DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.025

基于风力发电的微电网电源配置研究*

杨光耀1,朱海鹏2,金立军1*

(1. 同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804;

2. 山东电力集团公司 济宁供电公司,山东 济宁 272001)

摘要:针对微电网电源配置过程中的经济性与供电可靠性问题,对分布式电源的配置进行了研究。以微电网的年均费用值为目标 函数,以风机数量、储能元件数量为优化变量,以微电网的可靠性为约束条件,通过遍历算法求最优解,得到了微电网的电源配置方 案。采用蓄电池、超级电容混合储能方案,以发挥蓄电池能量密度高、超级电容功率密度高的优势,从而减少了配置成本;采用改进 的邻域均值滤波法在超级电容和蓄电池之间进行了功率分配,该控制策略能够减少超级电容充放电循环过程中的能量累积,从而提 高了微电网的可靠性。最后基于 Matlab 平台编程实现容量配置算法,对算例进行了配置。研究结果表明,该算法可以在保证可靠性 的前提下,得出了较为经济的配置方案,为小型微电网电源配置提供了新的思路。

关键词:微电网;分布式电源;混合储能;容量配置 中图分类号:TM715 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)12-1634-06

Research on sizing of distributed resources in wind power microgrid

YANG Guang-yao¹, ZHU Hai-peng², JIN Li-jun¹

(1. School of Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Jining Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Jining 272001, China)

Abstract: Aiming at the problem of supply reliability and economy during microgrid power supply configuration process, researches were done to size distributed resources. Setting cost divided in each year as objective function, the numbers of wind turbines and batteries as optimization variables, supply reliability as constraints, using traversal algorithm to calculate optimal solution, configuration of microgrid was calculated. On the premise of the economy, hybrid energy storage system was adopted, taking advantage of high power density of super capacitor and high energy density of battery. On the premise of the reliability, mean filtering strategy was adopted to deploy energy between super capacitor and battery to cease energy accumulation in the super capacitor. Based on Matlab platform the method proposed was implemented and applied to an example. The results indicate that the method proposed is effective so that the method proposed can achieve economical configuration on the premise of stability. New ideas for distributed resources sizing method are suggested. **Key words**: microgrid; distributed resources; capacity sizing; hybrid energy storage

0 引 言

微电网对于终端用户供电可靠性、电能质量的提高具有重要作用^[1]。在小型风力微电网规划中,合理的电源配置是一个重要和复杂的问题^[2]。

在风力微电网中,风机装机容量太小,则发电量 不能满足微电网孤岛运行的需求,需较多的储能才能 保证微电网的可靠运行,而储能容量的增加会提高成 本。风机装机容量过大,风机成本过高,且需增加储 能容量来存储多余的能量,也增加了成本。

文献[3]将分布式发电作为备用电源,并对其容

收稿日期: 2014-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177109);电力设备电气绝缘国家重点实验室资助项目(EIPE14211) 作者简介:杨光耀(1991-),男,内蒙古鄂尔多斯人;主要从事储能技术在微电网中的应用方面的研究. E-mail:cwlxx@163.com 通信联系人:金立军,男,教授,博士生导师. E-mail:jinlj@tongji.edu.cn

量进行了优化配置,考虑了经济性、可靠性。但是没 有考虑到风电的随机性和波动性,也没有对储能容量 进行配置。

储能装置对于微电网的独立运行有着至关重要的作用。文献[4-5]研究了微电网中储能容量的配置,利用储能尽可能规避风电的波动性,但是没有考虑到负荷的波动性。发电和用电的平衡是孤岛状态下微电网稳定运行的前提,所以不仅要考虑风电的波动性,还要考虑负荷的波动性。

通过將蓄电池与超级电容混合应用,可以综合 利用蓄电池能量密度高、超级电容功率密度高的特 性^[6]。很多专家学者对此进行了研究,并取得了一定 的成果^[7-10]。蓄电池和超级电容容量的配置与其功率 分配策略息息相关。在蓄电池和超级电容之间进行 功率分配时,通常采取一阶滤波^[11]或者小波滤波^[12]的 方法。该方法将低频的功率波动由蓄电池来平抑,高 频的功率波动由超级电容来平抑。通常这种方法所 得到的高频功率波动均值不为零,如不加限制措施, 会造成超级电容中能量的累积,降低超级电容平抑微 电网功率波动的能力。

本研究对某小型微电网平台进行电源配置,该平 台由风力发电机和储能系统配合稳定微网电压。具 体配置方法为:以年均费用值为目标函数,以风机数 量、储能元件数量为优化变量,求最优解。

