

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.024

双速循环水泵冷端系统优化及时间递推分析

马 洁¹, 孙永平², 盛德仁^{1*}, 吴文健², 李 蔚¹, 陈坚红¹

(1. 浙江大学 热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江省电力公司 电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为探究双速泵循环水系统优化运行问题,对冷端系统模拟工况计算模型进行了分析,建立了在一定循环水进口温度与不同负荷、不同循环水泵运行方式下的功率收益及费用收益通用特性曲线;另外,为避免水泵启停以及高低速切换过于频繁,提出了时间递推优化模型,利用前一天的综合功率收益、费用收益来预测后一天的循环水泵优化方案。最后,以某电厂 600 MW 机组为例,利用以上分析模型进行了计算。研究结果表明:经优化后的综合机组功率收益可达 1 699.39 kW,运行费用收益可达每小时 658.26 元。

关键词: 循环水系统; 双速泵; 优化; 时间递推

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0349-05

Optimal operation and time recursion analysis of two-speed circulating water pump unit

MA Jie¹, SUN Yong-ping², SHENG De-ren¹, WU Wen-jian², LI Wei¹, CHEN Jian-hong¹

(1. Institute of Thermal Science and Power System, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute, Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of the optimization of two-speed circulating water pump unit, an optimization model of the cold end system under the simulation working condition was investigated with the analysis of the general features of power income and expense income in a certain circulating water inlet temperature, different load and different water circulating pump operation. Otherwise, to avoid the frequency of water pump's powering on, powering off and switching between high and low speed, a time recursion optimization model was put forward, which can predict the optimal operation mode a day after using the comprehensive power income and expense income the day before. Taking a 600 MW power plant as an example, it was calculated using these two models. The results indicate that the comprehensive power income is up to 1 699.39 kW and the comprehensive expense income is up to 658.26 Yuan per hour.

Key words: circulating water system; two-speed pump; optimization; time recursion

0 引 言

循环水系统的优化运行是指在满足凝汽器最佳水量的前提下,寻找最优的并联水泵运行组合和调速比,使整个泵组处于最优运行状态,以提高火电厂的经济效益^[1]。对于在 100% 额定负荷运行时的 600 MW 机组,采用优化计算之后的电能收益高达 1 482 kW,占主机功率的 0.25%^[2]。长期以来许多发电厂都非常

重视循环水系统的优化运行,并提出和采用了一些优化方案,也取得了一定的经济效益^[3-7]。

笔者从经济性角度出发,以某电厂 600 MW 机组为例,建立循环水系统模拟工况计算模型,以功率收益及费用收益作为目标函数,阐述微增功率和循环水泵耗功的计算过程,考虑到机组经过双速改造后,循环水泵的运行方式更多,采用传统的等效效益曲线图^[8-9]不能直观与定量地反映最佳运行方式,为此本研究提

收稿日期: 2012-11-16

作者简介: 马 洁(1989-),女,江苏靖江人,主要从事火电及核电厂热力性能计算等方面的研究。E-mail: 21027079@zju.edu.cn

通信联系人: 盛德仁,男,教授。E-mail: shengdr@zju.edu.cn

出绘制一定循环水进口温度下,不同负荷、不同循环水泵运行方式下功率收益及费用收益的系列通用曲线图。另一方面,水泵的频繁启停将对泵本体、机械密封装置、出口逆止门等造成一定的损伤,且对于双速泵,高低速的切换需要停机操作,频繁切换会影响电厂的经济性和安全性,因此笔者提出时间递推优化模型,将前一天内的机组功率收益、费用收益进行累加排序,以预测指导后一天的循环水泵优化方案,并保证每天循环水泵启停与切换次数不超过一次。

1 循环水系统模拟工况计算模型

模拟工况计算模型是指以实时运行工况的参数为基础,修改其中可调参数(循环水泵台数、叶角、循环水出口门等),进行模拟计算,以得出同一循环水进口温度、不同可调参数下运行耗差变化情况。以某电厂600 MW机组为例,模拟工况所需要的运行参数主要包括:发电机输出功率、进入低压凝汽器排汽温度、进入高压凝汽器排汽温度、凝汽器热井出口凝结水温度、低压凝汽器循环水进口温度、高压凝汽器循环水出口温度。其可调参数为循环水泵组合。

