

风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化

吴红斌, 陈斌, 郭彩云

(合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 合肥 230009)

摘要: 通过配置容量合适的蓄电池-超级电容器混合储能单元, 可以提高风光互补发电系统供电的连续性和可靠性。该文在风力发电、光伏发电、蓄电池和超级电容器的稳态模型基础上, 建立了蓄电池-超级电容器混合储能系统的容量优化模型, 提出了混合储能单元的多目标优化函数, 并对各种约束条件进行了探讨, 采用遗传算法对目标函数进行了求解。通过对算例系统的求解, 证明了该文所建模型和算法的正确性。结果表明, 该文提出的方法可为风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化提供参考。

关键词: 风光互补发电系统, 混合储能, 蓄电池, 超级电容器, 容量优化, 遗传算法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.052

中图分类号: TM61, TM71

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0241-05

吴红斌, 陈斌, 郭彩云. 风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 241-245.
Wu Hongbin, Chen Bin, Guo Caiyun. Capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 241-245. (in Chinese with English abstract)

0 引言

为了更高效地利用可再生能源, 在太阳能、风能资源比较丰富, 互补性较好的环境中, 构建风光互补系统进行发电, 可以提高系统供电的连续性、稳定性和可靠性, 实现昼夜发电^[1-5]。由于风能、太阳能输入能量的不稳定性及间歇性大等特性, 在实际应用过程中, 需要在风光互补发电系统中, 配置储能系统以实现平抑功率波动, 这也是风光互补发电系统亟待解决的问题。

在目前可以应用的储能技术^[6-8]中, 铅酸电池储能具有技术成熟、价格便宜、构造成本低、可靠性好的优点, 但蓄电池的比功率相对较低。而超级电容器储能则具有内阻小、功率密度高、循环寿命长、响应速度快等优点, 非常适合用于短时间高功率输出的场合, 使得它成为处理尖峰负荷的最佳选择。并且采用超级电容器只需存储与尖峰负荷相当的能量; 若采用蓄电池储能则需要存储几倍于尖峰负荷的能量, 从而减少储能单元配置的容量, 降低投资成本。因此, 在风光系统中配置蓄电池-超级电容器混合储能^[9-13]得到了广泛的应用, 相关文献也从并网特性和控制策略等方面进行了深入的研究。

本文的研究重点则是在风光互补发电系统中, 利用蓄电池和超级电容器的互补特性, 对混合储能单元的容量进行优化, 在考虑一次性投资最少、系统全年运行成本最低和综合费用最少等多目标函数前提下, 结合相应的约束条件, 利用遗传算法对目标函数进行求解, 并通

过某地区的一个实际算例系统, 对蓄电池-超级电容器混合储能单元的容量进行优化设计, 以此来提高可再生能源的利用效率。

1 风光互补发电系统的数学模型

1.1 风机发电单元

当分别以 v_i 、 v_m 、 v_H 、 v_T 、 P_N 分别表示当前风速、风机的启动风速、额定风速、停机风速以及额定功率, 设风力发电机在不同风速段的发电量分别为 $E_1(w)$ 和 $E_2(w)$, 则当月总发电量 $E(w)$ 为^[14]:

$$\begin{cases} E(w) = E_1(w) + E_2(w) \\ E_1(w) = \sum [P_N h_i (v_i / v_H)^3] & (v_m \leq v_i < v_H) \\ E_2(w) = P_N \sum h_i & (v_H \leq v_i < v_T) \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_i 为当月中与 v_i 相对应的小时数, h 。

1.2 光伏发电单元

设光伏电池组件的功率为 P_s , η 为光伏阵列的功率, 则电池组件的能量输出模型为^[15]:

$$E(s) = N \cdot P_s \cdot T_m \cdot \eta \quad (2)$$

式中, N 为当月天数, d ; T_m 为倾斜面上当月平均峰值日照时数, h/d 。

1.3 蓄电池模型

蓄电池采用 KiBaM 模型^[2], 该模型可以实时反映蓄电池容量与充、放电电流的关系。设蓄电池参考电压为 U , 负载需求功率为 P_d , 系统剩余功率为 P_e , 则有:

$$\text{放电电流: } I_d = P_d / U$$

$$\text{充电电流: } I_c = P_e / U$$

蓄电池的充电时间 t_c 和放电时间 t_d , 一般可以按照

(3) 和 (4) 计算:

$$t_c = 1.2 \times Q / I_c \quad (3)$$

投稿日期: 2010-10-23 修订日期: 2011-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50607002, 50837001); 教育部留学回国人员科研启动基金项目。

