

一种交直流电能路由器的并网控制策略研究

李正, 卢柯奇, 查鹏飞, 赵国鹏

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

收稿日期: 2022年3月8日; 录用日期: 2022年3月25日; 发布日期: 2022年4月8日

摘要

电能路由器运用于能源互联网中增加了供电的多样性, 还解决功率多向流动的问题。本文针对家庭用户的实际需求设计了一种小容量的单相交直流电能路由器, 交直流系统通过双向DC/AC变流器连接保证负载可靠供电。由于分布式电源出力受天气影响易波动, 本文提出改进的滑动平均算法的电能路由器并网控制策略, 该策略可求得分布式电源的出力指令功率, 通过控制分布式电源出力追踪指令功率输出, 可得到平滑的并网点功率, 减少波动。最后, 通过仿真验证所提出并网控制方法的正确性。

关键词

电能路由器, 分布式电源, DC/DC变流器, DC/AC变流器, 滑动平均

Research on Grid-Connected Control Strategy of an AC and DC Power Router

Zheng Li, Keqi Lu, Pengfei Zha, Guopeng Zhao

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Mar. 8th, 2022; accepted: Mar. 25th, 2022; published: Apr. 8th, 2022

Abstract

The application of power routers in the energy Internet increases the diversity of power supply, and also solves the problem of multi-directional power flow. In this paper, a small-capacity single-phase AC and DC power router is designed according to the actual needs of home users. The AC and DC systems are connected by bidirectional DC/AC converters to ensure reliable power supply to the load. Since the output of distributed power is easily fluctuated by the weather, this paper proposes an improved sliding average algorithm for the grid-connected control strategy of power routers, which can obtain the output command power of distributed power. By controlling the distributed power output to track the command power, a smooth grid-connected power can be obtained

and fluctuations can be reduced. Finally, the correctness of the proposed grid-connected control method is verified by simulation.

Keywords

Power Router, Distributed Energy, DC/DC Converter, DC/AC Converter, Moving Average

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源污染, 能源短缺一直影响着社会经济和人民生活水准。当今世界范围开始了以绿色节能为目标的能源体系变革, 提出了能源互联网[1]概念, 多种能源形式相互连接实现能源的多向流动。作为能源互联网中的核心部件, 电能路由器受到广泛的关注。在微电网[2]中, 电能路由器可以实现风光等新能源接入后的能量管理和传输控制[3] [4], 促进新能源消纳, 满足未来电网对电能控制的多样性和复杂性要求。家庭用户也逐渐接入屋顶光伏和小型风机等新能源, 通过电能路由器的能量管理可提高用户用电水平并带来经济效益。

大量可再生新能源接入电网[5], 但其发电方式受气象等因素的影响, 往往具有间歇性, 随机性, 这对大电网造成一定程度的冲击[6] [7], 因此电能路由器的功率控制方法就尤为关键。文献[8]给出了户用光伏发电系统的能量管理方案, 核心是光伏出力与蓄电池充放电的配合。文献[9]为解决屋顶光伏系统普及所带来的电能质量和可靠性问题, 尤其是光伏发电超出家庭需求的问题, 提出了一种确定住宅系统中光伏逆变器有功功率和无功功率设定点的方法。但以上研究都还没有涉及家庭用电层面的整体调度。文献[10]以用户满意度为目标并将家用负载工作时间分段进行优化调度, 但该研究忽略了家用负载可能中断的实际情况。

结合已有研究, 本文提出适用于家庭用户的中小容量级别单相交直流电能路由器, 外围提供端口方便分布式电源和负载的即插即用, 方便扩展。内部交直流系统通过 DC/AC 双向变流器连接, 便于能量管理。研究电能路由器并网时并网点功率的平滑方法, 本文提出改进的滑动平均算法, 控制分布式电源出力追踪算法求得的功率输出指令可得到平滑的并网点功率。通过 PSIM 仿真平台验证了所提并网控制策略和基本功能。