在配置过程中,存在这种情况:风速高时,发电多 于用电,而所配置的电池容量不足存储多余电量。所 以笔者采取切风机的控制策略,在储能荷电状态 (State of charge,SOC)达到上限,且风机发电大于负荷 用电时,切除风机。

本研究采用邻域均值滤波法在蓄电池和超级电容 之间进行功率分配:对不平衡功率一发、用电功率之差 一进行滤波,滤除波形由超级电容进行平抑,其余部分 由蓄电池平抑。由于邻域均值滤波法所滤除的波形均 值接近零,从而可以避免超级电容中的能量累积。

1 微电网平台构建

微电网电源容量配置可按"微源建模—确定边界 条件—建立目标函数——找最优解步骤"进行。微源 建模可以得到风机发电曲线、储能系统充放电曲线、 储能系统成本;将建模得到的数据和模型代入所建立 的目标函数中,在边界条件内求解最优值。

最终微电网实验平台如图1所示。电源为3台 EW-5000W 永磁风力发电机,负载为某农业园区电力 设备。微电网左侧通过隔离变压器、断路器连接到大 电网,断路器断开时,微电网运行在孤岛模式;断路器 闭合时,微电网运行在并网模式。右侧与农业园负载 相连,为农业园负载提供电能。风速、负载以及设备 数据取自该微电网实验平台。

微电网可以与大电网联网运行,也可以孤岛运行。市场上的风力发电机多运行于并网模式或者孤岛模式,不能进行孤岛/并网切换,本研究针对并网型风机EW-5000W做了微电网的配置。

主从控制方式的微电网没有环流,较为稳定,控制 策略简单,孤岛、并网运行转换容易^[13]。本研究所配置 的微电网基于这种控制方式。但是主从控制较为依赖 主微源,通常选择储能装置、微燃机等稳定可靠的电源 作为主微源,在本研究中,储能装置为主微源。

- 2 微源建模
- 2.1 风机建模

风机的输出功率和风速之间的关系可用以下函



图1 微电网实验平台

数近似表示[14]:

$$P = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ \eta(v), & v_{ci} \leq v \leq v_{r} \\ P_{r}, & v_{r} \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases}$$
(1)

式中: P 一风机输出功率, v_a 一切入风速, v_r 一额定 风速, v_{α} 一切出风速, P_r 一风机输出额定功率。

当风速在 v_{ci} 和 v_r 之间变动时,风机的输出功率可以用函数 $\eta(v)$ 来表示,通常可以近似为线性关系。即:

 $\eta(v) = P_r(v - v_{ci})/(v_r - v_{ci})$

通过应用上述模型,可以根据某地风速曲线 Wind(t)得到风机的发电曲线 P_{wind}(t)。

2.2 储能建模

超级电容、蓄电池分别经直流变换后接入直流母线,再经逆变器接入微电网。储能系统示意图如图2 所示。



图2 储能系统示意图

储能建模为了得到这样一个函数:

 $[bat_soc(t), cap_soc(t), C_{bat}, C_{cap}, cap_num, qie(t)] =$ ch uneng(bat_num, P_wind)

其中:返回值 C_{bat} —电池等年费用值; C_{cap} —超级 电容等年费用值; cap_num —超级电容个数; qie(t)— 切风机时刻,当切除风机时 qie(t) 为0,不切除风机时 qie(t) 为1; $bat_soc(t)$ —电池荷电状态; $cap_soc(t)$ —超 级电容荷电状态; bat_num —电池个数; P_{wind} —风机 发电功率。

超级电容为电压环控制,维持直流母线电压恒 定。蓄电池为电流环控制,方便控制蓄电池的输出功 率,以延长蓄电池的使用寿命。通过对逆变器输出历 史功率进行滤波,得到蓄电池输出电流数据。为了在 超级电容和蓄电池之间进行功率分配,本研究采取了 邻域均值滤波法。邻域滤波法滤除波形均值接近于 零,可有效减少超级电容中能量的累积。邻域滤波函 数如下式所示:

$$lvboed(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} unbalance(t-i)$$
(2)

式中: lvboed(t) —滤波后功率波动,即电池平抑部分; unbalance(t) —微电网中的不平衡能量,其值为风机发 电量减去负荷用电量: unbalance(t)= $P_{wind}(t) - P_{load}(t)$ 。

 Pd_cap(t) = unbalance(t) - lvboed(t)
 (3)

