式(15)所示)。

$$\begin{cases} \alpha \geqslant \alpha_{s} \\ \beta \leqslant \beta_{s} \\ \gamma \geqslant \gamma_{s} \\ \lambda \geqslant \lambda \end{cases}$$
(15)

式中: α_s , β_s , γ_s 和 λ_s 分别为自平衡度限值,冗余度 限值,可再生能源利用率限值和 TL 利用率限值。 λ 是 TL 利用率(如式(16)所示),由于微网自发自用 特性,TL 负载率很低。通过设置接入费用和 TL 利 用率约束,优化 TL 容量以提高 TL 的使用效率。

$$\lambda = \frac{\sum_{t \in T} (P_{\text{buy},t} + P_{\text{sell},t})}{T_{a}P_{g}}$$
(16)

式中:T。为时间周期即1年。

根据设计需求选择性能指标中的一个或者多个

参与优化;对应的设计限值可以根据实际需求进行 调整。从数学本质上,本文提出的微网配置优化模 型是混合整数线性规划问题,采用数学软件 CPLEX 求解。

3 微网配置方案的鲁棒性

由于风光资源具有随机性,根据单一历史数据 进行优化所得的微网配置方案,只适用这一历史数据,实际运行中可能出现系统功率不足。为了提高 微网鲁棒性,在历史数据的基础上模拟风光资源的 随机波动,获得大量数据场景并进行配置优化。

3.1 数据场景生成和场景缩减

采用拉丁超立方采样方法生成数据场景^[23],假 设风电历史数据场景(P_1 , P_2 ,..., P_{8760})代表全年 8760 h的风力发电功率数据,将累积概率分布函数 等分为 N 份,在等份 i 中取 8760 个随机数 r_{ij} ,得 到随机场景 i 为(P_{i1} , P_{i2} ,..., P_{i8760})(如式(17)和 式(18)所示)。拉丁超立方采样是多维分层随机抽 样技术,随机场景均匀分布在[0,1]的概率区间内, 能够更精确反映概率分布特性。

$$\Pr(\Delta P_{ij}) = \frac{1}{N} r_{ij} + \frac{i-1}{N}$$
(17)

 $P_{ij} = P_j + \Delta P_{ij} = P_i + F^{-1}(\Pr(\Delta P_{ij}))$ (18) 式中: Pr(•)为功率波动的累积概率分布函数; P_{ij} 为发电功率; ΔP_{ij} 为随机功率波动; F^{-1} ()为反函数。

由于模型中的随机变量包含风力发电和光伏发 电功率波动,任意两个风、光随机场景组合,生成 N² 个数据场景。N² 个数据场景构成数据场景集 合,利用同步回代削减技术,筛选特征明显和出现概 率较大的数据场景^[23],具体步骤如下。

步骤 1:计算任意场景间的差异度(如式(19)所示),寻找差异度最小的数据场景 *i* 和 *j*。

$$T_{ij} = p_j D_{ij} \tag{19}$$

式中: V_{ij} 为场景 i 和场景 j 的差异度; p_j 为场景 j 的出现概率; D_{ij} 为场景 i 和场景 j 的距离。

步骤 2:从数据场景集合中削减掉数据场景 *j*, 数据场景数量减 1。

步骤 3:数据场景 i 的出现概率增大 $p_i = p_i + p_i$,以保证数据场景整体的出现概率为 1。

步骤 4:重复步骤 1 至步骤 3,直至数据场景数 量削减至期望数量 *M*。

3.2 鲁棒性优化

基于缩减后的数据场景,采用第2节提出的优 化配置模型,对微网配置方案进一步优化,提高微网 配置方案的鲁棒性,具体优化步骤如下。 步骤 1:初始化方案下限值 $(n_{i,\min} = 0, P_{g,\min} = 0)$,即所有设备数量的优化下限为 0 个,TL 功率优 化下限为 0 kW。

步骤 2:根据历史数据进行场景生成和场景缩 减。

步骤 3:根据历史数据,采用上文所述模型进行 微 网 配 置 优 化,获得 当 前 最 优 配 置 方 案 (*n*_{*i*,opt}, *P*_{g,opt})。