2. 电能路由器设计原则及其拓扑结构

2.1. 电能路由器设计原则

1) 分布式电源和负载的即插即用

家庭用户正逐渐接入屋顶光伏, 小容量风机等电源, 这不仅提高用户用电经济性, 还提升了供电质量和防止检修或事故带来的意外停电。电能路由器提供分布式电源接口, 屋顶光伏系统通过 DC/DC 变流器接入直流母线, 小型风机通过 DC/AC 变流器也接入直流母线, 可以实现风光功率的互补运行。

单相电能路由器同时设置了 400 V 直流母线和 220 V 交流母线, 为交直流用电设备可靠供电, 保证其“即插即用”。

2) 交直流母线稳定

为了更好的实现功率流动和能量管理,设计了直流母线和交流母线,将系统分成两部分,中间通过双向 DC/AC 变流器连接。为保证交直流设备的可靠用电及能量的高效管理,必须维持其电压和频率稳定。考虑到储能电池[11]其成本高,寿命低,而且易爆炸引发事故,又因为家庭用户大多时间工作于并网模式,可通过电网维持交流母线稳定,通过双向 DC/AC 变流器工作于整流状态维持直流母线稳定。故本文设计的单相电能路由器不含储能电池。孤网下,在直流母线前接 DC/DC 稳压变流器维持直流母线稳定,然后再通过 DC/AC 变流器的 V/f 控制策略维持交流母线稳定。

3) 孤网并网状态快速切换

当大电网由于计划检修停电或自然灾害造成停电时,电能路由器应及时自动检测该状态,并发出离网信号,断开开关使其切换为孤网运行状态。当大电网恢复时,电能路由器也可以通过相位检测[12]达到同步并网,减少冲击。

4) 能量的多向流动

单相电能路由器分别接入了交直流分布式电源、大电网、交直流用电设备。而这些电气设备之间显然需要通过各个变流器来实现能量的多向流动,以完成完整的能量管理。用户既可以向电网购电,也可以将多余的电能售卖给电网。负载的用电可以来自不同的分布式电源也可以来自大电网。

5) 能量管理优化保证功率平衡与功率平滑

电能路由器除了最基本的功率控制功能实现电压稳定、能量多向流动外,还应具有更加智能的能量管理方案。通过电能路由器的“大脑”微处理器运行智能算法做出智能决策,控制各变流器执行相应的控制策略,各开关可靠的开合,实现孤网运行时功率的平衡和重要负载的供电以及并网运行时并网功率的平滑。