作者简介: 吴红斌 (1972-), 男, 湖北鄂州人, 博士, 研究员, 主要研究方向为分布式发电技术、电力系统安全性分析。合肥 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 230009。Email: hfwuhongbin@163.com

$$t_d = Q / I_d \quad (4)$$

式中, Q 为蓄电池容量, kWh。

1.4 超级电容器模型

在超级电容器充放电时, 可以等效为理想电容器 C 与电阻 R_s 相串联的模型^[9], 如图 1 所示。图中, $U_c(t)$ 为超级电容器的电压; I_{s1} 、 I_{s2} 分别为超级电容器的充、放电电流。

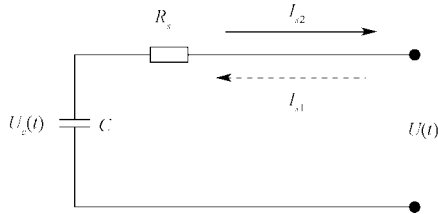


图 1 超级电容器等值电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of ultracapacitor

设 U_0 为电容器初始电压, $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 分别是电容器充电和放电时的电压值, 则电容器在充电和放电时, 其计算公式分别为 (5) 和 (6):

$$U_1(t) = U_c(t) + R_s \cdot I_{s1} = U_0 + \frac{1}{C} I_{s1}(t) + R_s \cdot I_{s1} \quad (5)$$

$$U_2(t) = U_c(t) - R_s \cdot I_{s2} = U_0 + \frac{1}{C} I_{s2}(t) - R_s \cdot I_{s2} \quad (6)$$

超级电容器充、放电时间可以分别按照 (7) 和 (8) 计算:

$$C \cdot dv = I_{s1} \cdot t \quad (7)$$

$$C \cdot dv - I_{s2} \cdot C \cdot R_s = I_{s2} \cdot t \quad (8)$$

式中, dv 为超级电容的端电压变化; t 为超级电容的充放电时间, h。

设 U_w 、 U_v 分别为电容充电完成与放电完成时的电压值, 则电容器存储的能量 W_u 可以表示为:

$$W_u = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_w^2 - U_v^2) \quad (9)$$

2 风光互补发电系统中混合储能单元的必要性

2.1 风光互补发电系统的电量平衡原则

在风光互补系统中配置风机、光伏阵列的容量时, 既要满足用户的负载需求, 又要使风光系统本身配置的容量最优。因此, 要求在全年电能的生产和使用过程中, 风力、光伏阵列所发电量之和应等于负载所需的电量^[15], 即风光互补发电系统本身要满足下述电量平衡原则:

$$E(w) + E(s) = E(l) \quad (10)$$

式中, $E(w)$ 为风力发电机的发电量, kWh; $E(s)$ 为光伏阵列的发电量, kWh; $E(l)$ 为负载所需电量, kWh。

2.2 风光互补系统混合储能单元的必要性

由于风机、光伏阵列以及负载的随机波动性, 即使在全年中风力发电、光伏阵列和负载之间满足公式 (10) 的要求, 针对每个月来说, 发电和用电之间可能存在不匹配的情况, 因此, 在这种情况下, 就必须考虑采用储

能单元, 在风光互补系统有发电盈余时, 将多余的电能储存在储能单元中; 在风光互补系统电能不足时, 利用储能单元发电来保证供电的连续性和可靠性。

如前所述, 考虑到蓄电池储能和超级电容储能的特点, 因此, 本文的储能单元也采取蓄电池-超级电容的储能混合, 来提高实现可再生能源的有效利用和保障供电的可靠性。

3 混合储能单元的容量优化模型

3.1 蓄电池-超级电容器的约束条件

在蓄电池-超级电容器混合储能的容量优化设计时, 必须考虑如下约束条件:

