

基于光伏逆变最大功率约束下垂控制策略研究^{*}

石佩玉, 彭程, 贾新立, 路文梅, 郭放
(河北水利电力学院 电力工程系, 河北 沧州 061001)

摘要: 光伏逆变系统是基于传统下垂控制方法来实现有功功率的平均分配,但会造成光伏单元最大功率制约及浪费。因此,为了提升光伏单元输出能量的最优利用率,提出了一种光伏逆变器改进型下垂控制策略。该策略基于变步长的扰动观察法进行光伏电板最大功率的跟踪控制,其最大输出功率约束将生成下垂有功功率补偿量,将其叠加到传统下垂控制有功功率对应频率参考值的修正,且保持无功功率对应的电压幅值不变,从而实现并联系统中光伏单元的最大功率输出。通过 PSIM 电力电子仿真软件对光伏逆变最大功率约束下垂控制策略进行仿真验证。结果表明,变步长的扰动观察法及改进型下垂控制策略在实际应用中的有效性及可行性。

关键词: 光伏电板; 最大功率跟踪; 下垂控制; 谐振控制器; 斩波电路

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0078-07

doi: 10.12177/emca.2023.097

Research on Droop Control Strategy Based on Photovoltaic Inverter Maximum Power Constraint^{*}

SHI Peiyu, PENG Cheng, JIA Xinli, LU Wenmei, GUO Fang
(Department of Electrical Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Photovoltaic inverter system is based on the traditional droop control method to achieve the average distribution of active power, which will cause the maximum power restriction and waste of photovoltaic units. Therefore, in order to improve the optimal utilization rate of photovoltaic unit output energy, an improved droop control strategy for photovoltaic inverter is proposed. The strategy is based on the variable step perturbation observation method to track and control the maximum power of photovoltaic panels. The maximum output power constraint will generate the droop active power compensation, which will be superimposed to the correction of the frequency reference value corresponding to the traditional droop control active power, and keep the voltage amplitude corresponding to the reactive power unchanged, so as to achieve the maximum power output of photovoltaic units in the parallel system. The maximum power constrained droop control strategy of photovoltaic inverter is simulated and verified by PSIM power electronics simulation software. The simulation results show that the variable step disturbance observation method and the improved droop control strategy are effective and feasible in practical application.

Key words: photovoltaic panel; maximum power tracking; droop control; resonance controller; chopper circuit

0 引言

随着当前世界经济和科技的快速发展以及人

们生活水平的不断提升,对能源的需求越来越大,环境污染越来越严重,近些年来上述问题得到了越来越多的关注。为解决能源紧缺及环境污染,

收稿日期: 2023-04-13; 收到修改稿日期: 2023-05-08

^{*} 基金项目: 沧州市重点研发计划指导项目(204103005); 2021 年度河北水利电力学院基本科研业务费项目(SYKY2124)

作者简介: 石佩玉(1986—),女,硕士,讲师,主要研究方向为电气工程及其自动化。

风能、光能、水能等可再生能源得到迅速发展^[1-2]。文献[3-5]针对 LCL 滤波的三相并网型逆变器系统,考虑电压畸变增加网侧电流总谐波问题,提出了电流双环控制策略,外环采用 PI 控制器,内环采用 PR 控制器。文献[6-8]根据奈奎斯特稳定性判据提出一种导纳重构策略,将并网点电压经适当环节反馈至电流控制器的输出端,通过提高系统对电网阻抗变化的适应能力,实现对谐波谐振的抑制。文献[9-10]针对传统扰动观察法跟踪光伏逆变系统速度慢、功率波动大的问题,提出了基于模糊控制的光伏最大功率点跟踪(MPPT)控制策略。文献[11-12]针对传统下垂控制特性进行分析,引入动态下垂系数、灵敏度系数,建立改进动态下垂系数控制模型。综上所述,现有文献主要针对光伏逆变系统控制策略的稳定性、LCL 参数的优化以及下垂控制策略系数的灵敏度特性展开研究,然而针对最大功率约束下垂控制策略的研究相对较少,因此,本文将针对这方面展开研究,实现光伏逆变系统功率的稳定输出及最大值的实时跟踪。