1.1 目标函数

1.1.1 功率收益

通过增加循环水量虽然可使机组电功率增加,但同时循环水泵的耗功率也要增加。当改变循环水量使机组电功率微增值 ΔP_e 与循环水泵所耗功率的增加值 ΔP_p 之间的差值达到最大时,所对应的真空称为最佳真空。机组最大功率收益 $\Delta P_{\max}$ 为:

$$\Delta P_{\max} = \Delta P_e - \Delta P_p \quad (1)$$

1.1.2 费用收益

近年来,随着电力体制的改革深入以及电力调度自动化程度的提高,最优化目标逐渐由机组煤耗率最小化转变为市场经济时期追求企业利润的最大化^[10]。对于给定机组,在机组负荷和循环水温等内外部条件一定的情况下,通过寻求最优的循环水泵运行组合、叶角开度等调整目标,以使综合利润最大化的方法,称为费用收益法。

本研究将发电增量折算成煤耗成本 ΔC_m ,泵耗功增量折算成电价费用 ΔC_d ,煤耗成本与电价费用之差达到最大所对应的循环水量即为最佳值,即:

$$\Delta C_{\max} = \Delta C_m - \Delta C_d = \Delta P_e \cdot c_b \cdot b_p - \Delta P_p \cdot c_p \quad (2)$$

式中: c_b —标准煤价,元/t; b_p —供电煤耗率,kg/(kW·h); c_p —上网电价,元/t。

1.2 变工况下机组微增功率的确定

在某一新蒸汽参数和流量下汽轮机输出的功率与排汽压力的关系称为汽轮机特性。汽轮机制造厂

通过变工况理论逐级计算绘制排汽压力对功率的修正曲线并提供给用户,对于通流部分未进行改造和系统变更的机组,可利用该法确定汽轮机特性。

1.2.1 凝汽器热负荷

凝汽器热负荷的计算采用理论计算与精确热力试验相结合的方法,根据试验所得热耗率修正曲线计算变工况下机组热耗率,进而求得凝汽器热负荷,更贴近机组实际运行情况。

由机组负荷求热耗率,其拟合公式为:

$$r_0 = 2.374 \ 8 \times 10^{-3} P_e^2 - 3.872 \ 3 P_e + 9 \ 218.9 \quad (3)$$

式中: P_e —机组功率,MW。

当机组排汽压力偏离额定工况时,热耗率也会发生变化,当排汽压力低于额定工况时,排汽压力修正系数为正,则热耗率增加,反之亦然。

50%和100%负荷工况下,排汽压力对热耗率修正系数拟合公式分别为:

$$\Delta r_{50\%} = 1.875 \ 8 \times 10^{-2} p_0^2 - 1.330 \ 3 p_0 + 6.803 \ 8 \quad (4)$$

$$\Delta r_{100\%} = -8.896 \ 4 \times 10^{-3} p_0^2 - 0.710 \ 3 p_0 + 4.478 \ 1 \quad (5)$$

式中: P_e —排汽压力,kPa。

其他负荷工况下的修正系数可通过插值法获得。当负荷为 $m\%$ 时,热耗率修正拟合公式为:

$$\Delta r_{m\%} = \frac{\Delta r_{100\%} - \Delta r_{50\%}}{50} \cdot (m - 50) + \Delta r_{50\%} \quad (6)$$

由式(3,6)得修正后热耗率为:

$$r = r_0 \cdot (1 + 0.01 \cdot \Delta r_{m\%}) \quad (7)$$

由能量平衡,可得出排入凝汽器的热量为:

$$Q_{\text{tur}} = P_0 \cdot r - P_0 \cdot 3 \ 600 / (\eta_m \eta_g) - D_h \cdot h_h \quad (8)$$

式中: η_m —机械效率,%; η_g —发电机效率,%; D_{heat} —供热流量,t/h; h_{heat} —供热抽汽焓值,kJ/kg。

凝汽器热负荷 Q 为:

$$Q = Q_{\text{tur}} - D_s \cdot h_c' \quad (9)$$

式中: D_s —进入凝汽器的低压缸排汽流量,t/h; h_c' —凝结水比焓,kJ/kg。

研究者运用实时工况下的参数,通过计算凝汽器负荷可求得凝汽器清洁系数,在仿真工况计算中,通过凝汽器热负荷,迭代计算机组功率。

1.2.2 循环水流量

本研究根据循环水泵叶角开度、管路阀门开度以及循环水泵运行方式所对应的循环水泵性能曲线和管路性能曲线取交点,即为循环水泵工作状态点。以2机4泵小母管制循环水系统为例,循环泵经过双速改造,其运行方式有8种组合。循环水泵运行工况的计算过程更为复杂,但原理基本不变,即扬程保持不变、流量叠加的原则。循环水泵运行工况如图1所示,研究者根据图1即可求得各运行方式下对应的工作状态点。

