

# 光伏发电系统中无电流传感器型 MPPT 控制策略

王盼宝,王 卫,吴 炎

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 依据双级式光伏并网逆变器前后级解耦控制的特点,提出一种无电流传感器型最大功率点跟踪(MPPT)控制策略。利用双级式光伏并网逆变器前后级功率平衡原理,通过从后级逆变环节获取的并网电流给定值作为前级 DC-DC 环节的 MPPT 判断条件,进而采用扰动观察法完成 MPPT。对该 MPPT 控制策略的原理进行了分析。设计了一台 800 W 双级式光伏并网逆变器实验样机,并记录了实验波形和 MPPT 情况。实验结果显示,在系统运行功率大于 300 W 时,MPPT 效率大于 99.2% 且响应速度良好,验证了该无电流传感器型 MPPT 控制策略的可行性和有效性。

**关键词:** 最大功率点跟踪; 电流传感器; 并网; 逆变器; 光伏; 发电; 控制

**中图分类号:** TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.010

## 0 引言

光伏发电作为一种清洁、可持续发展的绿色能源越来越多地受到各国青睐。中国近年来成为光伏电池生产第一大国,并非常重视光伏发电的应用。截止到 2012 年底,我国光伏发电累计核准(备案)达到 17 980 MW,并网 6 500 MW,并网容量位列世界第五。而根据我国工业和信息化部发布的《太阳能光伏产业“十二五”发展规划》中的数据,到 2015 年,我国光伏发电成本将下降到 0.8 元/(kW·h),光伏发电将具有一定的经济竞争力;到 2020 年,发电成本将下降到 0.6 元/(kW·h),将在主要电力市场实现有效竞争。规划中还提到,要促进光伏产品应用,扩大光伏发电市场,掌握光伏发电系统的集成技术。

光伏发电系统通常可划分为离网型和并网型 2 种<sup>[1]</sup>。由于离网型没有电网支撑,当晚上光伏阵列无法发出电能时需要由储能装置向负载提供能量。并网型光伏发电系统输出端直接与电网相连,因此本地负载所需的能量可由电网、光伏并网发电系统两者分别或同时提供<sup>[2]</sup>。在光伏并网发电系统发出能量满足本地负载仍有余量时,多余的能量可向电网馈入。这就要求并网型光伏发电系统随时以光伏阵列发出的最大功率进行能量转换<sup>[3]</sup>。

在中小功率光伏并网发电系统中,使用的光伏阵列输出电压往往较低,而为了满足并网侧电压需要,逆变电路直流侧电压通常在 400 V 左右,因此可在两者之间引入 Boost 变换器进行升压<sup>[4]</sup>。光伏阵列在特定光照和温度环境下,随着输出电压的变化,存在着一个最大输出功率工作点 MPP(Maximum Power Point)<sup>[5]</sup>,因此这个 DC-DC 环节可在升压的同时完成

对光伏阵列的最大功率点跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking)<sup>[6]</sup>。

传统的 MPPT 算法需要同时使用光伏阵列的电压和电流信息。近年来基于单变量(电压或电流)的 MPPT 算法受到关注,减少 1 个传感器不仅可简化设计,还可降低系统成本。文献[7]介绍了一种只使用电流传感器的光伏发电系统 MPPT 算法,通过光伏阵列输出电流与开关管占空比  $D$  之间的关系实现 MPPT。文献[8]利用光伏阵列特性曲线峰值点处功率与占空比的导数为零的特点,得到该点电流与占空比导数也为零的结论,并利用该结论设计只使用电流传感器的 MPPT 算法,但该算法需要计算导数,且对传感器精度要求较高。以上 2 种方法节约了光伏输入侧的电压传感器,但是在实际应用中,光伏阵列的电压信息需要显示出来,所以仍然需要电压传感器,同时电流传感器的成本往往比电压传感器要高很多,因此实际意义不大。文献[9]只使用电压传感器进行 MPPT 设计,通过当前光伏阵列电压和开关管占空比信息对光伏阵列功率变化值进行反推,进而利用扰动观察法实现 MPPT。