1) 蓄电池充、放电电流约束:

$$\begin{cases} 0 < I_c \leq I_{c \max} \\ 0 < I_d \leq I_{d \max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $I_{c \max}$ 为蓄电池最大可充电电流, A; $I_{d \max}$ 为蓄电池最大可放电电流, A。

2) 超级电容充、放电电流及端电压约束:

$$\begin{cases} 0 < I_s \leq I_{s \max} \\ 0 < U_1(t) \leq U_{\max} \\ U_{\min} \leq U_2(t) \leq U_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, U_{\min} 为超级电容器最低工作电压, V; U_{\max} 为超级电容最大可充电电压, V; $I_{s \max}$ 为超级电容最大充、放电电流, A。

3) 系统有发电盈余时保证储能单元能充至满容量, 设系统在第 i 个月有盈余, 此时对应的风、光和负荷电量分别为 $E_i(w)$ 、 $E_i(s)$ 和 $E_i(l)$, 则有:

$$E_i(w) + E_i(s) - E_i(l) \geq P_b + P_u \quad (13)$$

式中, P_b 为蓄电池的额定容量, kWh; P_u 为超级电容的额定容量, kWh。

4) 系统在发电量不足且不利条件 (如无风、无光) 发生时, 能保证负载的完全可靠供电。设系统在第 k 个月供能不足, 此时对应的风、光和负荷电量分别为 $E_k(w)$ 、 $E_k(s)$ 和 $E_k(l)$, 则有:

$$E_k(w) + E_k(s) + P_b + P_u \geq E_k(l) \quad (14)$$

在实际设计中, 以发电盈余量和亏损量最大的 2 个月来设计储能单元的容量, 就可以保证其余各月负荷的用电需求。

3.2 容量优化的目标函数

1) 目标函数 1: 储能单元的一次性投资最小:

$$\min C_1 = M_b P_b + M_u P_u \quad (15)$$

式中, M_b 为蓄电池的单价, 元/(w·h); M_u 为超级电容的单价, 元/F。

2) 目标函数 2: 系统全年运行成本最低:

$$\min C_2 = M_{OM} + M_{DC} \quad (16)$$

式中, M_{OM} 为发电单元运行管理成本, 光伏、风机、蓄电池、超级电容器分别取 0.0096、0.0296、0.0287 和 0.0866 元/kWh; M_{DC} 为发电单元与储能单元折旧成本, 光伏、

风机、蓄电池、超级电容器分别取 0.3425、0.2283、0.0006 和 0.00007 元/kWh。

3) 目标函数 3: 综合考虑系统一次性投资最少与全年系统运行管理成本最低:

$$\min C = C_1 + C_2 \quad (17)$$

3.3 算法流程

由于风能资源、光照强度及负荷的随机性，风光互补发电系统具有很强的非线性，用传统的方法难以进行优化，故本文采用遗传算法对混合储能系统的容量进行优化求解，以求得储能系统容量的最优值。算法求解流程如图 2 所示。

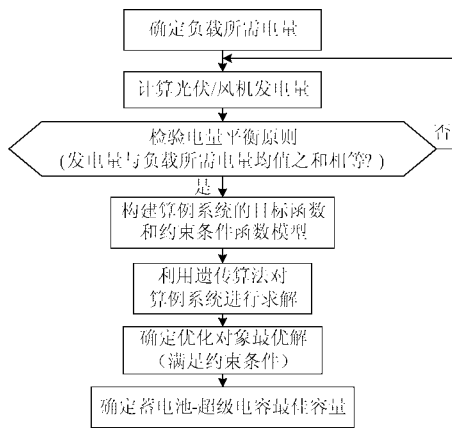


图 2 程序流程图
Fig.2 Flow chart

4 算例分析

4.1 算例系统

以某地区一光伏互补发电系统为例，负载耗电量为 9.5 kWh/d，图 3 是根据月平均风速得到的风机全年的输出功率，图 4 则是根据太阳峰值日照时数得到的光伏阵列输出功率。设蓄电池、超级电容器的单价分别 0.8 元/(W·h⁻¹)、0.14 元/F，蓄电池参考电压为 24V，超级电容器的 $U_w=2.5V$ ， $U_v=0.9V$ ， $R_s=0.02\Omega$ 。