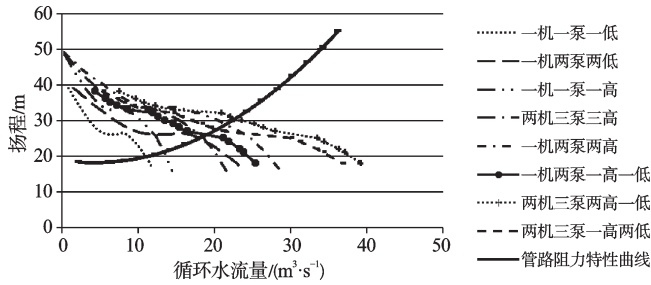


图1 循环水泵运行工况

1.2.3 排汽压力的计算

凝汽器压力由与之对应的饱和蒸汽温度 t_s 决定。饱和蒸汽温度计算方法如下式:

$$t_s = t_{w1} + \Delta t + \delta t \quad (10)$$

式中: t_{w1} — 循环水进口温度, $^{\circ}\text{C}$; Δt — 循环水温升, $^{\circ}\text{C}$; δt — 凝汽器传热端差, $^{\circ}\text{C}$ 。

该算例中采用双背压凝汽器,需要对高低压凝汽器分别进行饱和蒸汽温度的计算,具体计算过程可参考文献[11-12]。

1.3 变工况下循环水泵耗功增量的确定

根据泵类机械流体相似原理,已知制造厂提供的高速循环水泵功率特性曲线,可求得低速状况下功率特性曲线,根据循环水泵运行方式及循环水流量,即可求得循环水泵耗功增量 ΔP_p 。

1.4 循环水泵最佳运行方式的流程确定

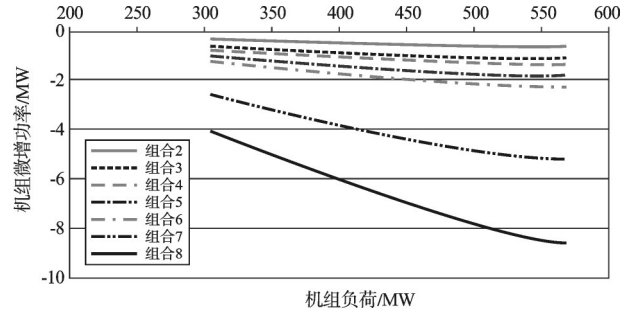
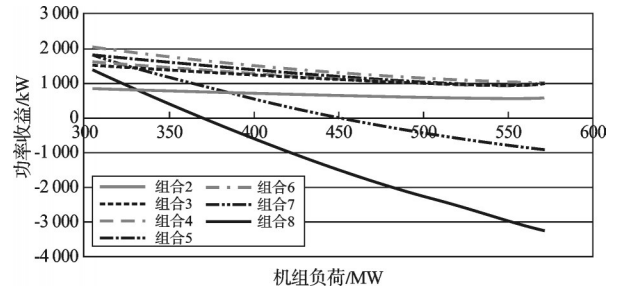
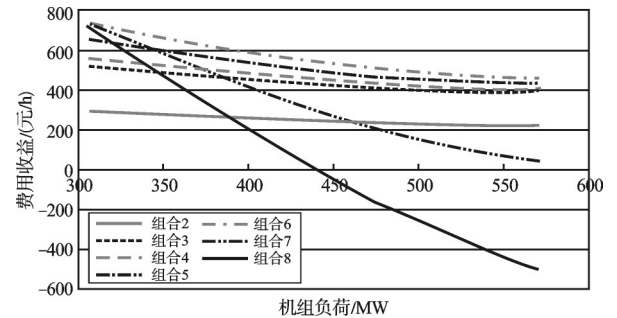
在同一仿真模型计算中,本研究认为凝汽器的清洁系数不发生变化,清洁系数可由输入的实时工况计算求得。实时工况的机组功率和凝汽器热负荷作为修改可调参数后第一次迭代的初值。本研究保持循环水进口温度一定,改变机组负荷以及循泵运行方式,重复以上计算,得出机组微增功率、功率收益以及费用收益随机组负荷的变化,并给出最优排列。