本文介绍了一种只使用电压传感器的单变量 MPPT 算法,并利用双级式光伏并网逆变器结构进行功率推导,在简化系统设计的同时,有利于降低系统成本。

## 1 MPPT 原理

光伏阵列的最大功率输出特性是由于串并联其中的光伏电池特性造成的,输出功率与电压曲线呈抛物线形状,并受到光照强度、环境温度等因素影响,表现出非线性特点<sup>[10-12]</sup>。

MPPT 可分为在线跟踪和离线跟踪 2 种,常用的在线跟踪方法有扰动观察法、电导增量法等<sup>[13]</sup>。扰动观察法<sup>[14]</sup>实时对比光伏阵列的输出功率变化,通过

收稿日期:2013-12-23;修回日期:2014-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077017)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077017)

调节光伏阵列的输出电压实现光伏阵列的输出功率调节。图 1 为采用扰动观察法的传统 MPPT 控制框图,需要实时采集光伏阵列的输出电压、电流,经过计算功率,对比调节前后的功率变化与电压变化得出 DC-DC 变换器的给定电压。

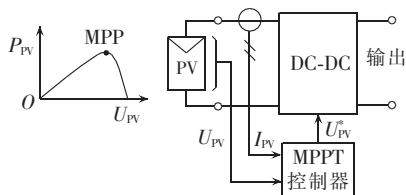


图 1 传统 MPPT 控制框图

Fig.1 Block diagram of traditional MPPT control

从上面分析可以看出,扰动观察法中光伏阵列的电流信息主要是用来与电压信息相乘得到功率信息。双级式光伏并网逆变器输出功率与输入功率的关系为:

$$P_{OUT} = \eta_1 \eta_2 P_{IN} \quad (1)$$

其中,  $P_{OUT}$  和  $P_{IN}$  分别为逆变器输出与输入功率;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为前级 DC-DC 变换器和后级 DC-AC 逆变器的转换效率。

那么,如果使用逆变器输出功率信息作为 MPPT 的判断标准,就能省略 DC-DC 的电流传感器,本文就是基于以上思想设计 MPPT 及其整体控制策略。

## 2 系统组成与整体控制策略

### 2.1 双级式光伏并网发电系统组成

图 2 是双级式光伏并网发电系统的体系结构示意图。光伏阵列发出的直流电经 DC-DC 变换、DC-AC 逆变后,再通过 LC 结构滤波器滤除 SPWM 产生的高频谐波,并经过一个 1:1 的工频隔离变压器后送至电网。其中,LC 滤波器采用 2 个电感串联的形式,可有效降低其寄生电容;工频隔离变压器可以滤除并网电流中的直流分量,并起到电气隔离作用,可提高系统的安全性。

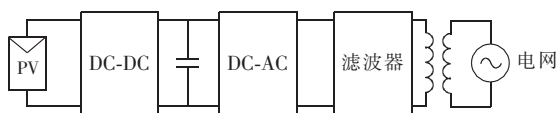


图 2 双级式光伏并网发电系统体系结构

Fig.2 Architecture of two-stage grid-connected photovoltaic system

在系统的运行中,该控制策略实现了光伏并网逆变器前后级能量传递的动态平衡,并通过直流母线电容进行缓冲。当光伏阵列发出的能量减少时,直流母线电压降低,系统后级的电压外环为了稳定母线电压在设定值,则减小电流内环的给定值,此时并网电流减小,母线电压得以提高。同理,当光伏阵列发出的能量变大时,并网电流也将相应地增大。

### 2.2 无电流传感器的 MPPT 整体控制策略

基于以上分析,本文提出了一种改进的双级式光伏并网逆变器控制策略。根据典型双级式光伏并网逆变器的控制原理,系统后级 DC-AC 环节内环电流给定幅值  $I_{amp}^*$  能够以直流量的形式反映并网电流的大小,而系统的 DC-AC 输出与电网并联,其输出电压被电网钳位于 220 V 左右,故并网电流有效值与输出功率成正比关系。根据光伏并网逆变器输入输出功率动态平衡关系,可知  $I_{amp}^*$  能够实时反映出光伏阵列输出功率的大小。因此,可用  $I_{amp}^*$  代替传统双级式控制策略中的光伏输出功率作为 MPPT 控制算法的功率参考值,从而可省略掉 DC-DC 变换器中光伏阵列输出电流采样环节。

图 3 为通过串口传输到上位机的系统控制器中的电流给定幅值  $I_{amp}^*$  在平均处理前后的数字量波形。从图中可观察到,在处理前电流给定幅值上存在一定的波动,如果 MPPT 算法直接采用该变量值,可能会出现判断错误而造成跟踪偏差,因此需要对其进行处理。在每个电网周期对该量进行平均计算后,从图中可以看出处理后的变量  $I_{avg}^*$  波形平滑稳定,从而保证 MPPT 算法可准确地获取当前系统功率值。

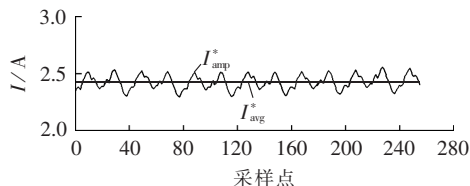


图 3 电流给定幅值与其平均值

Fig.3 Given current amplitudes and their average

基于以上方法,可得到改进后的无电流传感器型 MPPT 控制策略如图 4 所示。

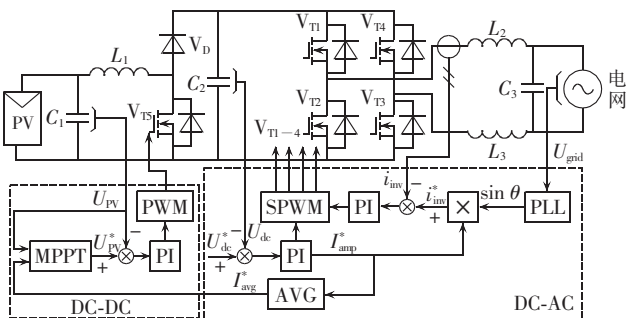


图 4 改进后的控制策略

Fig.4 Improved control strategy

在系统的前级控制中,MPPT 模块使用后级功率信息  $I_{avg}^*$  和光伏阵列输出电压  $U_{PV}$  作为输入信息,并输出光伏阵列的给定电压  $U_{PV}^*$ ,  $U_{PV}^*$  与光伏阵列的采样电压  $U_{PV}$  进行比较,并将差值送给 PI 调节器形成一个针对光伏阵列输出电压的闭环控制,调节输出量最终产生相应 PWM 信号驱动 DC-DC 电路中开关管工作。

在系统的后级控制中,直流电压的采样值  $U_{DC}$  与其设定值  $U_{DC}^*$  进行比较后送至电压 PI 调节器,电压 PI 调节器的输出则作为电流内环的给定幅值。为了实现逆变器输出电流以单位功率因数并网,必须保证并网电流与电网电压的相位和频率严格一致。锁相环(PLL)可实现对电网电压的实时跟踪锁相,并产生一个与电网电压同频同相的正弦信号<sup>[15]</sup>。该信号与电流内环的给定幅值相乘后,即是电流内环的给定值。逆变环节的并网电流采样值与电流内环给定值比较后送给电流 PI 调节器。

### 2.3 MPPT 程序设计

本文根据所提出的光伏并网逆变器改进型 MPPT 控制策略,采用定电压跟踪法和扰动观察法相结合的方式 进行 MPPT 程序设计。

系统将按定电压跟踪法以 80% 的光伏阵列开路电压启动,以保证系统快速到达光伏阵列最大功率点附近;接着按图 5 所示程序流程进行循环跟踪。

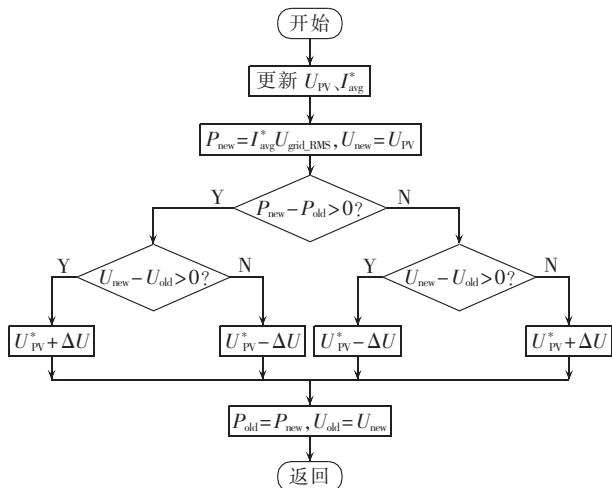


图 5 MPPT 程序框图

Fig.5 Flowchart of MPPT program

程序开始首先更新  $U_{PV}$  和  $I_{avg}^*$  变量,并将  $I_{avg}^*$  与电网电压的有效值相乘,分别作为 MPPT 程序中本次电压值和功率值保存。MPPT 程序之后将本次获得的功率值与上次功率值比较,若本次功率大于上次功率,说明扰动方向正确,应继续按照这一方向改变光伏阵列电压。程序下一步会判断本次电压与上次电压大小,若本次电压大,则光伏阵列的参考给定电压  $U_{PV}^*$  继续加上步长  $\Delta U$ ,反之则减去一个步长;若本次功率比上次小,则说明扰动方向错误,程序应按照相反方向调节光伏阵列输出电压。

程序最后将本次获得的功率值与电压值保存,并在程序下一次被调用时,作为上一次的功率值、电压值与当前更新的功率值、电压值进行上述比较。

## 3 实验结果

为验证上述控制策略的有效性,使用 IR 公司的

逆变专用控制芯片 IRMCF143 作为控制器设计了额定功率为 800 W 的实验样机,其输入电压范围为 240~350 V,母线电压为 400 V,开关频率为 20 kHz,按照相关标准,输出电压为  $220 \times (1 \pm 5\%)$  V,输出电压频率为  $50 \times (1 \pm 2\%)$  Hz,输出电流谐波含量小于 5%,功率因数大于 0.99,整机效率大于 92%。

图 6 为光伏并网逆变器额定运行时的并网波形,测试时输入电压 280 V。可以看出,并网电流  $i_{inv}$  的正弦度好,能精确跟踪电网电压  $u_{grid}$ ,并与其保持相位和频率一致,从而保证系统以单位功率因数并网发电。直流母线电压稳定在设定值 400 V,整机的控制性能良好。

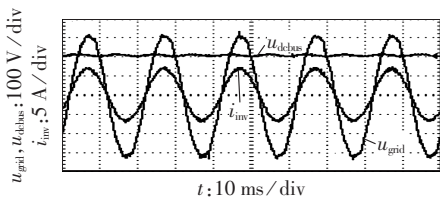


图 6 并网波形

Fig.6 Waveforms of grid connection

图 7 为系统启动时光伏阵列输出电压、电流波形,可以看到系统能快速调节光伏阵列的输出电压并保证系统运行在光伏阵列的最大功率点处。

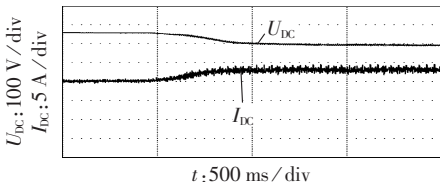


图 7 MPPT 启动波形

Fig.7 Waveforms of MPPT startup

图 8 为光伏阵列输出功率发生变化时并网电流的变化情况。可以看出,经过 4 个电网周期后,系统跟踪上了光伏阵列新的最大功率点,响应速度较快。

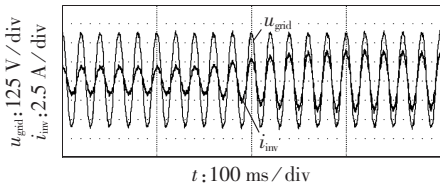


图 8 最大功率变化时并网波形

Fig.8 Waveforms of grid connection for maximum power variation

使用 Chorma 62150H 光伏阵列模拟器对系统的 MPPT 进行了测试,通过附带的上位机软件可以设定最大功率点并统计设定时间内的输出功率,从而测试 MPPT 的跟踪效率。通过测试,当系统输出功率大于 300 W 时,MPPT 跟踪效率大于 99.2%。在线调整模拟器输出的最大功率点,系统能及时跟踪到新的最大功率点。

图 9 为 MPPT 测试结果。实验结果证明了本文所提的基于单电压变量的 MPPT 控制策略响应速度快,精确度高,可在实际场合进行应用。

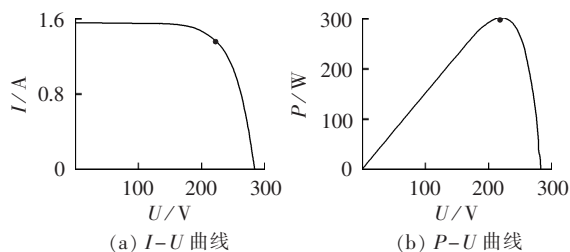


图 9 MPPT 测试结果

Fig.9 Results of MPPT test

## 4 结语

本文分析了双级式光伏并网逆变器的 MPPT 控制策略,利用其解耦控制特点,基于前后级能量平衡原理,提出了一种直流侧无电流传感器的单电压变量 MPPT 控制策略。使用系统后级逆变控制环节中的电流给定幅值作为 MPPT 控制器的功率参考值,并对其进行了平均化处理以保证跟踪精度。依据所提的控制策略设计了 MPPT 程序流程,搭建了一台实验样机,样机的并网性能、MPPT 精度与响应速度良好,验证了该控制策略的有效性和合理性。电流传感器的减少在简化系统设计的同时也提高了光伏并网逆变器的经济效益。

## 参考文献:

- [1] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [2] CARLOS M, JUAN J N, FRANCESC G, et al. Inverter configurations comparative for residential PV-grid connected system [C]// IEEE Industrial Electronics, IECON. Paris, France: IEEE, 2006: 4361-4366.
- [3] 曹太强, 许建平, 祁强, 等. 单相光伏并网逆变器控制技术 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 133-136.  
CAO Taiqiang, XU Jianping, QI Qiang, et al. Control of grid-connected single-phase photovoltaic inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 133-136.
- [4] 尤望, 郑建勇. 基于模糊 PI 调节 Boost 电路的光伏系统最大功率点跟踪控制 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 94-98.  
YOU Jun, ZHENG Jianyong. MPPT of photovoltaic system with Boost circuit based on fuzzy PI control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 94-98.
- [5] 彭会峰, 孙建平, 曹相春, 等. 基于功率占比微分曲线的光伏系统 MPPT 算法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 124-127.  
PENG Huifeng, SUN Jianping, CAO Xiangchun, et al. MPPT algorithm based on power duty cycle differential characteristic curve for photovoltaic system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 124-127.
- [6] 葛俊杰, 赵争鸣, 袁立强, 等. 基于模拟定位电路的多峰值 MPPT 方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 16-21.

- GE Junjie, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Multi-peak MPPT based on analog locating circuit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 16-21.
- [7] AHMED E M, SHOYAMA M. Modified adaptive variable step-size MPPT based on single current sensor [C]// IEEE Region 10 Annual International Conference. Fukuoka, Japan: IEEE, 2010: 1235-1240.
- [8] JIANG Y, ABU Q J A, HASKEW T A. Adaptive step size with adaptive-perturbation-frequency digital MPPT controller for a single-sensor photovoltaic solar system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3195-3205.
- [9] dos SANTOS W M, MARTINS D C. Digital MPPT technique for PV panels with a single voltage sensor [C]// International Telecommunications Energy Conference. Scottsdale, United States: IEEE, 2012: 1-8.
- [10] 田琦, 赵争鸣, 韩晓艳. 光伏电池模型的参数灵敏度分析和参数提取方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 119-124.  
TIAN Qi, ZHAO Zhengming, HAN Xiaoyan. Sensitivity analysis and parameter extraction of photovoltaic cell model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 119-124.
- [11] 戚军, 翁国庆, 章旌红. 光伏阵列多峰最大功率点分布特点研究 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 132-137.  
QI Jun, WENG Guoqing, ZHANG Jinghong. Multi-peak MPP distribution of photovoltaic array [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 132-137.
- [12] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 229-234.  
YANG Yongheng, ZHOU Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(Supplement 1): 229-234.
- [13] 唐磊, 曾成碧, 徐伟, 等. 一种新颖的光伏自适应变步长最大功率点跟踪算法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 128-133.  
TANG Lei, ZENG Chengbi, XU Wei, et al. Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 128-133.
- [14] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K. Adaptive perturb & observe MPPT algorithm for photovoltaic system [C]// 2013 IEEE Power and Energy Conference at Illinois. Champaign, United States: IEEE, 2013: 42-47.
- [15] SILVA S M, LOPES B M, FILHO B J, et al. Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems [C]// 39th IAS Annual Meeting. Seattle, United States: IEEE, 2004: 2259-2263.

## 作者简介:



王盼宝

王盼宝(1984—),男,河北卢龙人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电技术、微电网控制与保护技术(E-mail: wangpanbao@hit.edu.cn);

王卫(1963—),女,上海人,教授,博士,主要研究方向为新能源发电技术、照明技术等(E-mail: wangwei602@hit.edu.cn);

吴炎(1990—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要研究方向为光伏发电技术、直流微电网控制技术。

# Strategy of MPPT control without current sensors for photovoltaic system

WANG Panbao,WANG Wei,WU Yan

(School of Electrical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

**Abstract:** As the control of two-stage photovoltaic grid-connected inverter is decoupled between two stages, a strategy of MPPT(Maximum Power Point Tracking) control without current sensors is proposed. According to the power balance principle,the grid-connecting current acquired in the second stage can be used as the MPPT criterion of the first stage(DC-DC section). The perturbation and observation method is then applied to realize the MPPT. The proposed MPPT control strategy is analyzed in principle. An 800 W prototype of two-stage photovoltaic grid-connected inverter is designed,and the experimental waveforms and MPPT data are recorded,which show that,when the operating power of system is bigger than 300 W,the MPPT efficiency is higher than 99.2% and the tracking response is perfect,verifying the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

**Key words:** MPPT; current sensor; grid-connection; electric inverters; photovoltaic; electric power generation; control

(上接第 63 页 continued from page 63)

度模型[J]. 电网技术,2010,34(11):140-145.

ZHOU Ming,LOU Yarong. A bi-objective weighted fuzzy generation dispatching model considering both power purchase cost and coal consumption[J]. Power System Technology,2010,34(11):140-145.

作者简介:

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,从



刘文颖

事电力系统分析与控制、电力系统智能调度及大电网安全防御方面的研究;

文 晶(1987—),女,陕西汉中,人,博士研究生,从事电力系统运行、分析与控制方面的研究(E-mail:wenjing0916@163.com);

谢 昶(1983—),男,河南南阳人,博士,从事电力系统在线安全分析方面的研究。

# Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm

LIU Wenyang<sup>1</sup>,WEN Jing<sup>1</sup>,XIE Chang<sup>2</sup>,WANG Weizhou<sup>3</sup>,LIU Fuchao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China;3. State Grid Gansu Provincial Electric Power Research Institute,Lanzhou 730050,China)

**Abstract:** The characteristics of interactive load are studied and the interactive load is introduced as a dispatchable resource into traditional day-ahead dispatch model to mitigate the influence of wind power fluctuation. A multi-objective optimal dispatch model with the minimum operating cost and power loss as its objectives is built for the power system with wind farm,which considers the influence of interactive load on the cost of system operation and the distribution of power flow. The fuzzy theory is applied to convert multi-objective optimization problem into single-objective optimization problem,which allows the generation side and demand side both to participate in the optimal resource allocation of power grid operation. The simulative results of IEEE 30-bus system verify that,the proposed method can effectively reduce the operating cost and grid loss of system and enhance the consumption of wind power.

**Key words:** wind power; electric power systems; interactive load; optimization; dispatch; multi-objective; models; fuzzy theory