步骤 4:优化模型中的设备数量和 TL 功率下 限值 调整为当前最优配置方案 $(n_{i,\min} = n_{i,opt}, P_{g,\min} = P_{g,opt})$ 。

步骤 5:选取当前概率最大的数据场景进行配置优化,获得当前最优配置方案(*n_i*, *p_g*, *opt*)。

步骤 6:重复步骤 4 和 5 至数据场景数量为 0。 步骤 7:输出最优配置方案。

如果微网配置方案能够满足 N^2 个数据场景, 那么 N 越大配置方案的鲁棒性越高。但是 N 不能 无限大,所以通过场景缩减获得具有代表性的 M 个 数据场景。首先根据历史数据进行优化配置,并将 配置方案作为下一次优化的优化下限。在第 2 节全 寿命周期配置优化模型中,设备的安装数量(n_{di} , n_{si} , n_{pi} , n_{wi})的优化范围是[0,+ ∞)。将当前配置 方案作为下一次配置优化的优化下限,即[$n_{i.opt}$, + ∞),保证后一次的优化结果一定能够满足前一次 的数据场景。然后,通过数据场景出现概率进行排 序,概率大的场景优先进行优化配置,即出现概率越 大优先级越高,后面的配置方案只能在前面的配置 方案基础上增加设备数量或者 TL 功率。这样,保 证微网配置方案能够满足所有典型数据场景,提高 微网配置方案的鲁棒性。

4 算例分析

本文采用实际工程数据,风光资源及负荷数据 如图1所示。全年风能可利用小时数为6912h(即 全年中风速大于切入风速的小时数),其中305h大 于额定风速。全年太阳能可利用小时数为3069h (即全年中辐照度大于100W/m²的小时数),总太 阳辐照度为1.12MW/m²。全年负荷用电量为 1.28MW•h,最大负荷需求为251.4kW。与工程 实际相结合,设备采用基本单元的形式如表1所示, 优化设备安装数量。其中,蓄电池储能的充/放电效 率为0.9。同时,假设微网接入费用为10000元/ kW,购电电价为1.0元/kW,售电电价为0.8元/ kW。购电/售电电价为恒定电价,且购电电价高于 售电电价,以防止赚取电价差额的行为。微网运行 方式仅受经济性、自平衡度等性能指标约束,不考虑 商业运营模式的影响。



图 1 2010 年风速、光照和负荷年数据曲线 Fig.1 Historical data of wind speed, irradiance and load in 2010

	表	1 设备	昏信息
Fable	1	Device	information

设备	容量	安装成本系数	安装成本/元	维护成本系数/(%•kW ⁻¹)	维护成本/(元•kW ⁻¹)	
WΤ	30 kW	10 000 元/kW	300 000	1.0	3 000	
\mathbf{PV}	10 kW	10 000 元/kW	100 000	0.1	100	
DE	100 kW	750 元/kW	75 000	2.0	1 500	
$\frac{10 \text{ kW}}{50 \text{ kW}}$	10 kW	1 000 元/kW	85 000	1.0	850	
	50 kW • h	1 500 元/(kW・h)				

4.1 经济性分析

经济性是微网优化配置的首要目标,在不考虑 其他性能要求的情况下,仅以微网全寿命周期成本 为目标,微网的配置方案如下:WT,PV,DE,ES和 TL的安装容量分别为 600,20,0,0,238 kW;性能 指标分别为全寿命周期成本(等年值)1 144 786 元, 自平衡度 48.1%, 冗余度 33.7%, TL 利用率46.9%。 可再生能源利用率 89.1%。

可再生能源是目前具有较大竞争力的分布式电 源形式,因为数据中风资源优于光资源,所以风力发 电容量较大。由于微网中缺少可控电源和储能系 统,向外电网倒送了约1/3的可再生能源发电量。

但是风光资源具有波动性,依靠外电网吸收可 再生能源过剩功率,将影响电网稳定运行,所以并网 型微网中应该配备一定容量的可控电源和储能系 统。然而,相对于集中供电模式,可控电源如 DE 的 发电成本较高;ES 充放电过程会产生维护和折旧成 本以及能量损耗,导致可控电源和储能系统的经济 性差。所以在并网型微网优化配置中,不能仅从经 济性上进行评价,需要综合考虑微网经济性、鲁棒 性、自治能力以及 TL 和微网设备的利用率。

4.2 并网运行性能分析

除了经济性,并网型微网优化配置中还需要考虑并网运行特性和要求,包括自平衡度、冗余度、可 再生能源利用率和 TL 利用率。

4.2.1 自平衡度

不同自平衡度下的微网配置方案如图 2 所示。



Fig.2 Configuration under different self-balancing levels

图中不同颜色柱形图高度代表不同设备的安装 容量,柱形图的总高度代表微网总安装容量(下同), 如 50%自平衡度下 WT,PV 和 TL 的安装容量分 别为 600,70,238 kW,因此微网总安装容量为 908 kW。随着自平衡度提高,分布式电源容量逐渐增 大,TL 额定功率逐渐减小。由于经济性较高,WT 一直占据较大比例。但是 WT 受自然条件影响输 出功率不可控,所以当自平衡度超过 60%,微网配 备了可控型的 DE。因为在负荷高峰时,WT 的功率 可能很小,与增加 WT 容量相比,采用 DE 短时供电 经济性更好。当自平衡度达到 100%时,微网完全 依靠分布式电源供电,安装容量显著增大。为了充 分利用可再生能源,ES 用于电量转移,转移电量占 可再生能源发电量的 5.6%,而 18.2%的发电量出售 给外电网,导致 TL 功率增大。

4.2.2 冗余度

不同冗余度下的微网配置方案如图 3 所示。由 于向外电网售电电量减小,过剩发电量不能充分利 用,所以可再生能源安装容量随着冗余度降低而减 小。为充分利用可再生能源,需要外电网或者 ES 消纳可再生能源的过剩功率。但是在配置方案中没 有 ES,因为 ES 的电量转移成本高于可再生能源的 效益,甚至利用 DE 短时供电的经济性也优于利用 储能设备进行电量转移。



图 3 个同冗余度下的**鼠**网配直万条 Fig.3 Configuration under different redundancy levels

4.2.3 设备利用率

不同的自平衡度和冗余度下可再生能源利用率 始终保持在80%以上;可再生能源安装容量和发电 量也占系统容量和发电量的50%以上,说明高利用 率的可再生能源是微网的基础,具有较高的经济性。

不同 TL 利用率下微网配置方案和性能差别不 大,如图 4 和图 5 所示。提高 TL 利用率,只增加微 网和电网之间的交换电量,使得微网多购电多售电, 导致运行成本的增加。





随着接入费用增加 TL 利用率增大,但是微网 年购电电量变化较小。如表 2 所示,基于电网电价 和分布式电源发电成本,购电量维持在 0.66 MW•h是比较经济的。当接入费用提高时, 相当于 TL 的"投资成本"增加,导致 TL 容量减小 而 TL 利用率提高。



图 5 不同 TL 利用率下的微网性能 Fig.5 Performance under different line-utilization levels

表 2 不同接入费用下的微网配置方案 Table 2 Microgrid configuration under different access fees

接入费 用/(元・ kW ⁻¹)	WT 容量/ kW	PV 容量/ kW	DE 容量/ kW	TL 容量/ kW	购电电量/ (kW・h)	TL 利用率/ %
5 000	600	0	0	340	677 297	35.20
10 000	600	20	0	238	664 963	46.90
15 000	450	100	100	153	657 979	62.50

同时,分布式电源结构也发生了改变,在低接入费用时大量安装WT,因为风资源优于光资源,依靠TL弥补风电功率不足;随着接入费用增加,PV容量增加,利用风光互补来满足不同时刻负荷需求;在高接入费用时利用可控电源弥补不足功率,以节省接入费用。所以,电网电价和接入费用影响微网运行方式,电网电价决定微网最佳交换电量;接入费用决定TL容量和利用率。

4.3 鲁棒性分析

采用场景生成和场景缩减技术构造 10 个可能 性较大的数据场景,对微网配置方案进行调整,提高 微网配置方案鲁棒性,其他性能指标如下: α_{design} 为 70%, β_{design} 为 30%, γ_{design} 为 85%, λ_{design} 为 35%。