 式中: Pd_cap(t) — 期望超级电容平抑的能量,当

 Pd_cap(t)>0,超级电容吸收能量,当 Pd_cap(t)<0,超</td>

 级电容释放能量。

综上所述,储能建模中的电池 SOC 计算程序如图 3所示。





超级电容 SOC 计算与之类似,不再赘述。 电池超级电容等年费用值计算由下式表示:

$$C_{\rm bat} = \frac{E_{\rm bat_year}}{E_{\rm bat_capa} \times n_{\rm bat}} \times P_{\rm r-bat}$$
(4)

式中: C_{bat} —电池等年费用值; $E_{\text{bat_year}}$ —每年电池所存储的能量; $E_{\text{bat_capa}}$ —电池的标称容量; n_{bat} —电池循环

寿命,由于厂家标称的 n_{bat} 为 100% 放电深度时的循环 寿命,在这里计算时并不需要考虑电池在实际使用时 的 SOC 限制; P_{r-bat}—电池的购买价格。

$$C_{\rm cap} = \frac{E_{\rm cap_year}}{E_{\rm cap_capa} \times n_{\rm cap}} \times P_{\rm r-cap}$$
(5)

式中: C_{cap} —超级电容等年费用值, E_{cap_year} —每年超级 电容所存储的能量, E_{cap_capa} —超级电容的标称容量, n_{cap} —超级电容循环寿命, P_{r-cap} —超级电容的购买价格。

由电池、超级电容的 SOC 变化可以得到 E_{cap_year} 、 E_{bat_year} ,从而计算 C_{cap} 、 C_{bat} 。

当 bat_soc(t) 大于上限,且 unbalance(t)≥0 时,切风 机, qie(t)=0。

当系统并网运行时,需要维持储能元件SOC在 0.5上下波动,既能保证微电网脱网时有足够的剩余能 量,也能保证有足够的容量抑制对大电网的冲击。所 以本研究在并网时采取以下控制策略:

$$P_{\rm bat} = \left| SOC - 0.5 \right| \times 2P_{\rm des} \tag{6}$$

式中: P_{bat}—电池实际输出功率, P_{des}—滤波之后期望输出功率。

3 微源容量边界条件的确定

3.1 电池容量边界条件

本研究将孤岛运行时间 T_1 分为两部分:正常情况 离网运行时间 T_2 ,极端情况离网运行时间 T_3 。 T_1 = T_2 + T_3 。其中极端情况是指微源不能够发电或发出的 电能不能够使用的情况。通常这种情况会在极端天 气环境下出现,如大风、无风等等。

该约束条件可以由下式表示:

$$C_{\text{cap_d lim}\,\text{it}} \ge \sum_{T_3} P_{\text{load}}(t) / (\eta_{\text{disc}} \times \eta_{\text{inv}} \times (SOC_{\text{up}} - SOC_{\text{down}}))$$
(7)

式中: η_{dise} 一放电效率; η_{inv} 一转换器效率; SOC_{up} — 电池 SOC 上限; SOC_{down} 一电池 SOC 下限。式(7)表示,储能容量应满足极端条件下全部负载的需求。

由此,可得到蓄电池容量下限 C_{cap_dlimit}。蓄电池容量上限 C_{cap_ulimit},可由离网运行时间能量全部由蓄电池 提供能量求得:

$$C_{\text{cap_u lim it}} \ge \sum_{T_1} P_{\text{load}}(t) / (\eta_{\text{disc}} \times \eta_{\text{inv}} \times (SOC_{\text{up}} - SOC_{\text{down}}))$$
(8)

3.2 风机容量边界条件

若风机容量过小,则不能为微电网提供足够的电能。若风机容量过大,则提高了微电网的投资费用。 为了使风机发电量足够使用,应使风机年发电量等于 用户年用电量的风机容量为下限:

$$E_{\text{wind}_\min} = \sum_{\text{lyear}} fuhe(t) \tag{9}$$

*T*₁时间内风机最小发电量等于负荷最大用电量的容量为上限:

$$E_{\text{wind}_\min} = \max \sum_{T_1} fuhe(t)$$
 (10)

3.3 超级电容容量的确定

由于采用邻域均值滤波法,超级电容上的功率波动均值为0,其最大功率 *P*_{max_cap}表示为:

 $P_{\max_{cap}} = \max[\max P_{d_{cap}}(t)/\eta_{cha}, \min P_{d_{cap}}(t)/\eta_{disch}] \quad (11)$ 式中: η_{cha} —超级电容充电效率, η_{disch} —超级电容放 电效率。

所以,超级电容个数为:

$$cap_num = \operatorname{int} \frac{P_{\max_cap}}{p_{\min_cap}}$$
(12)