1 光伏逆变系统

光伏逆变系统主要由光伏电池板、升压斩波 DC-DC 变换电路、逆变器、升压变压器、电网和负载这几部分组成,电路拓扑框图如图 1 所示。光伏板是光伏逆变系统中光电转换的核心部件,由多个光伏组件经过串、并联连接而成;Boost 斩波电路将光伏板输出动态变化的电压升压到稳定电压值,从而为后端逆变电路提供稳定的直流输入电压;逆变电路输出交流电压经过变压器升压到电网或连接到负载。

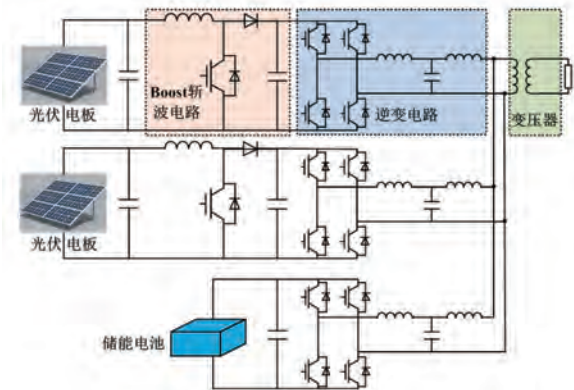


图 1 光伏逆变系统原理框图

1.1 光伏电池数学模型及输出特性

光伏电池是光伏发电的最小单元,其原理是利用半导体的光生伏打效应,由于单个光伏电池产生的工作电压、工作电流和输出功率较小,因此一般都是经过多个电池串、并联形成光伏矩阵。光伏电池的等效电路图如图 2 所示,电池特性参数如表 1 所示。

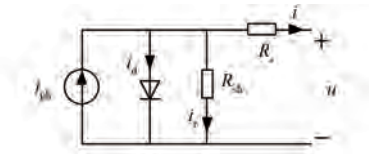


图 2 光伏电池等效电路

表 1 电池特性参数列表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
N_s	284	I_{sco}	180
$S_0/(W \cdot m^{-2})$	1 000	I_{s0}	2.16×10^{-8}
$T_{ref}/^{\circ}C$	25	E_g	1.12
R_s/Ω	0.008	A	1.2
R_{sh}/Ω	1 000	C_t	0.002 4
k_s	0	K	1.381×10^{-23}

由图 2 可得电流表达式:

$$i = i_{ph} - i_d - i_r \tag{1}$$

$$i_{ph} = I_{sco} \times \frac{S}{S_0} + C_t \times (T - T_{ref}) \tag{2}$$

$$i_d = I_o \times (e^{\frac{qV_d}{AKT}} - 1) \tag{3}$$

$$I_o = I_{s0} \times \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \times e^{\frac{qE_g}{AK} \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \tag{4}$$

$$V_d = \frac{u}{N_s} + i \times R_s \tag{5}$$

$$i_r = \frac{V_d}{R_{sh}} \tag{6}$$

$$T = T_a + k_s \times S \tag{7}$$

式中: i_{ph} 为光生电流; I_{sco} 为短路电流; I_{s0} 为二极管饱和电流; S_0 为光照强度额定设定值; S 为光照密度实际值; C_t 为温度系数; T_{ref} 为温度额定设定值; T_a 为温度实际值; q 为电子电荷(取为 $1.6 \times 10^{-19} C$); K 为波尔兹曼常数(取为 $1.381 \times 10^{-23} J/K$); N_s 为光伏电池串联的数量; A 为光伏电池的发射系数; k_s 是光照强度影响太阳能电池

温度系数,如果设置成 0,表示不考虑光照强度对电池温度的影响; E_g 是每个电池的能带电压,晶体硅约为 1.12 V,非晶硅约为 1.75 V; R_s 是内部串联电阻, R_{sh} 为内部分流电阻。