2.2. 电能路由器拓扑结构

基于以上的功能要求和设计原则,本文设计的单相交直流电能路由器的拓扑结构如图 1 所示。

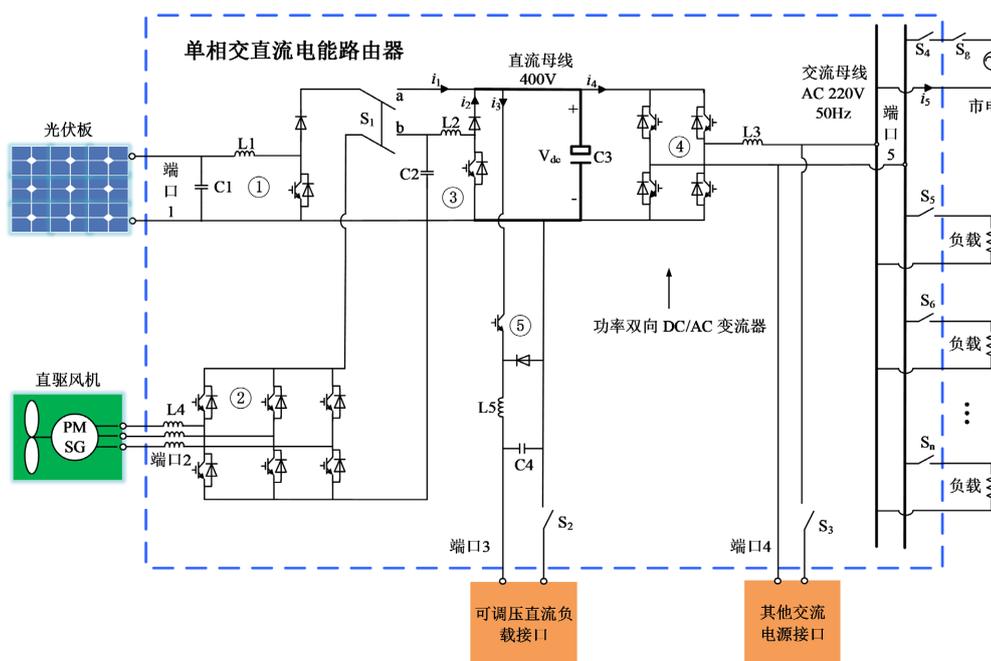


Figure 1. The topology diagram of the single-phase AC and DC power router proposed in this paper
图 1. 本文提出的单相交直流电能路由器拓扑结构图

单相交直流电能路由器的各个端口分别连接直流分布式电源光伏、交流分布式电源小型直驱风机、直流负载、交流 220 V 大电网、交流负载。光伏通过 DC/DC 变流器控制光伏输出电压进而控制输出功率，再通过 DC/DC 稳压变流器接入直流母线并控制母线电压稳定在 400 V。小型风机通过 DC/AC 变流器接入直流母线，控制风机转速进而控制风机输出功率。当夜晚或无光时光伏不工作，则切换开关 S1 使风机 DC/AC 变流器输出与 DC/DC 稳压变流器相连，控制直流母线稳定在 400 V。直流母线接 DC/DC 降压电路为直流负载提供常见直流电压等级接口。交直流母线通过双向 DC/AC 变流器连接，孤网运行时控制交流母线电压频率稳定，并网运行时控制直流母线电压稳定。端口 5 连接 AC220V 大电网，实现家庭用户和外部电网的联通。开关 S4 的切合可实现孤网运行模式和并网运行模式的快速切换。

3. 电能路由器的并网控制方法

家庭用户接入屋顶光伏和小型风机等分布式电源不仅可以增加供电来源，提升供电可靠性，而且当电能有剩余时可以将其售卖给电网，带来一定的经济收益。

3.1. 并网目标

分布式电源在不同工况下需要工作于不同的模式完成相应的能量管理，主要分为最大功率跟踪模式和功率曲线跟踪模式两种。分布式电源出力受天气影响易波动，如果直接以最大功率跟踪模式并入电网会给电网带来危害，也影响家庭用户的供电质量。故需控制光伏与风机的功率输出，使其根据系统需要的功率按照指令输出，抑制并网点功率 P_S 波动，使其尽可能平滑。

如图 2 所示为电能路由器工作于并网状态时的功率流向图。

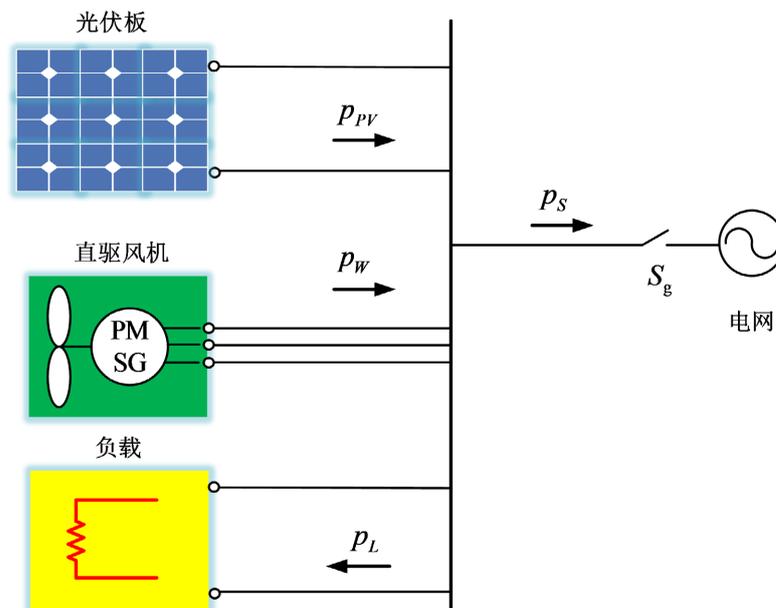


Figure 2. System power flow in grid-connected state

图 2. 并网状态系统功率流向图

其中 P_S 为并网点功率，设流入电网为正。 P_{PV} 为光伏输出功率， P_W 为小型风机输出功率。 P_L 为负载功率。则有：

$$P_S = P_{PV} + P_W - P_L \quad (1)$$

为减少并网点功率波动，需要控制分布式电源功率的输出使 P_S 尽可能平滑。

3.2. 滑动平均法

滑动平均法[13]的基本原理就是对于 N 个不平稳的数据 $\{y_k\}$ ，认为小区间内每 m 个相邻数据是接近于一个平稳常量的。于是可取每 m 个相邻数据的平均值来表示该 m 个数据中任一个的取值，并视其为抑制了随机误差的测量结果。通常用该均值来表示其中点数据或端点数据的测量结果。其一般表达式为：

$$f_k = y_k = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n y_{k+1}, \quad k = n+1, n+2, \dots, N-n \quad (2)$$

式中， $2n+1=m$ ，显然，这样所得到的 $\{f_k = y_k\}$ ，其波动程度因平均作用而比原来数据 $\{y_k\}$ 减小了，即更加平滑了，故称之为平滑数据。

3.3. 并网点功率平滑控制策略

由于本文设计的电能路由器不含储能，不能通过电池的充放电来平抑波动，而是提出两次滑动平均算法结合修正的改进滑动平均算法来求得分布式电源的出力指令，分布式电源追踪指令值出力即可减少并网点的功率波动。

考虑只有光伏工作时的情况，如图 3 所示为未处理时光伏按最大功率输出时并网点功率 $P_{S1} = P_{PVmax} - P_L$ 。可以看出其有着较大的波动。