管理人员可根据当前循环水进口温度,查找相对应收益曲线(如图2~4所示,基准工况为组合1,即一机两泵一两高速泵),从而选定循环水泵最佳运行方式。

2 时间递推优化指导模型

双速改造仅改变定子绕组的接线方式,不添置和改变任何设备,即可达到两种速度。其相对于其他调速方式具有改造投资小、维护运行保养方便、可靠性高等优势,但缺点是需停泵进行切换。

由于机组参与的调峰状况偏多,循环水泵启停与高、低速切换都需要一定的操作时间,实际操作过程中不可能在不同负荷、不同进水温度间不停地切换组合;另一方面,水泵的频繁启停也将对泵本体、机械密封装置、出口逆止门等造成一定的损伤。为此本研究提出时间递推优化指导模型。

图2 循环水入口温度 24.6 $^{\circ}\text{C}$ 时的微增功率曲线图图3 循环水入口温度 24.6 $^{\circ}\text{C}$ 时的功率收益曲线图图4 循环水入口温度 24.6 $^{\circ}\text{C}$ 时的费用收益曲线图

由于机组负荷与循环水进口温度于前后两天不同时间段内相差不太大,本研究以一天作为时间单元,利用时间递推优化指导模型,结合冷端系统运行参数的变化特性,根据前一天内的综合功率收益以及费用收益,合理地预估今天的最合理的循环水泵切换运行方式,再根据当天的机组负荷和循环水温情况计算综合功率收益以及费用收益,用于预测后一天最经济的循环水泵组合,依次递推。

某 600 MW 机组在一天 24 h 内典型时段的运行参数如表 2 所示。本研究根据不同时间点的运行工况数据计算该工况下功率收益与费用收益,可得到一天内不同循环水泵运行方式下的功率收益与费用收益走势图,如图 5、图 6 所示。笔者将 24 h 内不同时刻的功率收益和费用收益进行积分求和取平均,即可得到一天内不同循环水运行方式下的机组综合功率收益 $\Delta \bar{P}$ 及综合费用收益 $\Delta \bar{C}$:

$$\Delta \bar{P} = \frac{\sum_{i=0}^{24} ((\Delta P_e - \Delta P_p) \Delta t)}{\sum_{i=0}^{24} \Delta t} = \frac{\sum_{i=0}^{24} (\Delta P \cdot \Delta t)}{\sum_{i=0}^{24} \Delta t} \quad (11)$$

表2 某600 MW机组24 h运行参数(典型时段)

时间	发电机输出功率/MW	高压凝汽器排汽温度/℃	低压凝汽器排汽温度/℃	凝汽器热井出口温度/℃	循环水出口温度/℃	循环水进口温度/℃
6:00	356.6	34.83	31.28	34.69	32.44	24.07
9:00	482.2	36.47	31.70	36.05	33.44	22.70
12:00	589.7	36.11	32.28	35.93	32.21	23.36
18:00	540.6	38.94	33.53	38.54	35.66	23.68
21:00	440.8	35.29	31.09	35.15	32.25	22.10
24:00	293.6	28.26	25.72	28.21	25.52	17.18