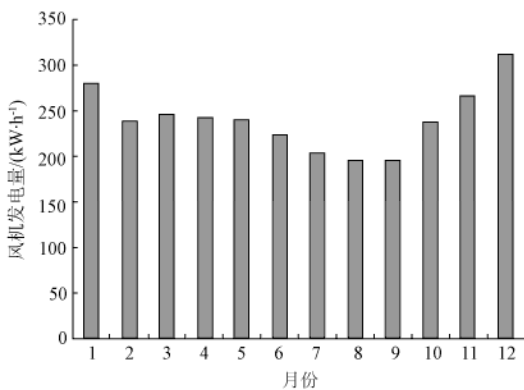


图 3 风机的输出功率
Fig.3 Output power of wind generation

控制蓄电池充、放电电流均为额定充电电流 I_b ，假定全年共完成 100 次的完全充放电过程。由于超级电容器的高功率密度，其不作为大容量的储能单元，只作为蓄

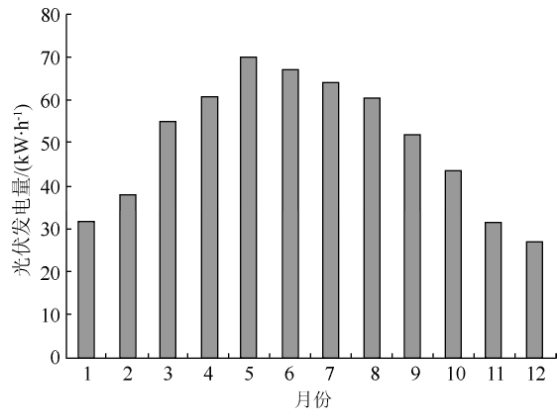


图 4 太阳能的输出功率
Fig.4 Output power of solar generation

电池的辅助单元，主要承担负载脉动时的瞬时最大功率，假设每次负载出现 10 s 的脉动为 $8I_b$ 的大电流，即为超级电容的放电电流 I_{s2} ，2 天内出现 5 次，全年共出现 913 次；又由于风能、太阳能输入能量的不稳定性和间歇性大等特性，在实际应用过程中是利用超级电容缓冲输入功率波动，因此假设最大波动电流为 $3I_b$ ，即为超级电容的充电电流 I_{s1} 。选取蓄电池额定充电电流 I_b 和超级电容额定容量 C 作为优化对象。

4.2 风光互补系统电量计算

根据图 3 和图 4 风能和太阳能的输出功率，以及负荷耗电量 9.5 kWh/d，如表 1 给出了全年发电量和负荷所需电量以及它们之间的差值。

表 1 全年发电量和负荷需求量
Table 1 Annual generated energy and load demand

| kWh | | | | |
|-----|--------|-------|-------|--------|
| 月份 | 风能 | 太阳能 | 负荷 | 盈亏量 |
| 1 | 277.68 | 31.39 | 294.5 | 14.57 |
| 2 | 238.56 | 37.88 | 266 | 10.44 |
| 3 | 243.40 | 54.87 | 285 | 13.27 |
| 4 | 240.41 | 60.63 | 285 | 16.04 |
| 5 | 238.52 | 69.93 | 294.5 | 13.95 |
| 6 | 222.29 | 67.07 | 285 | 4.36 |
| 7 | 208.89 | 65.03 | 294.5 | -20.58 |
| 8 | 205.86 | 62.02 | 285 | -17.12 |
| 9 | 205.73 | 59.92 | 285 | -19.35 |
| 10 | 236.32 | 43.69 | 294.5 | -14.49 |
| 11 | 265.42 | 31.47 | 285 | 11.89 |
| 12 | 310.71 | 26.74 | 294.5 | 42.95 |

风机与光伏阵列全年的发电量为 3264.02 kWh，月平均发电量均值为 272.002kWh，负载全年需电量为 3448.5kWh，月需电量为 287.375 kWh，基本满足式(10)规定的电量平衡原则，符合风光互补发电系统的优化设计要求，分布式电源的容量配置是合理的。