式中: int 一上取整, $p_{\min_{cap}}$ 一单个超级电容电压最低时的最大功率。

4 优化目标函数

4.1 微电网的可靠性约束

本研究用LPSP指标来评价微电网的可靠性。电 力不足概率(Loss of Power Supply Probability, LPSP) 描述的是在评估期间发生负荷削减(即电力不足)的 可能性大小。本研究计算微电网一年的缺点概率,认 为每小时内风机的输出功率是恒定的,每小时计算一 次。由于微电网正常孤岛运行时间*T*₁,故每一个*T*₁周 期开始时,都认为储能的 SOC 在设定值。

储能和风机的组合能够满足负荷能量需求时,认为电力充足;不能满足负荷需求时,第 *t* 小时缺电量 *E*_{LPS}(*t*)为:

$$E_{\rm LPS}(t) = E_{\rm load}(t) - [E_{\rm wind}(t) + E_{\rm store}(t)]$$
(13)

式中: $E_{\text{load}}(t)$ —第 t 小时负载所消耗的能量, $E_{\text{wind}}(t)$ — 风力发电能量, $E_{\text{store}}(t)$ —储能系统放出能量。

在计算时, $E_{\text{load}}(t) \$ 、 $E_{\text{wind}}(t) \$ 分别用 $P_{\text{wind}}(t) \$ 、 $P_{\text{load}}(t) \$ 来代替,因为单位时间内的功率可以表示单位时间内的能量。全年缺电概率用 R_{LPSP} 表示:

$$R_{\rm LPSP} = \sum_{i=1}^{8\,760} E_{LPS}(t) / \sum_{i=1}^{8\,760} E_{\rm load}(t) \tag{14}$$

其具体程序如图4所示。

4.2 等年费用值目标函数的构建

本研究采用等年费用值为优化的目标函数。等 年费用值为风机年均费用(设备费用、安装费用、维护 费用)储能设备年均费用(设备费用、安装费用、维护 费用)、年均发电(以电网电价与发电量之积,为负成



图4 LPSP计算流程

本)。

综上所述,等年费用值
$$f_{\text{COST}}$$
 可表示为:
$$f_{\text{COST}} = \begin{cases} \frac{Wind_num \times Wind_{\text{COST}}}{Life_{\text{wind}}} + C_{\text{bat}} + C_{\text{cap}} - C_{\text{grid}} \times E \\ R_{\text{LPSP}} \leqslant Cons1 \\ 99 999, \quad R_{\text{LPSP}} > Cons1 \end{cases}$$

(15)

式中: $Wind_{cost}$ —单个风机费用, $Life_{wind}$ —风机寿命周期, C_{grid} —电价, E —所发电能, Cons1 —所要求的最低缺电概率。

当全年缺电概率过大时,等年费用值为99 999,是 极为不划算的,在筛选时,该配置方案就不会被选中。

5 电源优化配置参数

本研究针对某用户做了微源容量配置,该地风 速、用户负荷曲线由实验平台实测得出。

本研究采用的风机参数为: *P*_r=6400 W, *v*_{ci}=2.6 m/s, *v*_r=14 m/s, *v*_{co}=18.8 m/s。风机机组成 本16830元/kW,安装成本19500元/kW,维护成本 34.2元/(kW·年),设计使用20年。

本研究采用 200 Ah 12 V的磷酸铁锂电池单体, 其价格 8 400元,循环寿命 3 000次,平均 1.17元/kWh。 设置 SOC 充电上限为 0.9,放电下限为 0.2。

本研究采用 27 V 3 500 F 超级电容,单体价格 550元,最高电压 2.7 V,最低电压 0.3 V,电容 3 500 F, 最大充放电电流 2 703 A,循环寿命 100 000次。

允许离网运行时间 $T_1 = 7 \text{ d}$,极端情况运行时间 $T_3 = 6 \text{ h}$ 。要求 $R_{LISP} \leq 0.02$ 。

根据以上条件,计算边界条件:由式(7)得电池最

小容量下限 C_{cap.dlinit} 为77.16 kWh,即32 块电池。由式(5)得电池最大容量上限 C_{cap.ulinit} 为956.4 kWh,即398 块电池。根据模型,单台风机年发电量为19 435 kWh, 负荷供用电 37 077 kWh,所以由式(9)可知至少要2 台风机。由历史数据得风机7天最少发电量为39.5 kWh,最大用电956.4 kWh,所以由式(10)可知风机上 限为25 台。

6 实验及结果分析

基于 Matlab 平台编程计算等年费用值,风机分别 取2、3…5台,电池取32、33…398块,由函数式(11)遍 历求 f_{cost}。

f_{cosr}的值如图5所示。由图5可以看出,风机数 量不变,储能个数增加时,等年值从高向低跳变,继 而上升。造成这种现象的原因是前期储能容量过 小,不能满足微电网的可靠性,即*R*_{LISP}≥0.02,此时 f_{cosr}=99999,故成本在高位。随着储能容量的上升, 可以满足微电网的可靠性,所以*f*_{cosr} 值会有跳变。 继而随着储能容量的增加,微电网运行成本也在增 加。