1.2 光伏电池输出特性

光伏电板由 540 串、20 并的光伏单元组成,基于光伏电池数学模型对其进行仿真,可以绘制出电池的输出 $I=f(U)$ 特性曲线和功率的输出 $P=f(U)$ 特性曲线,曲线图如图 3 和图 4 所示。取光照强度额定设定值 S_0 为 1 000 W/m²,取光伏电板温度额定设定值 T_{ref} 为 25 ℃。光伏电池是一种非线性的直流电源,电流输出特性曲线是一条递减曲线。在输出电压达到最大功率点之前,电流的变化缓慢,此时可以等效为近似恒定电流源;当输出电压大于最大功率点电压时,电流快速下降,电压变化缓慢,可以近似于电压源。功率输出特性曲线是一条凸曲线,在达到最大功率点之前, P 和 U 等效线性比例函数,在达到最大功率点后, P 反而减小,只存在一个最大输出功率值 P_{max} 。

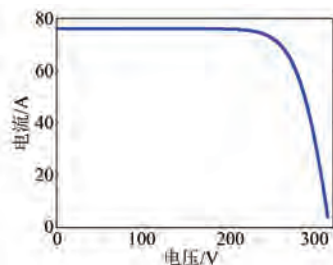


图 3 光伏电池 $U-I$ 变化曲线

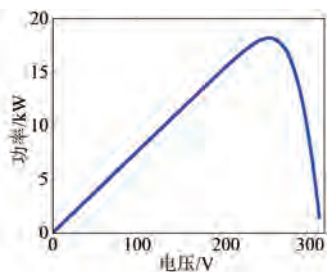


图 4 光伏电池 $U-P$ 变化曲线

光伏电板输出电压、功率特性会随着光照强度及温度的变化而变化。图 5、图 6 为温度恒定时,不同光照强度值对应的输出特性曲线。随着光照强度的上升,光伏电池 $I=f(U)$ 和 $P=f(U)$ 的特性曲线上移,当输出电流、最大功率增大时,最大功率点对应的电压几乎不变。图 7、图 8 为光照强度恒定

时,不同温度值对应的输出特性曲线,随着温度上升,最大功率点之前的恒定电流几乎不变,最大功率和开路电压随着温度的升高反而减小。

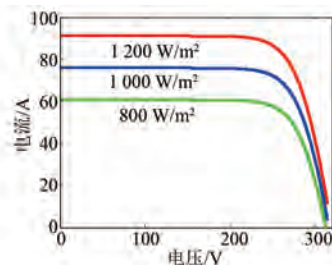


图 5 不同光照强度下 $U-I$ 变化曲线

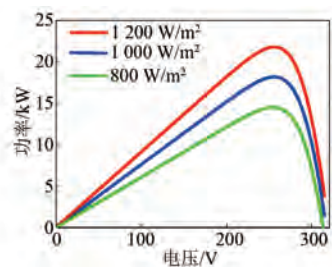


图 6 不同光照强度下 $U-P$ 变化曲线

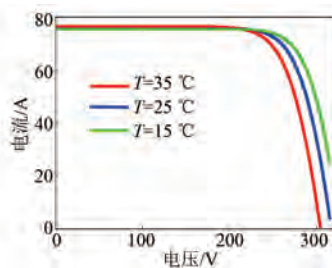


图 7 不同温度下 $U-I$ 变化曲线

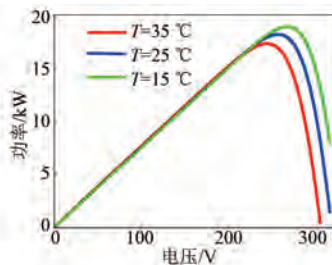


图 8 不同温度下 $U-P$ 变化曲线

1.3 最大功率跟踪控制策略分析

光伏电板能量转化效率相对较低,大致在 15%~30%,为了使光伏电板在光照强度及温度动态变化的情况下获取最大能量,必须对光伏电板进行最大功率点跟踪控制。光伏电板和电力电子变换器的输出特性都具有非线性特征,但在相对