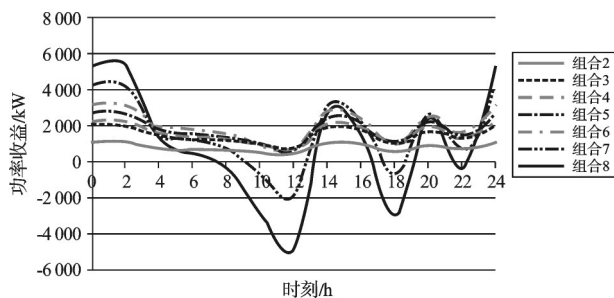


图5 一天内某机组功率收益曲线图

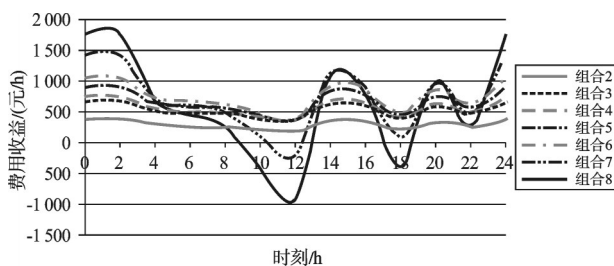


图6 一天内某机组费用收益曲线图

$$\Delta \bar{C} = \frac{\sum_{0}^{24} (\Delta C_m - \Delta C_d) \Delta t}{\sum_{0}^{24} \Delta t} = \frac{\sum_{0}^{24} (\Delta C \cdot \Delta t)}{\sum_{0}^{24} \Delta t} \quad (12)$$

式中: ΔP_e —机组微增功率, kW; ΔP_p —循环水泵所耗功率的增量, kW; ΔP —功率收益, kW; ΔC_m —煤耗成本增量, 元/h; ΔC_d —电价费用增量, 元/h; ΔC —费用收益, 元/h。

本研究将一天内不同循环水运行方式下的机组综合功率收益 $\Delta \bar{P}$ 及综合费用收益 $\Delta \bar{C}$ 进行优化排序, 可用于预估指导当天最合理的循环水泵运行方式。笔者对上文600 MW机组进行时间递推指导优化模型计算, 其最优组合排序结果如表3所示。

3 计算实例

3.1 机组介绍

某电厂4台600 MW超临界燃煤发电机组, 凝汽器为N-37000A型单流程双背压凝汽器, 循环水泵经双速改造后高、低速分别为370 r/min与330 r/min。循环水泵的运行方式总共有8种组合, 其循环水流量、循环耗功等参数如表4所示。

表3 某600 MW机组一天内时间递推模型计算结果

功率收益最优排列	对应功率收益值/kW	费用收益最优排列	对应费用收益值/(元/h)
组合6	1 699.39	组合6	658.26
组合5	1 555.24	组合5	592.62
组合4	1 405.55	组合4	521.92
组合3	1 343.67	组合7	511.84
组合7	859.28	组合3	490.72
组合2	753.51	组合8	277.21
组合1	0	组合2	275.36
组合8	-301.45	组合1	0

表4 机组双速运行循环泵相关参数

名称	循环组合	凝汽器循环水流量/(t·h ⁻¹)	循环泵综合耗功/kW	循环泵扬程/m
组合1	一机两泵两高	72 280.49	7950	27.99
组合2	一机两泵一高一低	65 936.72	6 794.67	25.48
组合3	两机三泵三高	62 066.43	5 895.01	24.55
组合4	一机两泵两低	60 301.49	5 670.5	24.02
组合5	两机三泵两高一低	57 225.72	5 201.19	22.86
组合6	两机三泵一高一低	54 963.74	4 785.32	22.25
组合7	一机一泵一高	44 093.80	3 657.89	19.41
组合8	一机一泵一低	37 282.81	2 587.44	17.85

3.2 结果分析

3.2.1 模拟工况计算结果

本研究对600 MW汽轮机进行冷端系统优化计算, 根据试验期间实测所得该电厂机组的实际运行数据, 通过改变循环泵运行方式改变循环水流量, 以组合1(一机两泵两高)作为基准工况, 利用循环水系统模拟工况模型计算, 从而得出机组微增功率、功率收益以及费用收益随机组负荷的变化曲线(如图2~4所示), 即在同一循环水入口温度24.6℃、不同机组负荷下的计算结果。

图2中, 机组的微增功率随着机组负荷的增加而减小, 其中, 组合7与组合8方式下随着负荷的增加微增功率减小的幅度最大; 组合2方式下, 在负荷变化中

微增功率一直保持最大,组合8方式则最小。

由图3、图4可看出,采用费用收益与功率收益的寻优结果较为接近,只有当标准煤价与上网电价发生较大变化时,曲线才会发生一些整体偏移。当标准煤价上涨幅度较大时,应考虑通过增加循环水流量、降低汽轮机背压来增加机组发电量;而当上网电价上调幅度较大时,应考虑通过减少循泵耗功来降低厂用电。