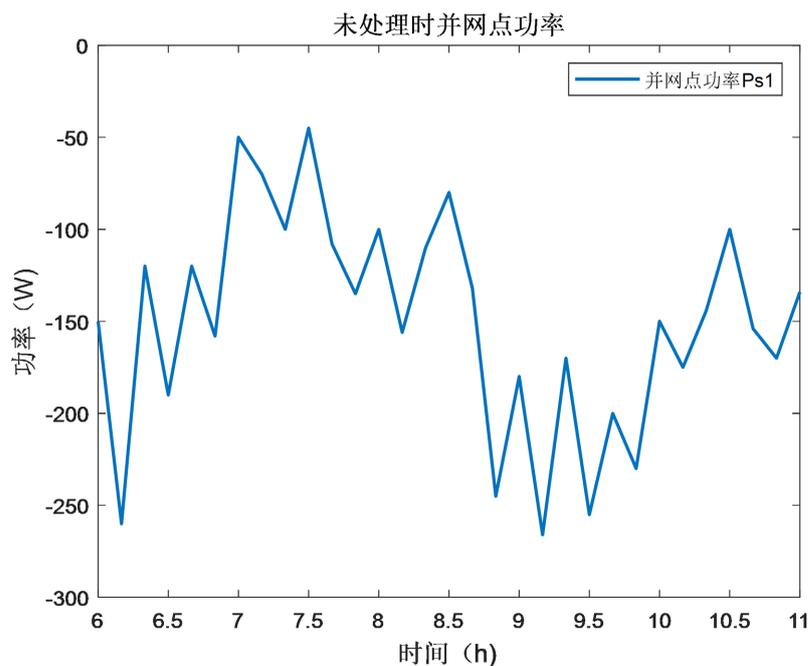


Figure 3. Grid-connected power without smoothing
图 3. 未平滑处理时并网点功率

对图 3 并网点功率 P_{S1} 进行滑动平均处理。如图 4 所示， P_{n1} 为平滑处理后的曲线。则当 $P_{S1} > P_{n1}$ 时，光伏减少出力按 P_{n1} 曲线对应出力输出。当 $P_{S1} < P_{n1}$ 时，由于光伏已经是最大功率输出而不能再增加功率使其按 P_{n1} 曲线对应出力输出，而是依然按最大功率输出。故一次滑动平均法后可得到并网功率 P_{S2} ，其波动减少了一半。

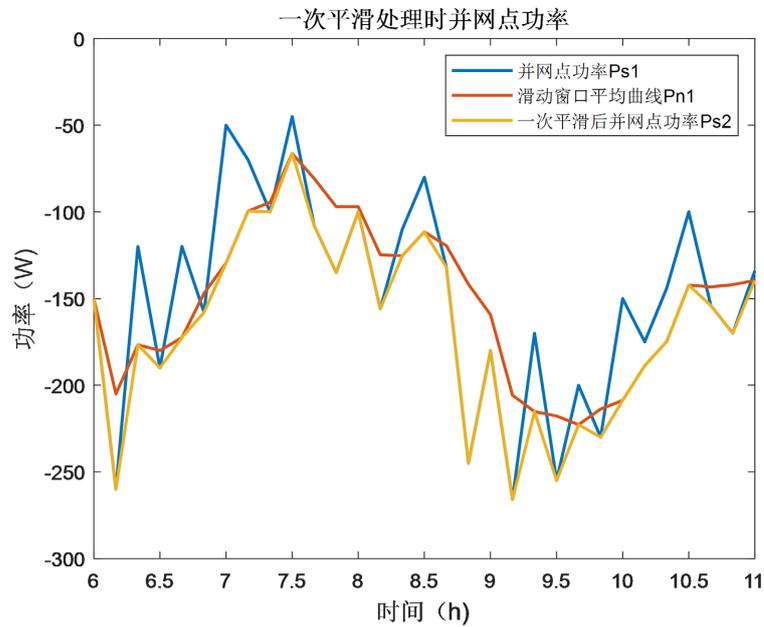


Figure 4. Grid-connected power when processed by moving average algorithm
图 4. 一次滑动平均算法处理时并网功率

对图 4 并网功率 P_{S2} 进行二次滑动平均处理, 如图 5 所示, P_{n2} 为二次平滑处理后的曲线。故二次滑动平均法后可得到并网功率 P_{S3} , 其波动再次减少了一半。

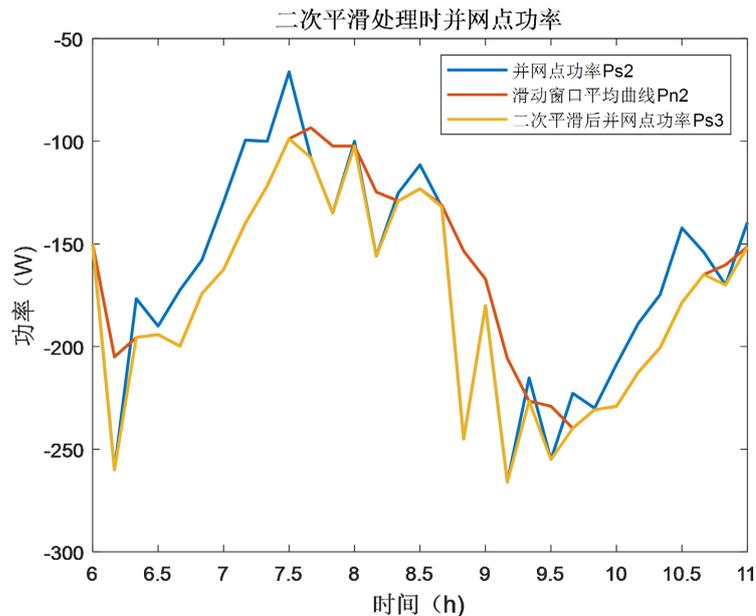


Figure 5. Grid-connected power when processed by quadratic moving average algorithm
图 5. 二次滑动平均算法处理时并网功率