图5 等年费用值

在满足可靠性的前提下,储能个数不变,风机个 数增加时,由图5可看出:等年费用值先减少,然后增 加,在风机数量增加到一定程度,等年费用值开始减 少。造成这种现象的原因是:初始时过于依靠储能中 的能量,造成等年费用值较高。随着风机数量的增 加,对储能装置的依赖减小,造成等年费用值的降 低。风机数量继续增加,需要较高的风机以及储能投 资成本,等年费用值上升。最终,风机数量增加,开始 向电网大量卖电,造成等年费用值的降低,但是此时, 初期投资费用已经过高,故图5中只画到7台风机。

本研究选择图中最优极值点:电池数量为166,风 机数量为4台的极值点。在这一风机个数和蓄电池个 数下,滤除波形最大功率为19.5 kW,故超级电容个数为:

$$cap_num = int(\frac{P_{max_cap}}{p_{max_cap}}) = int\frac{19\ 500/0.9/0.95}{0.3 \times 2\ 704} = 29$$

此时等年费用值为48 010元。

风机台数为3时,电池数量最少为175块,超级电 容个数为21,此时等年费用值为51840。相比风机台 数为最优值4台时,等年费用值增加了3800。

当微源容量配置在最优极值点,某段时间内超级 电容 SOC 波动情况如图6所示。





由图6可以看出,超级电容中没有积累能量, SOC 在0.5上下波动。证明了均值滤波法在分配超级电容 功率上的优越性。

7 结束语

本研究通过算例对比验证了所提优化配置方法 的可行性。研究结果表明,在保证微电网稳定性的前 提下,可以使成本达到最优;证明了该控制策略的有 效性。

超级电容内能量积累较少, SOC 在0.5上下波动, 对比于小波滤波,该算法容易实现。

本研究所提出的容量优化方法与策略可以为小 型风力微电网微源的配置提供一定的参考。

参考文献(References):

- LASSETER R, ABBAS A, MARNAY C. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept
 [R]. USA: California Energy Commission, 2003.
- [2] 罗运虎,王冰洁,梁 昕,等. 电力市场环境下微电网不可 再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设 备,2010,30(8):28-33.
- [3] 赵国波,刘天琪,李兴源.分布式发电作为备用电源的优 化配置[J].电力系统自动化,2009,33(1):85-89.
- [4] 洪海生,江全元,严立婷.实时平抑风电场功率波动的电 池储能系统优化控制方法.电力系统自动化,2013,37 (1):103-109.
- [5] 谢石骁. 混合储能系统控制策略与容量配置研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [6] 王 建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系 统研究综述[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):90-97.
- BREKKENT K A, YOKOCHI A. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications [J]. IEEE Transactions on.Sustainable Energy, 2011, 2(2):69–77.
- [8] DOUGAL R A, LIU Sheng-yi, WHITE R E. Power and life extension of battery- ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1):120–130.
- [9] 张丹丹,罗 曼,陈 晨,等. 超级电容器-电池复合脉冲 电源系统的试验研究[J].中国电机工程学报,2007,27 (30):36-30.
- GAO Li-jun, DOUGAL R A, LIU Sheng-yi. Power enhancement of an actively controlled Battery–Ultracapacitor hybrid
 [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (1):236–243.
- [11] PAY S, BAGHZOUZ Y. Effectiveness of Battery-Superca-Pacitor Combination in Electric Vehicles [C]//Power Tech-Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003:23-26.
- [12] TAKAHASHI R, TAMURAJ, FUKUSHIMA T, et al. A Determination Method of Power Rating of Energy Storage System for Smoothing Wind Generator Output [C]//2009 ICEMS. Tokyo:[s.n.], 2009:1-6.
- [13] 林少伯. 含光伏电源的微电网储能控制技术研究[D]. 北 京:华北电力大学电气工程学院,2013
- [14] 张节潭,程浩忠,胡泽春,等. 含风电场的电力系统随机生 产模拟[J],中国电机工程学报,2009,29(28):34-39. [编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

杨光耀,朱海鹏,金立军. 基于风力发电的微电网电源配置研究[J]. 机电工程,2014,31(12):1634-1639.

YANG Guang-yao,ZHU Hai-peng,JIN Li-jun. Research on sizing of distributed resources in wind power microgrid[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(12):1634-1639. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn