

考虑风/光/水/储多源互补特性的 微网经济运行评价方法

夏永洪^{1,2}, 吴虹剑¹, 辛建波², 程 林³, 余运俊¹, 万晓凤¹

(1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031;

2. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

3. 清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对风能、太阳能短期波动大, 水能短期波动小的特点, 通过分析风、光、水、储资源之间的互补特性, 提出了一种包含风、光、水、储的互补微网优化配置方法, 建立了互补特性对微网经济运行影响的评价体系。该方法以储能容量、微网设备安装成本与系统运行维护成本为目标, 以系统容量、分布式发电比例与蓄电池充放电特性为约束, 基于自适应遗传算法, 得到最优风、光、水等分布式电源容量以及该条件下的储能系统配置容量。通过灵活调整分布式电源组合方式及分布式发电比例, 得到不同配置下的储能系统配置容量及微网经济运行评价指标。结果表明: 当风、光、水 3 种分布式电源出力具有互补性时, 系统储能容量明显减小, 同时微网经济效益达到最优。

关键词: 微网; 遗传算法; 储能容量; 互补特性; 经济效益; 分布式电源

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.010

0 引言

风、光、水等可再生能源具有零污染、分布广、蕴含量大等优点。但由于光伏发电与风力发电易受昼夜变化、云层遮挡、风力大小等自然因素的影响, 其出力存在一定的间歇性、随机性^[1-3], 通常需要配置储能装置。对于小水电, 其短期波动小, 当具备了一定的装机容量与调节库容时, 即可克服光伏与风电出力存在的间歇性和不稳定的缺点, 以保证独立风光互补系统的供电质量, 同时可以降低储能装置的配置容量^[4-5]。我国太阳能资源夏秋季节丰富、春冬季节匮乏, 风力资源春冬季节丰富、夏秋季节匮乏, 与水力资源春夏季节丰水、秋冬季节枯水的现状正好形成互补。由此可见, 风、光、水 3 种分布式资源在时空上具有良好的互补性。

以风、光、水 3 种分布式电源构成的互补微网在热带季风、亚热带季风、温带季风以及海洋性气候区域广泛存在, 特别是在我国南方富含小水电的地区。其应用可以大幅提高资源的利用效率, 对增强系统供电可靠性和提高微网经济效益具有重要意义^[6-7]。近年来, 有关互补分布式能源发电的研究较多。文献^[8]提出了一种基于离散概率模型的风光互补供

电系统优化配置方案, 通过离散概率分布描述了包括风、光、负荷、补偿装置功率等的随机分布, 建立了有关系统电能裕度、总投资与电压穿越概率最佳的配置策略。文献^[9-11]针对蓄电池储能的风电或风光互补发电系统储能容量优化配置进行了研究, 建立了以系统各项成本与负荷缺电率最小为目标的优化模型, 解决了满足系统稳定性与安全性要求的离网或并网型微网储能容量配置问题。文献^[12-14]通过对蓄电池与超级电容不同充放电特性的研究, 建立了基于这 2 种储能装置的互补微网混合储能容量优化配置方法, 利用超级电容能量密度低、功率密度高以及充放电速度快的特点, 克服了蓄电池储能系统在容量配置、系统响应速度等方面的不足。因此, 目前的研究主要集中在互补原理的分析、不同种类互补系统的构建、储能容量的优化配置以及微网运行的控制策略等方面, 而关于互补发电系统的综合评价较少, 尤其是针对含小水电的互补微网的评价。

通过研究风、光、水的季节出力特性及其互补关系, 提出一种包含风/光/水/储的互补微网优化配置方法, 建立有关互补特性对微网经济运行影响的评价体系。通过改变风、光、水等分布式发电组合及分布式发电比例, 对比分析其对互补微网所需配置的储能容量、微网设备安装成本、运行维护成本、系统电力不足累计概率、分布式发电互补特性、环境效益和上网收益的影响, 以体现分布式资源互补特性与微网经济效益之间的关联。

1 风光水多源互补特性分析

图 1 为某互补微网示范工程中风机、光伏和径流

收稿日期: 2016-10-07; 修回日期: 2017-05-31

基金项目: 国际科技合作专项(2014DFG72240); 国家电网公司总部科技项目(52182013000V); 南昌大学研究生创新专项资金资助项目(cx2015135)

Project supported by International S & T Cooperation Program of China (ISTCP) (2014DFG72240), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52182013000V) and the Innovation Fund for Graduate Students of Nanchang University(cx2015135)

式小水电集群的年出力标幺化曲线。

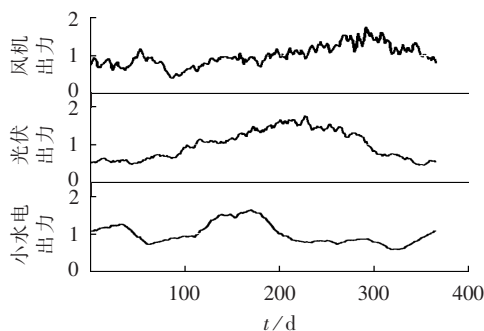


图 1 风光水资源季节互补性表现

Fig.1 Seasonally complementary performance of wind, solar and hydraulic energy sources

对于该示范工程应用地区,秋冬季节的风速较大,风能资源较丰富,其占全年风能资源的 59.85%;而春季和夏季的风速较小,风能资源也较少。该地区夏秋季的太阳辐射强度大,光伏出力占全年的 66.19%。因此,夏秋季节光伏电站的出力较大;冬春季的太阳辐射强度较弱,光伏出力也较小。该地区春夏季节的雨水较多,其水力资源占全年的 61.58%。尤其在夏季,雨水更多,可以称之为丰水期;秋冬季节雨水较少,尤其在冬季,水电站处于枯水状态。由此可见,当风电和光伏出力较小时,小水电站的出力较大;而当水力资源处于枯水季节时,风能和太阳能的出力较大。因此,在季节时间尺度上,风、光、水等分布式资源的出力特性具有一定的互补特性^[15]。

2 风光水储互补微网优化配置方法

2.1 目标函数

目标函数包括 3 个部分:储能容量、微网设备安装成本以及系统运行维护成本。当三者总和达到最小时,系统配置最优。

2.1.1 储能容量

$$E_H = \max_T [R_{\text{store}}(t) - \min_{t' \geq t} R_{\text{store}}(t')] \quad (1)$$

其中, E_H 为微网所需配置的储能容量(标幺值); T 为微网年运行时间; $R_{\text{store}}(t)$ 为 t 时刻系统容量无限制下,即不考虑储能装置荷电状态限制时所需储能容量; $\min_{t' \geq t} R_{\text{store}}(t')$ 为 t 时刻之后分布式电源与储能系统失配累计最小值。

$$R_{\text{store}}(t) = \begin{cases} R_{\text{store}}(t-1) + \eta_{\text{in}} \Delta P(t) & \Delta P(t) \geq 0 \\ R_{\text{store}}(t-1) + \Delta P(t) / \eta_{\text{out}} & \Delta P(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, η_{in} 、 η_{out} 分别为储能装置充、放电效率; $\Delta P(t)$ 为 t 时刻微网的失配功率(标幺值),其表达式见式(3)。

$$\Delta P(t) = \lambda \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i G_i(t) - L(t) \quad (3)$$

其中, N_1 为分布式电源种类数; λ 为分布式发电比,即分布式发电功率与负荷耗电功率之比; α_i 为风机、

光伏与小水电等分布式电源装机容量配比; $G_i(t)$ 为用单一分布式电源对系统供电时,其 t 时刻的输出功率(标幺值); $L(t)$ 为 t 时刻负荷消耗功率(标幺值)。

由于分布式资源的储存量在一年内会随时间改变,故在一段时间内分布式电源的出力逐渐增加,将使得储能装置在这段时间内能量持续增长。这一增长是相当大的,将导致所需配置的储能容量亦随时间的增加而增大。此时,若简单地采用时间段 T 内系统储能容量最值差进行储能容量的配置将毫无意义,故定义 E_H 以保证储能系统对外供电时,能量不会出现负值。

2.1.2 微网设备安装成本

对于微网系统,设备安装成本 C_E 包括分布式电源与储能装置购置费用以及设备安装费用,其通常与系统总装机容量呈正相关。将设备与安装成本总资金换算为按期等额支付金额,其表达式如下:

$$C_E = \bar{P}_L \left[\lambda \sum_{i=1}^{N_1} c_i \alpha_i (1+r_i) + c_b E_H \right] \frac{k(1+k)^{n_1}}{(1+k)^{n_1} - 1} \quad (4)$$

其中, $\bar{P}_L$ 为负荷年平均功率,取其为本文的基准值; c_i 为风机、光伏与小水电相关设备的购置成本系数,单位为元/kW; r_i 为安装成本占设备成本的比例; c_b 为储能装置单位千瓦造价,单位为元/kW; k 为银行长期贷款利率; n_1 为该项目的还款年限,一般为分布式电源的使用年限。

2.1.3 系统运行维护成本

微网的运行维护成本可分为固定成本与可变成本,根据经验公式可折算成与系统设备利用率相关的比例因子^[16]。 C_0 为系统每年的运行维护成本,其表达式如下:

$$C_0 = \lambda \bar{P}_L \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i (K_{Fi} + K_{Oi} T_i) \quad (5)$$

其中, K_{Fi} 为风机、光伏与小水电运行维护的年固定成本系数(元/(kW·a)); K_{Oi} 为运行维护的年可变成本系数(元/(kW·h)); T_i 为微网 3 种分布式电源的年平均运行时间,单位为 h。

微网系统装置的各项成本系数见表 1。

表 1 微网系统装置的各项成本系数
Table 1 Cost coefficients of microgrid devices

发电方式	$c_i /$ (元·kW ⁻¹)	$r_i / \%$	$K_{Fi} / [$ 元· (kW·a) ⁻¹ $]$	$K_{Oi} / [$ 元· (kW·h) ⁻¹ $]$	T_i / h
风力发电	3850	50	37	0.0050	1400
光伏发电	14800	40	90	0.0042	1250
小水电群发电	8000	45	40	0.0180	3500
蓄电池储能	6250	20	100	0.0029	3000

2.2 约束条件

系统约束条件具体如下所述。

2.2.1 系统容量约束

对于微网系统,由于当单一分布式电源对系统

供电时,其均能满足系统的负荷需求,故对于同时具有风、光、水 3 种分布式能源的发电系统,各分布式电源装机容量所占份额均需小于等于 1,其总和为 1。

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

2.2.2 分布式发电比例约束

为保证系统供电充足,只有当分布式发电总量大于系统负荷时,才能保证有盈余的电能对储能系统供电;但如果发电总量过大,能源设备的投入也将随之增大,将造成浪费。

$$1 < \lambda < \lambda_{\max} \quad (7)$$

其中, $\lambda_{\max}$ 一般控制在 1.0~1.3。

2.2.3 蓄电池荷电状态约束

文中储能装置全部选用铅酸蓄电池,在蓄电池的充放电过程中,必须严格满足其荷电状态(SOC)上、下限约束,以延长电池的使用寿命^[17]。

$$s_1 \leq \text{SOC} \leq s_2 \quad (8)$$

其中, s_1 、 s_2 分别为蓄电池 SOC 最小、最大值。

2.2.4 蓄电池充放电约束

为达到对蓄电池充放电的精确控制,需对其充放电速率、充放电电流进行约束。

$$\begin{cases} r_c < r_{c,R} \\ r_d < r_{d,R} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_c < I_{c,\max} \\ I_d < I_{d,\max} \end{cases} \quad (10)$$

其中, r_c 、 r_d 分别为蓄电池的充、放电速率, $r_{c,R}$ 、 $r_{d,R}$ 分别为其给定充、放电速率; I_c 、 I_d 分别为蓄电池的充、放电电流, $I_{c,\max}$ 、 $I_{d,\max}$ 分别为其充、放电电流最大值。

2.2.5 瞬时功率约束

为防止微网在负荷突增的情况下出现大功率缺失,导致系统电能质量下降,微网瞬时功率平衡是负荷与储能装置协调控制的基本条件。

$$\lambda \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i G_i(t) + H_c(t) - L(t) = 0 \quad (11)$$

其中, $H_c(t)$ 为有限制下的储能装置的当前储能容量(标么值),当其为正时,系统处于放电状态;当其为负时,系统处于充电状态。

2.3 评价指标

2.3.1 系统电力不足累计概率

考虑到风/光/水/储微网的负荷供给能力,提出用系统一年内所有分布式电源与储能装置每日输出功率之和小于负荷消耗功率的概率 λ_{LOLP} 进行表征,其表达式如下:

$$\lambda_{\text{LOLP}} = \Pr \left\{ \lambda \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i G_i(t) + H_c(t) \leq L(t) \right\} \quad (12)$$

其中, $\Pr\{\cdot\}$ 表示不等式约束成立的概率。 λ_{LOLP} 越小,微网功率缺失越小,系统稳定性越高。

2.3.2 分布式发电互补特性

为体现风光水等分布式能源的互补特性,提出用分布式电源输出功率之和在一年内的波动 D_L 进行表征,表达式如下:

$$D_L = \frac{\sum_{t=1}^T (G_{\text{DG}}(t) - \bar{G}_{\text{DG}}(t))^2}{T} \quad (13)$$

$$G_{\text{DG}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i G_i(t) \quad (14)$$

其中, $G_{\text{DG}}(t)$ 为分布式发电比 λ 为 1 时系统的输出功率, $\bar{G}_{\text{DG}}(t)$ 为其年平均值。 D_L 越小,分布式发电的输出功率波动越小,风、光、水的互补特性越好。

2.3.3 环境效益

以风、光、水为主的清洁能源发电可有效减少各类污染物的产生,实现节能减排。根据文献[16],可估算出电力行业污染物排放的评价指标参数,如表 2 所示。结合传统燃煤发电中各类污染物的排放系数,针对各污染物的环境价值与罚款金额,可将其等效折算为互补微网的环境效益 C_{EN} ,其表达式如下:

$$C_{\text{EN}} = \sum_{i=1}^n E \gamma_i (v_i + \varphi_i) \quad (15)$$

其中, n 为传统燃煤发电所产生的污染物种类数; E 为微网年发电量($\text{kW} \cdot \text{h}$); γ_i 为传统燃煤发电对应第 i 种污染物的排放系数($\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$); v_i 为第 i 种污染物的环境价值($\text{元}/\text{kg}$); φ_i 为第 i 种污染物所受罚款($\text{元}/\text{kg}$)。

表 2 传统燃煤发电各污染物排放系数与评价指标

Table 2 Pollutant emission coefficients and evaluation indexes of traditional coal-fired power generation

污染物	排放系数/ [$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]	环境价值/ ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)	罚款/ ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)
NO_x	3.093	6.479 5	1.619 9
CO_2	86	0.018 6	0.008 1
CO	—	0.809 9	0.129 6
SO_2	3.945	4.859 6	0.809 9

2.3.4 上网收益

由于系统分布式发电比 λ 大于 1,系统所需配置的储能装置容量较小,故当微网处于并网状态时,系统将有少量的电能缺额和大量的盈余与大电网进行交换,将此部分产生的经济效益定义为互补微网上网效益 C_s ,其表达式如下:

$$C_s = \sum_{i=1}^{N_1} p_e \Delta E_i \quad (16)$$

其中, ΔE_i 为第 i 种分布式电源年电能盈余与缺额差值; p_e 为大电网上网电价,取 0.52 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

3 模型求解

对于该示范工程,风、光、水年出力标么化曲线如图 1 所示。微网日负荷 48 000 $\text{kW} \cdot \text{h}$,日平均功率为 2 000 kW ,其(标么值)年变化曲线如图 2(a)所

示。利用自适应遗传算法求解包含风、光、水的微网分布式发电容量配比,确定分布式发电比 λ 以及风机、光伏与小水电装机容量所占比例。其中,设置遗传算法中种群规模为 50,最大迭代数为 25,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1;蓄电池 SOC 在 0.6~1.0 之间;银行贷款利率为 5.94%;项目还款年限为 15 a;系统各分布式能源成本系数如表 1 所示。

经迭代,求得分布式发电比 λ 为 1.1869,风机装机容量占总容量 21.66%,光伏占 28.51%,小水电占 50.32%。同时,根据式(1),可得储能系统配置容量为 0.0147 p.u.,考虑到蓄电池 SOC 的限制,其应为 0.0367 p.u.,即 73.4 kW。由式(4)和(5)可得微网设备安装成本为 355.7 万元;系统年运行维护成本为 21.0 万元。由式(12)—(16)得此时微网电力不足累计概率 λ_{LOLP} 为 0.243 8;分布式发电互补特性 D_L 为 0.0350,其值均较小;环境效益 C_{EN} 为 103.9 万元;上网效益 C_s 为 168.7 万元。

根据求得的分布式发电比 λ 与分布式电源装机容量配比 α_i 进行配置,得到在不考虑储能装置调节以及其他调节方式情况下的微网日失配功率(标么值)分布图,如图 2(b)所示。

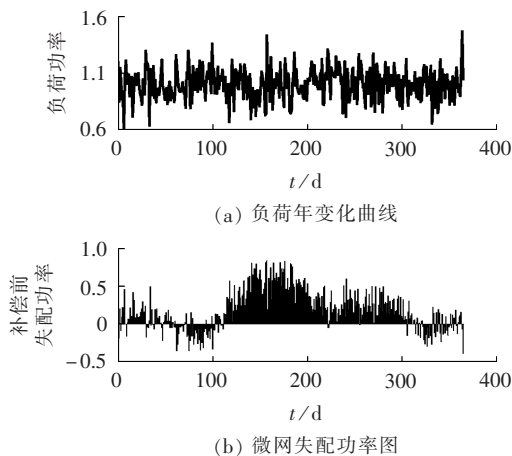


图 2 微网年负荷与失配功率分布

Fig.2 Annual load and power mismatch of microgrid

由图 2 可知,微网的盈余能量远大于失配能量的累计面积,微网的功率失配情况处于平衡状态;分布式发电与负荷的失配情况与季节呈现很强的相关性,当某一阶段中的风、光、水等资源较为丰富时,将有能量盈余。经配置可得,小水电装机容量约占系统总装机容量的一半时,风机与光伏起调节作用。其充分考虑到该地区水力资源丰富的特点,利用 3 种分布式资源的季节互补性优势,解决了因风光出力波动较大而导致的年初储能累计容量急剧减小,甚至可能出现负值等问题;同时,当系统并网时,其所剩余的少量能量缺失与大量盈余将与大电网进行交换,可产生一定的经济价值。经配置可得,当分布

式发电量略大于负荷消耗量时,只需配置少量的储能,可满足系统建设的稳定性、安全性与经济性的要求。

4 互补特性及发电比对微网系统经济效益的影响

为体现风、光、水 3 种分布式电源互补组合相比传统的风光,以及仅由光伏、风电构成的微网发电系统的优势,通过控制风光水互补特性以及分布式发电比的方式来进行对比分析。

4.1 互补特性对微网系统经济效益的影响

根据第 3 节确定的分布式发电比 λ ,分析不同分布式电源组合对微网产生的影响。通过自适应遗传算法,得到不同分布式发电组合最优配比和相应的储能容量(标么值,后同),如表 3 所示。

表 3 不同分布式发电组合下的最优配比

Table 3 Optimal proportions of different DG combinations

组合方式	最优配比/%			储能容量
	风机	光伏	小水电	
风	100	—	—	0.109 5
光	—	100	—	0.180 8
水	—	—	100	0.097 5
风、光	86.95	13.05	—	0.111 3
风、水	22.62	—	77.38	0.027 3
光、水	—	28.82	71.18	0.059 6
风、光、水	21.66	28.51	50.32	0.036 7

由表 3 可知,对于包含小水电的任意 2 种或 3 种分布式电源组合,小水电占比均为最大,其中风、水组合中占 77.38%,光、水组合中占 71.18%,风、光、水组合中占 50.32%。鉴于径流式小水电在日时间尺度波动较小,在季节时间尺度上与光伏和风力发电存在良好的互补特性,且资源相对丰富,故在微网发电系统中占主导地位。

由式(1)—(5)得到分布式电源不同组合下的微网配置的储能容量 E_H 与微网设备安装成本 C_E 以及运行维护成本 C_0 的变化曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知,系统储能配置容量在独立光伏供电时达到最大,在风、水同时供电时,达到最小;系统设备安装成本在独立光伏供电时达到最大,在独立小水电供电时,达到最小;系统运行维护成本在独立光伏供电时达到最大,在独立风机供电时,达到最小。对于该地区,光伏供电成本较高,而小水电资源丰富,且成本低廉,因此,为达到系统建设的经济性要求,应当适当加大小水电容量,减小光伏容量。

对于分布式电源的不同组合,由式(12)—(16)可得系统电力不足累计概率 λ_{LOLP} 、分布式发电互补特性 D_L 、环境效益 C_{EN} 与上网效益 C_s ,如表 4 所示。

由表 4 可知,当风、光、水 3 种分布式电源同时对微网供电时,系统电力不足累计概率 λ_{LOLP} 与分布

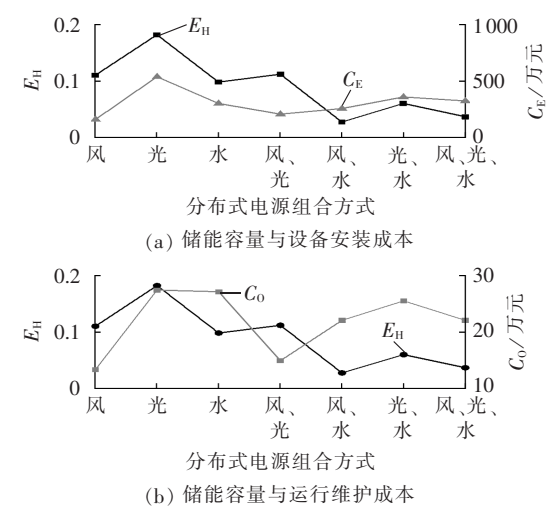


图 3 不同分布式发电组合对微网的影响
Fig.3 Influences of DG combination on microgrid

表 4 不同分布式发电组合下的结果
Table 4 Results of different DG combinations

组合方式	λ_{LOLP}	D_L	C_{EN} /万元	C_S /万元
风	0.2849	0.0699	103.9	168.7
光	0.4192	0.1386	103.4	153.1
水	0.3753	0.0744	103.4	159.6
风、光	0.2767	0.0614	103.4	161.4
风、水	0.2822	0.0379	103.4	152.2
光、水	0.2986	0.0558	103.4	165.9
风、光、水	0.2438	0.0350	103.4	161.5

式发电互补特性 D_L 均为最小,系统供电可靠性、3 种分布式资源的利用率达到最高。同时,当分布式发电比 λ 固定时,系统的环境效益 C_{EN} 将保持不变,上网效益 C_S 在独立风机发电时达到最大。单一分布式电源供电时的储能容量变化曲线如图 4 所示。

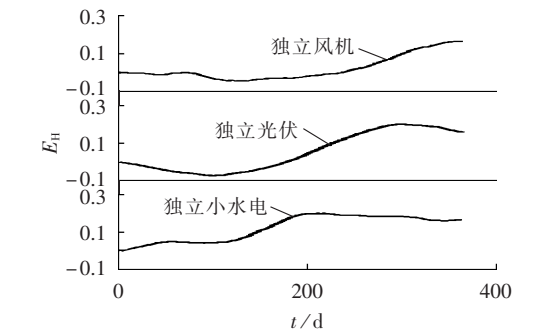


图 4 单一分布式电源供电时的储能
累积容量变化曲线
Fig.4 Accumulative capacity curve of energy storage
when single DG is available

由图 4 可知,由于风机与光伏在年初出力波动性较大,导致其单独供电时微网系统储能容量在一段时间内出现负值,表示需要对储能装置进行额外充电,才能满足系统在微网运行时对负荷的正常供应,这是不合理的。故对于包含小水电在内的任意 2 种或 3 种分布式电源组合可有效规避该情况的发生,保证了储能系统在微网运行过程中能够时刻保持正

常工作状态。

此外,当小水电与其他 2 种分布式电源共同构成微网时,其在季节上存在明显的互补作用,能够使得系统所需配置的储能容量达到最小,系统设备安装成本 C_E 以及运行维护成本 C_0 支出合理,环境效益 C_{EN} 和上网效益 C_S 与其他分布式电源组合方式无明显差异,保证了微网运行的经济性。同时,系统电力不足累计概率 λ_{LOLP} 和分布式发电互补特性 D_L 较小,保证了微网运行的安全性、稳定性。

4.2 发电比对微网系统经济效益的影响

当分布式电源类型为风、光、水 3 种时,针对不同分布式发电比 λ 对微网的影响进行分析。通过自适应遗传算法,计算得到不同分布式发电组合最优配比,如图 5 所示。

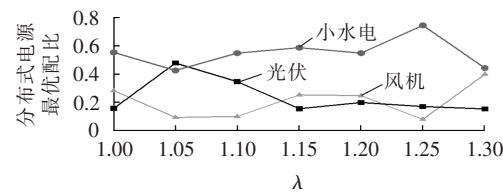


图 5 不同分布式发电比下的分布式电源最优配比
Fig.5 Optimal capacity configuration of DGs
for different DG ratios

由图 5 可知,在包含风、光、水 3 种分布式电源的情况下,小水电的装机容量始终占系统总装机容量的 40%~80%。

根据式(1)—(5),可得到微网所需配置的储能容量 E_H 、微网设备安装成本 C_E 和运行维护成本 C_0 ;再由式(12)—(16),得到系统电力不足累计概率 λ_{LOLP} 、分布式发电互补特性 D_L 、环境效益 C_{EN} 与上网效益 C_S 。它们随 λ 的变化情况如图 6 所示。

由图 6 可知,随着分布式发电比 λ 的增加,微网配置的储能容量 E_H 与系统电力不足累计概率逐渐下降,环境效益 C_{EN} 与上网效益 C_S 呈线性递增;当 $\lambda=1.05$ 时,分布式发电互补特性 D_L 与系统运行维护成本 C_0 均达到最小值;当 $\lambda=1.30$ 时,微网设备安装成本 C_E 达到最大值,为 513.4 万元。

当 λ 较小时,储能装置在一段时间内不仅无法吸收微网的能量盈余,反而需要对外供能,系统正常运行时,无法对储能装置进行额外充电以弥补其能量亏空。故当 λ 过小时,需要进行适当的甩负荷操作,将大幅降低系统的供电可靠性与稳定性。当 λ 较大时,微网系统内输出的能量将随之增大,储能装置只是将微网的能量盈余进行储存,系统失配功率 ΔP 基本为 0,此时,系统内不仅加大了分布式发电设备的使用投入,还增大了系统投资成本。因此, λ 较大时,系统将产生不必要浪费,不利于实现微网建设的经济性。

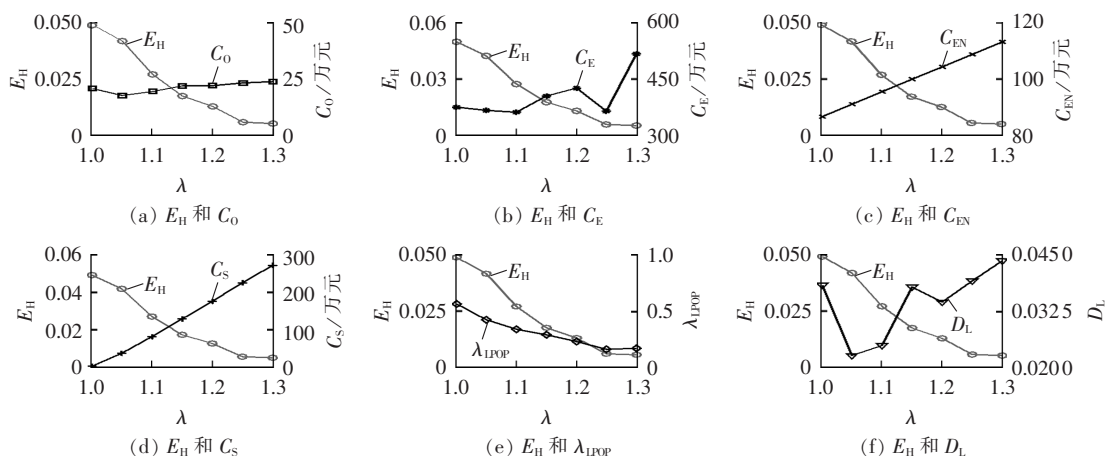


图 6 不同分布式发电比对微网系统的影响

Fig.6 Influences of DG ratio on microgrid

5 总结

本文提出了一种考虑风、光、水等分布式发电互补特性的微网储能容量配置方法,建立了互补微网经济运行评价指标。通过灵活调整分布式电源组合方式及分布式发电比例,实现了不同配置下的微网经济运行。结果表明:当风、光、水 3 种分布式电源出力特性互补时,由其构成的互补微网系统储能容量较小,同时其运行时的经济效益最优。

参考文献:

- [1] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18.
HUANG Wei,SUN Changhui,WU Ziping,et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology,2009,33(9):14-18.
- [2] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75.
LIANG Youwei,HU Zhijian,CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application[J]. Power System Technology,2003,27(12):71-75.
- [3] 窦晓波,袁简,吴在军,等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):26-32.
DOU Xiaobo,YUAN Jian,WU Zaijun,et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):26-32.
- [4] 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.
- [5] 周林,黄勇,郭珂,等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.
ZHOU Lin,HUANG Yong,GUO Ke,et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control,2011,39(7):147-152.
- [6] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设

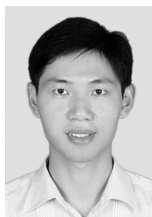
备,2017,37(1):1-7.

ZHANG Guorong,CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):1-7.

- [7] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.
ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen,et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):107-115.
- [8] 叶承晋,黄民翔,王焱,等. 基于离散概率模型的风光互补供电系统优化配置[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):48-54.
YE Chengjin,HUANG Minxiang,WANG Yan,et al. A hybrid wind/photovoltaic power supply system based on discrete probabilistic methodology[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(6):48-54.
- [9] ZHAO Y S,ZHAN J,ZHANG Y,et al. The optimal capacity configuration of an independent wind/PV hybrid power supply system based on improved PSO algorithm[C]//International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management(APSCOM). Hong Kong,China:IET,2009:1-7.
- [10] 徐林,阮新波,张步涵,等. 风光储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.
- [11] 朱兰,严正,杨秀,等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):26-30.
ZHU Lan,YAN Zheng,YANG Xiu,et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology,2012,36(12):26-30.
- [12] 何勇琪,张建成,鲍雪娜. 并网型风光混合发电系统中储能系统容量优化研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(4):1-5.
HE Yongqi,ZHANG Jiancheng,BAO Xuena. Optimization of storage capacity in grid-connected wind/PV/storage hybrid system[J]. Journal of North China Electric Power University,2012,39(4):1-5.
- [13] ALLEGRE A L,BOUSCAYROL A,TRIGUI R. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications[C]//Vehicle Power and Pro-

- pulsion Conference. Dearborn, USA:IEEE,2009:213-220.
- [14] 陈谦,陈霄逸,金宇清,等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):70-75.
- CHEN Qian,CHEN Xiaoyi,JIN Yuqing,et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):70-75.
- [15] 曹蓓. 多能源互补微网的综合优化配置[D]. 南昌:南昌大学,2014.
- CAO Bei. Comprehensive optimal configuration of micro-grid with various new energies[D]. Nanchang:Nanchang University,2014.
- [16] 吴耀文,马溪原,孙元章,等. 微网高渗透率接入后的微网综合经济效益评估与分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):49-54.
- WU Yaowen,MA Xiyuan,SUN Yuanzhang,et al. Overall economic evaluation and analysis of accession of microgrids with high penetration[J]. Power System Protection and Control,2012,40(13):49-54.
- [17] 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):76-83.
- SHI Qingjun,JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):76-83.

作者简介:



夏永洪

夏永洪(1978—),男,江西丰城人,副教授,博士,主要研究方向为电机及其控制、分布式发电及微网(**E-mail**:yhxia@ncu.edu.cn);

吴虹剑(1991—),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与分布式发电(**E-mail**:edwardwu0303@qq.com);

辛建波(1970—),男,江西万载人,高级工程师,博士,研究方向为低碳电力与电能

质量(**E-mail**:mandyzhuhai@163.com);

程林(1973—),男,湖南宁乡人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统可靠性、主动配电网与电力系统规划(**E-mail**:chenglin@mail.tsinghua.edu.cn);

余运俊(1978—),男,江西上饶人,副教授,博士,主要研究方向为电能转换与控制、电力电子设备及其故障诊断、低碳电力等(**E-mail**:yuyunjun@ncu.edu.cn);

万晓凤(1964—),女,江西南昌人,教授,硕士,主要研究方向为光伏智能微网控制、计算机控制与嵌入式智能仪表技术(**E-mail**:xfwan@ncu.edu.cn)。

Evaluation of economic operation for microgrid with complementary DGs and energy storage

XIA Yonghong^{1,2},WU Hongjian¹,XIN Jianbo²,CHENG Lin³,YU Yunjun¹,WAN Xiaofeng¹

(1. School of Information Engineering,Nanchang University,Nanchang 330031,China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute,Nanchang 330096,China;

3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: Since the wind and solar energy sources have high short-term fluctuation while the hydraulic energy source has small short-term fluctuation,the complementary relationships among them are analyzed,an optimal configuration method is proposed for the microgrid with complementary DGs(Distributed Generations) and energy storage,and an evaluation system is built to assess the influence of its complementary performance on the economic operation of microgrid. The proposed method sets the capacity of energy storage system,the installation cost of microgrid devices and the cost of system operation and maintenance as the objectives,takes the system capacity,the proportion of DG and the charge/discharge characteristics of battery as the constraints,and applies the adaptive genetic algorithm to obtain the optimal capacities of DGs and the related capacity of energy storage system. The capacity of energy storage system and the evaluation index of economic operation for a certain configuration can be obtained by flexibly adjusting the combination mode and proportion of DGs. Results show that:when the power outputs of DGs,such as wind,solar and hydraulic are complementary,the capacity of energy storage system is significantly reduced and the economic benefit of microgrid is optimal.

Key words: microgrid; genetic algorithms; energy storage capacity; complementary characteristics; economic benefit; distributed power generation