在光伏应减少出力按平滑后曲线对应输出时, 有时波动会依然较大, 需要对其修正使其再多减少一点出力。有时又会低于 0, 这是不符合实际的, 需要修正使其等于 0。最终得到如图 6 所示较平滑的并网

点功率 P_S ，然后可求得光伏的出力指令值 $P_{PV} = P_S + P_L$ 。通过控制光伏系统寻优输出电压参考值使其跟踪指令功率值稳定输出就可实现并网点功率的平滑。

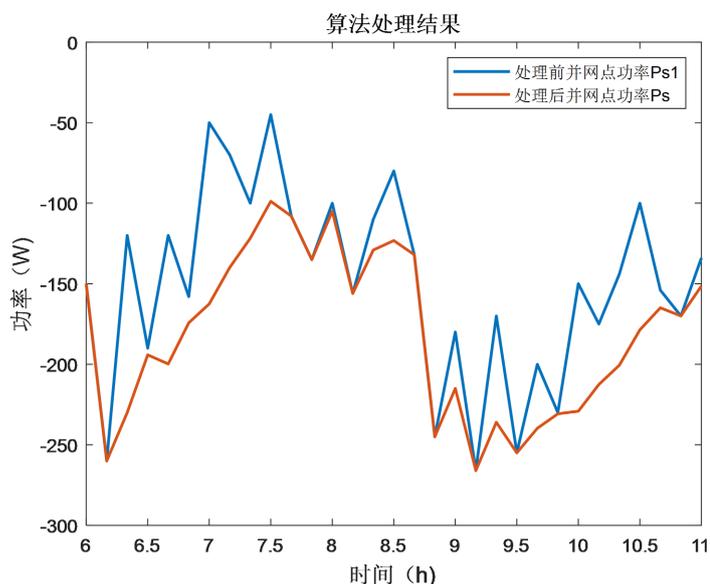


Figure 6. Grid-connected power when processed by grid-connected control strategy method

图 6. 并网控制策略方法处理时并网点功率

表 1 所示为各次算法处理后的波动情况，可以看出经过两次滑动平均算法结合修正的功率控制方法后并网点功率波动明显降低。

Table 1. The fluctuation of the power of the grid connection point after each algorithm processing

表 1. 各次算法处理后并网点功率的波动情况

波动值	未处理	一次滑动平均处理	二次滑动平均处理	修正后
$\sum (P_s(K+1) - P_s(K))^2$	132,858	64,045	52,572	40,928