分别对 10 个数据场景进行优化配置,配置方案 如图 6 所示,不同颜色的数据点代表单一数据场景 下的配置方案,各种设备的安装容量差别较大。柱 形图代表历史数据下的配置方案,由于历史数据中 风资源较好,所以 WT 的安装容量明显高于其他数 据场景。而 10 个数据场景中通过模拟风光资源随 机波动,构造了不同运行状况即不同风光资源比例, 所以 WT 和 PV 的安装容量差别较大,DE,ES 和 TL 额定功率也相应改变。这将导致基于不同自然 年数据优化获得的微网配置方案差别较大,或者基 于单一数据场景优化获得的微网配置方案鲁棒 性差。

为了提高微网鲁棒性,微网配置方案需要满足 不同运行状况,根据第3节所述的方法对微网配置 方案进行调整,得到表3所示结果。基于历史数据 进行配置优化获得微网"基本配置",即历史数据下 微网的最优配置方案。



图 6 不同数据场景下的微网配置方案 Fig.6 Configurations under different data scenarios

表 3 微网配置方案对比 Table 3 Comparison of microgrid configurations

配置方案	TL 容 量/kW	DE 容 量/kW	ES 容 量/kW	PV 容 量/kW	WT 容 量/kW
基本配置	142	100	0	60	540
最优配置	242	100	0	120	540
最高配置	227	200	30	140	540

选取图 6 中 10 个数据场景下配置方案中设备 安装容量的最大值,得到微网的"最高配置"。最高 配置方案显然可以满足 10 个数据场景需求,但不是 最优方案。基本配置和最高配置的差距体现了不同 数据场景的差别,历史数据中风资源较好所以 WT 容量大,随机数据场景中存在光资源较好的情况所 以 PV 容量大。不同数据场景下,依靠不同的设备 转移可再生能源过剩电量,所以 DE,ES 和 TL 的额 定功率也不同。

最优配置方案是采用鲁棒性优化算法,基于 10个数据场景逐次地进行配置优化获得的微网配 置方案。相对于基本配置,最优配置方案中设备容 量明显增加,这是为了适用于不同数据场景,提高系 统鲁棒性。相对于最高配置,最优配置中的后续场 景是基于前面场景的配置方案进行优化,虽然部分 设备的安装容量过大(如WT),但有利于减小其他 设备的安装容量过大(如WT),但有利于减小其他 设备的安装容量(如DE和ES)。其安装成本相对 于基本配置提高了 21.3%,相对于最高配置减少了 5.1%。因此,对于历史数据场景和随机数据场景, "最优配置"不一定是最经济的,但是能够保证满足 所有数据场景,提高系统鲁棒性。

配置方案的调整过程如图 7 所示,不同颜色柱 形图高度代表不同场景下设备安装容量的增量,在 "基本配置"的基础上,只有部分场景下配置方案进 行了调整,因此未显示的场景代表安装容量没有变化。其中"场景4"和"场景7"下光资源较好,PV 安装容量有所增加,避免过分依靠风力发电,导致实际运行中由于随机性引起风资源不足以及光资源浪费。多个场景下对TL 功率进行调整,一方面通过TL 额定功率适当调整,避免安装多余的DE 和ES; 另一方面由于不同场景下存在WT 或PV 容量过剩的情况,需要依靠TL 出售过剩电量。



5 结语

本文提出一种并网型微网优化配置方法,以微 网全寿命周期成本为目标,进行微网配置和运行联 合优化。根据微网并网运行特性,从自平衡度、冗余 度、可再生能源利用率、TL利用率4个方面,综合 评估微网性能。最后采用场景生成和场景缩减技术 提高微网配置方案的鲁棒性,并结合实际的工程数 据,对本文提出的算法进行了仿真验证和分析。

参考文献

- [1] European Commission. The 2010 clinate and energy package [EB/OL]. [2009-09-03]. http://ec.europa.eu/clima/policies/ package/index_en.htm.
- [2] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [3] KYRIAKARAKOS G, DOUNIS A I, ROZAKIS S, et al. Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4517-4526.
- [4] VRETTOS E I, PAPATHANASSIOU S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration res-bess system for small isolated grids [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2011, 26(3): 744-756.
- [5] ROSS M, HIDALGO R, JOOS G. A knowledge based expert system for the pre-feasibility analysis of an energy storage system in a wind-diesel isolated power grid [C]// Power &.

Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 8p.

- [6] WANG Chengshan, LIU Mengxuan, GUO Li. Cooperative operation and optimal design for islanded microgrid [C]// Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 16-20, 2012, Columbia, USA: 8p.
- KHAN M J, IQBAL M T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in newfoundland [J]. Renewable Energy, 2005, 30(6): 835-854.
- [8] DUFO-LOPEZ R, BERNAL-AGUSTIN J L. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems [J]. Renewable Energy, 2008, 33(12): 2559-2572.
- [9] 钱科军,袁越,石晓丹,等.分布式发电的环境效益分析[J].中国 电机工程学报,2008,28(29):11-15.
 QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.
- [10] 杨琦,张建华,刘自发,等.风光互补混合供电系统多目标优化 设计[J].电力系统自动化,2009,33(17):86-90.
 YANG Qi, ZHANG Jianhua, LIU Zifa, et al. Multiobjective optimization of hybrid PV/Wind power supply system [J].
 Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 86-90.
- [11] KATSIGIANNIS Y A, GEORGILAKIS P S, KARAPIDAKIS E S. Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 404-419.
- [12] 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.

- [13] 梁惠施,程林,苏剑.微网的成本效益分析[J].中国电机工程学报,2011,31(增刊1):38-44.
 LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31 (Supplement 1): 38-44.
- [14] DUFO-LOPEZA R, BERNAL-AGUSTINA J L, YUSTA-LOYOA J M, et al. Muliti-objective optimization minimizing cost and life cycle missions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4033-4041.
- [15] 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.
- [16] HAWKES A D, LEACH M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid [J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8): 1253-1265.

12

- [17] REN H, GAO W. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2010, 87(3): 1001-1014.
- [18] PRUITT K A, BRAUN R J, NEWMAN A M. Evaluating shortfalls in mixed-integer programming approaches for the optimal design and dispatch of distributed generation systems [J]. Applied Energy, 2013, 102: 386-398.
- [19] 王守相,王慧,蔡声霞.分布式发电优化配置研究综述[J].电力系统自动化,2009,33(18):110-115.
 WANG Shouxiang, WANG Hui, CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110-115.
- [20] ALARCON-RODRIGUEZ A, HAESEN E, AULT G, et al. Multi-objective planning framework for stochastic and controllable distributed energy resources[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 227-238.
- [21] 雷金勇,谢俊,甘德强.分布式发电功能系统能量优化及节能减 排效益分析[J].电力系统自动化,2009,33(23):29-36.

LEI Jinyong, XIE Jun, GAN Deqiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 29-36.

- [22] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R, NARIMANI M R. An efficient scenario-based stochastic programming framework for multi-objective optimal micro-grid operation[J]. Applied Energy, 2012, 99: 455-470.
- [23] 徐立中.微网的能量管理技术研究[D].浙江:浙江大学,2011.

薛美东(1987—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:微电网能量管理与控制。E-mail: xuemd2006@163. com

赵 波(1977—),男,博士,主要研究方向:分布式电源 及微网关键技术。E-mail: zhaobozju@163.com

张雪松(1979—),男,博士,主要研究方向:分布式电源 与微网、储能及保护自动化。E-mail: ee zxs@163.com

(编辑 姜海)

Integrated Plan and Evaluation of Grid-connected Microgrid

XUE Meidong^{1,2}, ZHAO Bo², ZHANG Xuesong², JIANG Quanyuan¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power company, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A novel integrated plan optimization method of grid-connected microgrid is presented with the objective to minimize the life-cycle cost. The proposed method is based on joint optimization of optimal sizing and operating considering the grid-connected performance index. Firstly, the self-balancing level, redundancy level, RES utilization level and other indexes are defined to evaluate grid-connected performance as constraints on the optimization method. Secondly, the sizing optimization would be done in multiple random scenarios to deal with the indeterminacy of solar and wind resource based on scenario generation and reduction. Finally, the simulation results based on the actual data on the microgrid project are presented to demonstrate the performance of the proposed approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207140).

Key words: microgrid; optimal sizing; life-cycle cost; self-balancing level; robustness