较短的时间内,其可近似看作线性电路。将光伏电板等效为一个直流电源,后端的变换器等效为负载,在外部环境动态变化的条件下,通过调整变换器的等效负载电阻,使之快速跟随光伏电池的内阻变化而变化,同时保持两者之间的阻抗匹配,从而实现光伏电板功率的最大输出。

最大功率跟踪控制策略通常有功率一阶微分法、电导增量法、常数电压法、扰动观察法等方法,本文将基于变步长的扰动观察法进行光伏电板最大功率的跟踪控制。根据光伏电池 $P=f(U)$ 输出功率特性曲线可以得出:

$$\begin{cases} \text{if } dP/dU > 0 & \text{最大功率点在左边} \\ \text{if } dP/dU = 0 & \text{最大功率点} \\ \text{if } dP/dU < 0 & \text{最大功率点在右边} \end{cases} \quad (8)$$

光伏电板输出功率的微分项是单值函数,其数值的正负、大小特性可以反映其偏离最大功率点的方向和大小,基于这些特征定义电压扰动的表达式为

$$U(k+1) = U(k) + \delta \times \frac{dP}{dU} = U(k) + \delta \times \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \quad (9)$$

式中: δ 为步长调整系数 $\delta \times (dP/dU)$ 作为调整量。

当输出功率偏离最大功率点较大时, dP/dU 也较大,从而跟踪的调整步长也相对大些,便于快速跟踪;而当输出功率偏离最大功率点较小时, dP/dU 也较小,此时工作点将在最大功率点附近进行小幅度震荡,提高了跟踪精度。

2 光伏系统控制策略

2.1 Boost 升压斩波电路控制策略

Boost 斩波电路是一种较为普遍使用的直流升压电路,其可以提高输出电压,获得较高的功率因数,且控制策略相对简单,其原理框图如图 9 所示。将后端直流母线电压的参考值与实际反馈值相减后送入 PI 闭环控制,其 PI 输出量作为占空比驱动器件的导通及关断工作状态的判定。

器件导通与关断两种工作模式的等效电路图如图 10 所示。图 10(a) 为器件导通状态的等效电路图,光伏电板直流电源向电感充电,电容向后端负载放电;图 10(b) 为器件关断状态的等效电路图,光伏电板直流电源和电感同时向电容和后端

端负载放电。当电路工作处于稳态时,每个周期中电感在 IGBT 管导通和关断时充放电的能量达到动态平衡,输出电压 u_d 的表达式为

$$u_d = \frac{1}{1-\alpha} u_{in} \quad (10)$$

式中: α 为器件每个周期的占空比; u_{in} 为光伏电板直流电源。

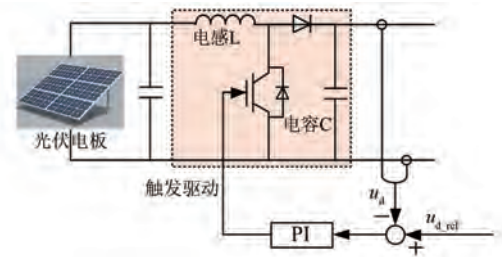


图9 Boost 电路控制策略框图

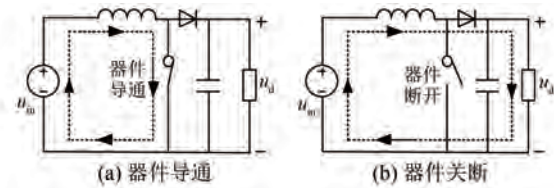


图10 器件导通及关断状态等效电路图

2.2 单相逆变电路并联控制策略

光伏逆变器并联的控制方式包含有线的集中控制、主从控制、分散控制和无线的下垂控制策略几种方式。下垂控制具有无通讯线功能,各并联模组不需要信息交互,不受距离限制,冗余性较好。单台逆变器发生故障时对系统造成的影响较小,能实现功率的自动均分,且即插即用,易实现模块化生产,因此本文将采用下垂控制策略实现光伏系统的并联控制。

图 11 为光伏逆变系统控制策略框图,其中图 11(a) 为基于下垂控制的并联逆变系统控制策略,光伏电板最大功率跟踪及策略如图 11(b) 所示。首先,基于下垂控制算法给定逆变电路输出电压参考值、有功功率部分生成频率参考值和无功功率部分生成电压幅值参考值;其次,将光伏电板输出最大功率跟踪值与实际负载功率值进行实时比较后,选择相应的功率补偿值,实现对有功功率下垂表达式的修正;最后,逆变器采用双环 PR 控制策略,将下垂算法所求取的电压参考与电容电压实际反馈送入电压外环 PR 控制器,将其输

出与电感电流实际反馈送入电流内环 PR 控制器,最终产生 PWM 驱动信号。

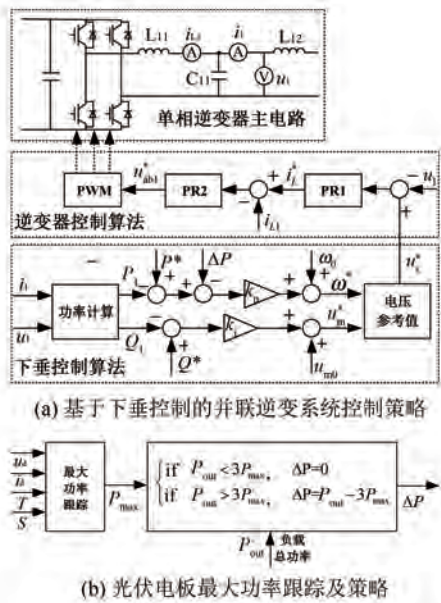


图 11 光伏逆变系统控制策略框图

3 光伏系统仿真

基于光伏逆变系统的原理框图在电力电子仿真 PSIM 软件搭建数值仿真模型,模型图如图 12 所示。输入电源包含两块光伏电板及储能蓄电池,光伏电板基于 Boost 斩波升压电路将电压稳定在 600 V,储能蓄电池输出电压设定为 600 V,为后端单相 LCL 逆变电路提供稳定的直流电源,三套单相逆变电源并联运行,其输出电压为 220 V,通过升压变压器升至电网 10 kV。仿真模型控制系统参数如表 2 所示。

当负载总输出功率小于光伏电板输出最大限定功率的 3 倍时,两块光伏电板及储能蓄电池对应的每一台逆变器都基于下垂控制策略实现功率动态均分控制;当负载总输出功率大于光伏电板输出最大限定功率的 3 倍时,两块光伏电板均以最大功率输出,而剩余的功率全部由储能蓄电池

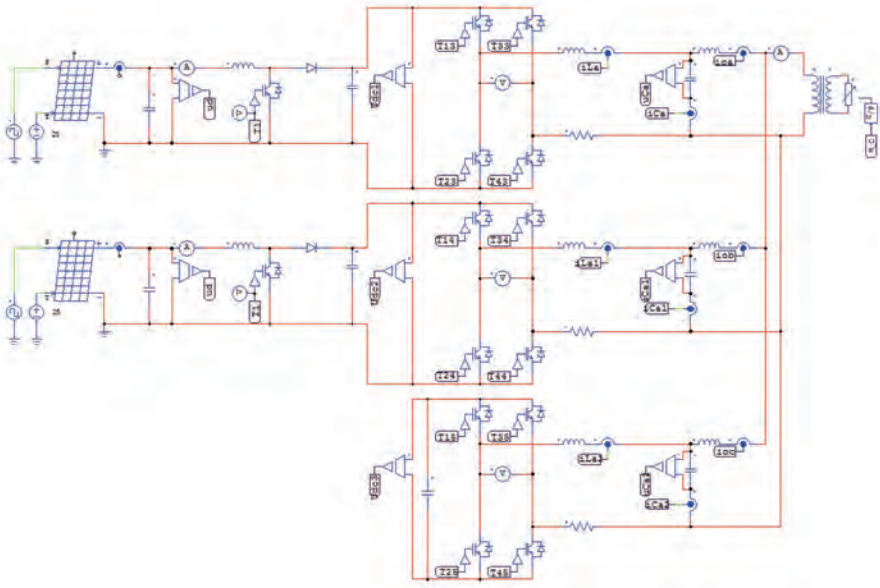


图 12 光伏逆变系统仿真模型图

表 2 控制系统参数列表

参数名称	参数值
斩波滤波电感 i_{Lb} /mH	1.5
斩波滤波电容 C_{Lb} /mF	1.2
斩波电路开关频率/kHz	2.4
单相逆变滤波电感 L_{11} /mH	1.0
单相逆变滤波电感 L_{12} /mH	0.3
单相逆变滤波电容 C_{11} /mF	1.0
逆变电路开关频率/kHz	2
升压变压器变比	220:10 000

提供,两台光伏逆变器实现功率均分,储能蓄电池的功率增加。

图 13 为光伏逆变系统的仿真结果图,以光伏电板输出最大限定功率取 10 kW 为例。0~0.7 s 为升压 Boost 斩波电路起动闭环过程;0.7~1.5 s 为三台单相逆变起动闭环及带载过程,总负载为 20 kW,小于三倍光伏电板输出最大限定功率;1.5~3.0 s 为负载进一步提升至 33.5 kW,大于三

倍光伏电板输出的最大限定功率。图 13(a) 为光伏电板电压及经过直流升压斩波控制后的电压波形图, 光伏电板输出电压的平均值约为 315 V, 升压 Boost 电路输出电压的平均值约为 600 V, 负载动态变化过程中电压的稳定性较好; 图 13(b) 为 Boost 升压斩波电路输出占控比图, 稳态值达到 0.5 左右; 图 13(c) 为单相逆变电路参考电压及实际电压波形图, 通过波形可以看出三个逆变电路电压的跟踪效果良好, 几乎不存在偏差; 图 13(d) 为 0.7~1.5 s 阶段逆变电路输出电流及三台总电流波形图, 从图中可以看出, 三台逆变电流实现了均分效果; 图 13(e) 为 1.5~3.0 s 阶段光伏电板达到最大限幅时三台单相逆变器输出电流波形图, 储能蓄电池对应的逆变电流更大, 电流不均分; 图 13(f) 为三台单相逆变器基于下垂控制策略对应的输出频率图; 图 13(g) 为三台单相逆变器基于下垂控制策略对应的输出有功功率图; 图 13(h) 为三台单相逆变器基于下垂控制策略对应的输出无功功率图。从仿真结果可以看出, 基于本文提出的最大功率跟踪下垂优化控制策略可以实时跟踪光伏电板最大功率输出, 在负载功率小于光伏电板最大限制功率时可以较好地实现电流及功率均分效果, 也可实现两种不同功率模式下的动态平滑切换。

4 结 语

针对光伏系统最大功率优化跟踪控制问题, 本文分析了光伏电池数学模型及输出特性, 基于变步长的扰动观察法进行光伏电板最大功率捕获, 采用 Boost 斩波升压电路为后端逆变器提供稳定直流电源, 最后基于修正下垂控制有功功率给定值来实现不同负载功率等下的并联控制策略。结果表明, 变步长的扰动观察法及改进型下垂控制策略在实际应用中的有效性及可行性。

【参考文献】

- [1] 王宁, 高朋, 贾清泉, 等. 光伏并网系统参与电压调节的有功和无功协调控制策略研究. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 23.
- [2] 谢永流, 程志江, 李永东, 等. 引入虚拟阻抗的并联逆变器新型下垂控制策略. 电工电能新技术,

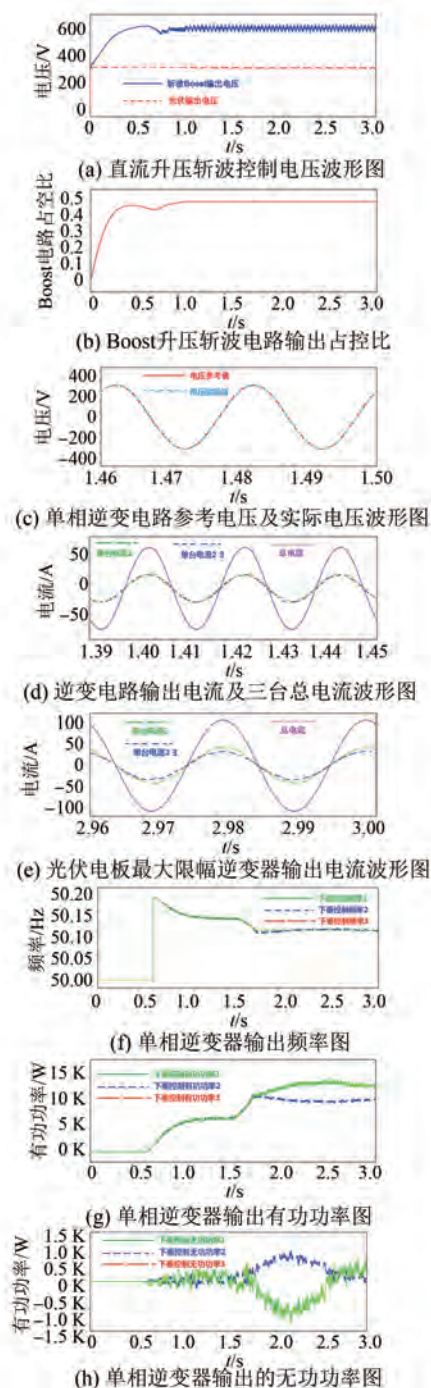


图 13 光伏逆变系统仿真结果图

2016, 35(3): 22.

- [3] 赵清林, 郭小强, 郭伟扬. 单相逆变器并网控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 60.
- [4] 刘韬, 郝翔, 杨旭, 等. LCL 滤波的三相并网逆变器电流双环控制策略[J]. 电源学报, 2012(4): 7.
- [5] 谢少军, 许津铭. LCL 滤波的并网逆变器的电流控

- 制技术研究综述[J]. 电源学报, 2012(4): 1.
- [6] 郑晨, 周林, 张密. 基于导纳重构的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 51.
- [7] 张兴, 余畅舟, 刘芳, 等. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 336.
- [8] 刘斌, 谢积锦, 李俊, 等. 基于自适应比例谐振的新型并网电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 186.
- [9] 张自雷, 赵旭, 杨培宏, 等. 基于自适应占空比的光伏 MPPT 控制[J]. 电工技术, 2021(22): 44.
- [10] 李振志, 葛强, 石建全, 等. 基于模糊控制的光伏 MPPT 控制策略及仿真分析[J]. 电工技术, 2022(5): 29.
- [11] 常潇, 侯哲晖, 刘翼肇, 等. 基于改进动态下垂控制微网控制方法研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 11.
- [12] 马州生, 姚阳. 含海上风电场混合直流系统的稳定下垂控制[J]. 电气传动, 2022, 52(11): 35.

(上接第 77 页)

- [16] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20.
- [17] 李涛, 程启明, 程尹曼, 等. 基于 E-L 模型的 Z 源 T 型逆变器无源控制策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2303.
- [18] 侯世英, 曾建兴, 孙韬, 等. 基于李亚普诺夫稳定性分析的 APF 新型控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 33.
- [19] MILANO F. Analogy and convergence of Levenberg's and Lyapunov-based methods for power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1663.
- [20] BADRI V, TAVAZOEI M S. Non-uniform reducing the involved differentiators' orders and Lyapunov stability preservation problem in dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(4): 735.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被 JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)和 Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djkyzy/home>.