4. 仿真验证

4.1. 仿真模型参数

在 PSIM 仿真软件中搭好电路进行并网功能的验证。仿真模型设置参数如下：

电压参数：直流母线电压 $V_{dc} = 400$ V，交流母线电压 $V_{ac} = 220$ V。

电源参数：光伏最大功率 $P_{PV} = 5$ kW，风机最大功率 $P_W = 2$ kW。

滤波器参数： $L = 1$ mH， $C = 100$ uF。

SPWM 调制载波频率： $f = 5$ kHz。

PI 参数：电压环 $k_p = 1$ ， $k_i = 30$ ；电流环 $k_p = 0.01$ ， $k_i = 2$ 。

4.2. 基本功能验证

4.2.1. 并网预同步与功率双向流动

电能路由器由孤网运行转为并网运行时，首先需要进行并网预同步控制，DC/AC 逆变器接到指令调

整输出电压 V_R 相角追踪电网电压，其相角追踪过程如图 7 所示，在 0.2 s 时相位达到一致，此时自动合上并网开关，顺利并网。

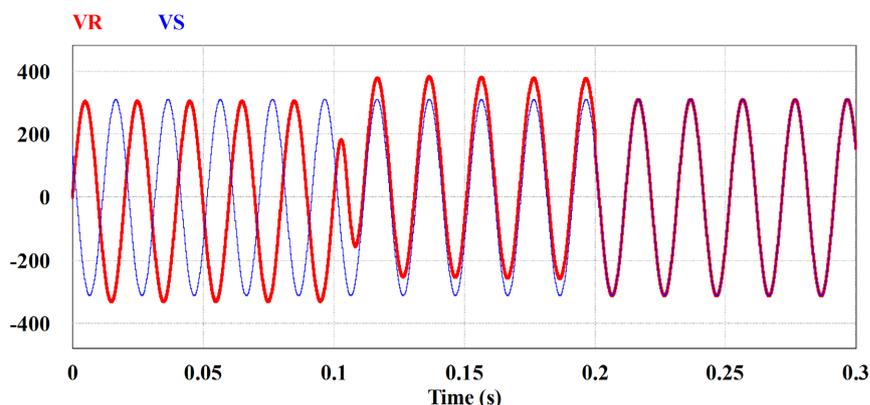


Figure 7. Waveform diagram of inverter tracking grid phase
图 7. 逆变器跟踪电网相位波形图

在并网运行模式下，当分布式电源出力不足时，可以从大电网购入电能；而当分布式电源出力很多系统内部有剩余电能时可以外送售卖给电网。

图 8 所示为电能路由器在并网运行下分布式电源出力逐渐增加时的功率双向流动实验波形。其中 $0.1 \cdot P_0$ 为分布式电源功率，在仿真过程中逐渐增加。 $30 \cdot I_s$ 为电网侧的电流波形， V_{dc} 和 V_s 分别为直流母线和交流母线的电压波形。

在 0.25 s 之前，分布式电源出力不断增加但仍不足负载功率的需求，此时交换功率的方向为从电网流向电能路由器。电网提供不足的功率保证功率平衡，但流向电能路由器的功率开始逐渐减小，体现在实验波形上即电网电流的不断减小。在 0.25 s 时刻，交换功率近似减小到 0，之后功率开始反向流动，从电能路由器流向大电网，并且随着分布式电源出力的增加，交换功率也越来越大。在此过程中交直流母线电压都保持在相当稳定的状态。

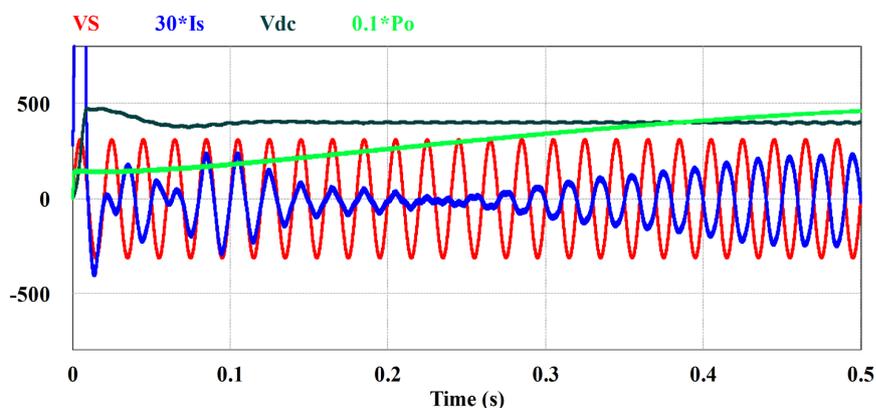


Figure 8. Experimental waveforms for bidirectional power flow
图 8. 功率双向流动实验波形

4.2.2. 光伏单独并网

在白天风机不工作只有光伏单独运行时，需要求得光伏的输出功率控制指令使得并网点功率

$P_S = P_{PV} - P_L$ 平滑。如图所示为白天 6:00~18:00 时刻的仿真结果。其中 10 分钟为一个采样周期，在图 9 中用 0.1 s 的间隔表示。 $P_{S1} = P_{PVmax} - P_L$ 为未处理时的并网功率，波动较大。 P_S 为经过并网控制策略处理后的并网功率，较为平滑。