4.3 约束条件的计算

蓄电池与超级电容的充放电电流、端电压约束条件可以通过控制蓄电池充放电电流均为额定充电电流、超级电容器最大可充电电压为充电完成时的端电压来实

现，以下将重点阐述容量配置过程中的约束条件：

1) 发电最大盈余出现在第 12 月，为 42.95 kWh，即 1.385 kWh/d，要保证储能单元能充至满容量，则要求蓄电池与超级电容器的额定容量总和不能大于发电盈余量。蓄电池、超级电容器的额定容量均可用以放电电流来表示，当分别以 t_1 、 t_2 表示蓄电池、超级电容的放电时间，则根据式 (13) 可得以下约束式：

$$(I_b \cdot U \cdot t_1 + (U_2(t) \cdot I_{s2} \cdot t_2)) / 1000 \leq 1.385 \quad (18)$$

式中， t_1 为蓄电池放电时间，h，按式 (4) 进行计算； t_2 为超级电容放电时间，h，按式 (8) 计算； I_{s2} 为超级电容放电电流，A，取为 $8I_b$ ； U 为蓄电池参考电压，V，系统给定； $U_2(t)$ 为超级电容放电时的端电压值，V，按式 (6) 进行计算。

2) 在发电量最大不足且不利条件（如无风、无光）发生时保证负荷 2 d 的完全可靠供电，最大供能不足出现在第 7 月，为 20.58 kWh，即 0.664 kWh/d，则混合储能系统的最低储能为 $0.664 \times 2 = 1.328$ kWh，要保证负载的完全可靠供电，则要求以充电电流表示的蓄电池和超级电容器单元所充的能量不能小于发电亏损额，当分别以 t_3 、 t_4 表示蓄电池、超级电容的充电时间，则根据式 (14) 可得以下约束式：

$$(I_b \cdot U \cdot t_3 + (U_1(t) \cdot I_{s1} \cdot t_4)) / 1000 \geq 1.328 \quad (19)$$

式中， t_3 为蓄电池充电时间，h，按式 (3) 进行计算； t_4 为超级电容充电时间，h，按式 (7) 计算； I_{s1} 为超级电容充电电流，A，取为 $3I_b$ ； $U_1(t)$ 为超级电容充电时的端电压值，V，按式 (5) 进行计算。

综上所述，结合式 (18)、(19)，在优化配置过程中，总的约束条件为：

$$\begin{cases} (I_b \cdot U \cdot t_1 + (U_2(t) \cdot I_{s2} \cdot t_2)) / 1000 \leq 1.385 \\ (I_b \cdot U \cdot t_3 + (U_1(t) \cdot I_{s1} \cdot t_4)) / 1000 \geq 1.328 \end{cases} \quad (20)$$

4.4 算例系统的优化求解

根据目标函数 1、2 和 3，结合约束条件式 (20)，编制相关程序，利用遗传算法对蓄电池-超级电容器混合储能单元的容量进行优化，优化后的结果如表 2 所示。图 5 给出了采取目标函数 3 时遗传算法的寻优过程图。

表 2 各目标函数的费用
Table 2 Cost of objective functions

| 目标函数 | 优化结果 | | 投资费用 /元 | 运行费用 /元 | 总费用 /元 |
|------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | I_b /A | C /F | | | |
| 1 | 0.87188 | 238.7896 | 1 096.77 | 954.01 | 2 050.78 |
| 2 | 0.86932 | 238.0217 | 1 105.24 | 950.99 | 2 056.24 |
| 3 | 0.87381 | 239.3688 | 1 097.40 | 952.35 | 2 049.76 |

从表 2 可知，目标 1、2、3 分别取得了一次性投资最小、系统全年运行费用最小和综合总费用最小的结果。图 5 则是在仿真目标函数 3 的前提下，所计算出的综合总费用随着遗传代数的增加而不断降低，最后趋于稳定的过程，从而证明了模型及算法的可行性。

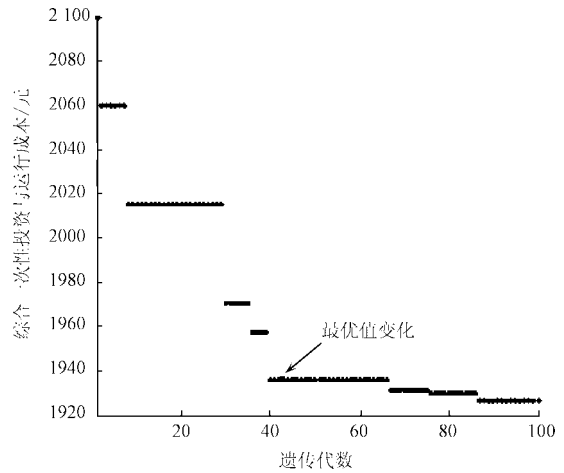


图 5 遗传算法寻优过程
Fig.5 Genetic algorithm optimizing process

5 结 论

本文将蓄电池和超级电容器同时作为储能单元进行容量的组合优化设计，并应用遗传算法进行求解计算。通过对算例系统的求解，证明了文中所建立的模型和算法的正确性。在风光互补发电系统中，通过对混合储能单元的容量进行优化，可以最大限度地利用可再生能源以满足负荷的需求。同时，通过对混合储能单元进行容量配置设计，也可以降低储能单元的投资成本和运行费用。研究表明，本文提出的模型和算法为风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化提供了参考。

[参 考 文 献]

- [1] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓璞, 等. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-18.
- [2] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽, 等. 风/光复合发电系统变结构仿真建模研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 361-364. Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. Research on variable structure simulation modeling for wind-solar hybrid power systems[J]. Journal of System Simulation. 2003, 15(3): 361-364. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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. Multi-objective optimization of hybrid PV/wind power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 86-90. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张帆, 蔡壮, 杨明皓. 基于随机机会约束规划的农村风/水/光伏发电容量配置[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 267-271. Zhang Fan, Cai Zhuang, Yang Minghao. Capacity allocation of rural hybrid generating system based on stochastic chance constrained programming[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 267-271. (in Chinese with English abstract)
- [5] Raid Chedid, Saifur Rahman. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(1): 79-85.

- [6] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9 (in Chinese with English abstract)
- [7] 程华, 徐政. 分布式发电中的储能技术[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 53-56.
Cheng Hua, Xu Zheng. Energy storage for use with distribution power generation[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 53-56. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
Chen Wei, Shi Jing, Ren Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems. 2010, 34(1): 112-115. (in Chinese with English abstract)
- [9] Dougal R A, Shengyi Liu, Ralph E. White power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-131.
- [10] Garcia F S, Ferreira A A, Pomilio J A. Control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2009, 826-832.
- [11] Glavin M E, Hurley W G. Ultracapacitor/battery hybrid for solar energy storage[C]//IEEE Universities Power Engineering Conference, 2007, 791-795.
- [12] 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): 26-31.
Zhang Dandan, Luo Man, Chen Chen, et al. Experimental study on composite power source of supercapacitor-battery[J]. Proceedings of the CSEE. 2007, 27(30): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [13] 唐西胜, 齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 37-41.
Tang Xisheng, Qi Zhiping. Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy. 2006, 25(3): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王承煦. 风力发电实用技术[M]. 北京: 金盾出版社, 1999: 51-52.
- [15] 谈蓓月, 杨金焕, 李康弟. 改进风/光互补发电系统优化设计的新方法[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 893-897.
Tan Beiyue, Yang Jinhuan, Li Kangdi. Novel method for optimizing design of hybrid wind/photovoltaic generation system[J]. East China Electric Power, 2005, 33(12): 893-897. (in Chinese with English abstract)

Capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system

Wu Hongbin, Chen Bin, Guo Caiyun

(Photovoltaic System Research Center of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Through allocating suitable capacity of battery-ultracapacitor hybrid storage unit, the continuity and reliability of wind-solar complementary generation system could be improved. Based on the steady-state models of wind power, solar power, battery and ultracapacitor, the capacity optimization model of the battery-ultracapacitor hybrid system was established in this paper. Considering various constraints, the multi-objective optimization functions of battery-ultracapacitor hybrid system were proposed and solved with the genetic algorithm. With the example system, it demonstrated the correctness and validity of the proposed models and algorithms. The method can provide a reference for the capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system.

Key words: wind-solar complementary generating system, hybrid energy storage, battery, ultracapacitor, capacity optimization, genetic algorithm