3.2.2 时间递推优化指导结果

该电厂进行时间递推优化后的排序结果如表3所示,本研究将前一天8种循环水泵组合方式下的机组功率收益、费用收益进行累加排序,预测后一天循环水泵最优组合运行方式。由计算结果可得,组合6的综合机组功率收益为1 699.39 kW,运行费用收益为658.26元/h,为最优循环水泵运行方式。

4 结束语

本研究对双速循环水泵模拟工况冷端系统优化模型进行了分析,介绍了判断指标,并采用费用收益作为冷端系统优化模型的目标函数,考虑了煤和电不同能量价值后的综合价值后的综合煤耗成本,与功率收益相比更加科学。

为了避免循环水泵频繁起停和切换,本研究提出了时间递推优化指导模型,得出一天内的综合功率收益以及费用收益,能够更好地指导管理人员选择最优循泵组合。最后,本研究针对某电厂600 MW机组进行计算,给出8种循环水泵运行方式下的机组功率收益和运行收益的排列,以方便运行人员选择最优的循环水泵运行方式,同时也可以根据前一天的气温条件

和负荷运行情况预测当天的循环水泵最优组合,更符合实际应用情况。

参考文献(References):

- [1] 夏东伟,张承慧,石庆升. 电厂循环水系统优化控制及其遗传算法求解[J]. 山东大学学报,2005,35(2):50-54.
- [2] 楼可炜,孙永平,秦 攀,等. 600MW 机组循环水泵最佳运行方式的确定方法[J]. 浙江电力,2011,30(9):47-50.
- [3] 李秀云,严俊杰,林万超. 火电厂冷端系统评价指标及诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(9):94-98.
- [4] 石 涛,孙永平,朱朝阳,等. 母管制双速循环水泵冷端系统的运行优化[J]. 动力工程学报,2011,31(4):285-289,311.
- [5] 张志刚,王 玮,曾德良,等. 冷却塔出塔水温的迭代计算方法[J]. 动力工程学报,2010,30(5):372-377.
- [6] 李 勇,曹丽华,赵金峰,等. 考虑更多因素的凝汽器最佳真空确定方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(4):71-75.
- [7] 王 玮,曾德良,杨婷婷,等. 基于凝汽器压力估计算法的循环水泵最优运行[J]. 中国电机工程学报,2010,30(14):7-12.
- [8] 刘吉臻,王 玮,曾德良,等. 火电机组定速循环水泵的全工况运行优化[J]. 动力工程学报,2011,31(9):682-688.
- [9] 焦玉香,冯永和. 循环水泵节能改造[J]. 机械,2012,39(4):86-88.
- [10] 肖增弘,董立羽,王 雷. 广义经济调度模型下火电厂循环水系统的优化运行及可视化实现[J]. 电力技术经济,2008,20(6):43-46.
- [11] 曾德良,王 玮,刘吉臻,等. 双压凝汽器闭式循环水系统的最优运行方式[J]. 热能动力工程,2011,26(2):171-175,252.
- [12] 葛晓霞,缪国钧,钟 澎,等. 双压凝汽器循环水系统的优化运行[J]. 动力工程,2009,29(4):389-393.

[编辑:李 辉]

(上接第348页)

- [5] SALAS V, ALONSO-ABELLA M, CHENLO F, et al. Analysis of the maximum power point tracking in the photovoltaic grid inverters of 5 kW[J]. **Renewable Energy**, 2009, 34(11):2366-2372.
- [6] KONDO P V, KAMEJIMA Y, MASAFUMI T M. Verification of Efficacy of the Improved PSO-based MPPT Controlling Multiple Photovoltaic Arrays, Power Electronics and Drive Systems (PEDS) [C]//2011 IEEE Ninth International Conference on, 2011:1015-1019.
- [7] 岑长岸,张 森,王丽琼. 光伏阵列的组态优化控制[J]. 控制理论与应用,2008,25(4):364-366.
- [8] TADAO S I. Grid-connected photovoltaic power systems:

survey of inverter and related protection equipments [J]. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 2006, 90(15):2501-2508.

- [9] 耿爱玲,孙佩石. 光伏并网群控系统设计与效率分析研究[J]. 低压电器,2011(13):20-23.
- [10] 刘 翼. 基于Simulink的光伏电池组件建模和MPPT仿真研究[J]. 节能减排,2010,28(18):94-97.
- [11] 方 廷,韩 郁,张 岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源,2009,25(7):57-60.

[编辑:罗向阳]