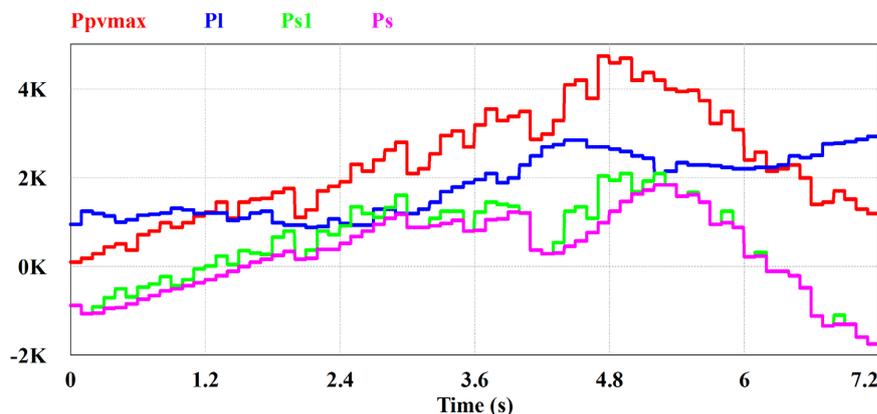


Figure 9. Grid-connected simulation waveform when PV works alone

图 9. 光伏单独工作时的并网仿真波形

根据平滑后系统需要的并网点功率可求得光伏出力指令 $P_{PV} = P_S + P_L$ 。在每一采样时刻，系统会控制光伏先跟踪到最大功率点，然后再继续寻优光伏输出电压参考值使其跟踪指令功率值稳定输出。如图 10 所示为仿真得到的光伏最大功率和实际输出功率，其中 $0 \leq P_{PV} \leq P_{PVmax}$ 。

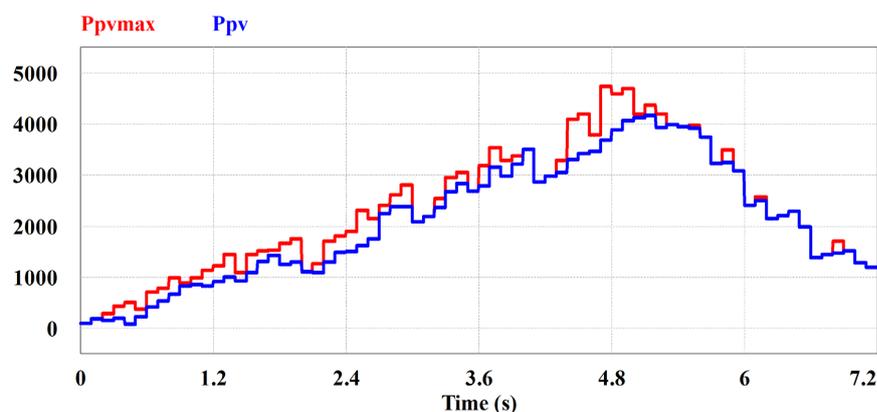


Figure 10. The maximum power and actual output power of photovoltaics obtained by simulation

图 10. 仿真得光伏最大功率和实际输出功率

4.2.3. 风光联合出力

对一整天的风光联合出力并网进行仿真，采用风电优先，光伏次之的风光配合出力策略。风光同时运行时，风机以最大功率输出，求得光伏出力指令并控制光伏输出保证并网点功率 $P_S = P_{PV} + P_{Wmax} - P_L$ 平滑。如图 11 所示为一天 24 小时的光伏和风机最大功率以及负载功率曲线，图 12 中 $P_{S1} = P_{PVmax} + P_{Wmax} - P_L$ 为未经过处理的并网功率， P_S 为经过并网策略处理后得到的平滑的并网功率。

由平滑后系统需要的并网点功率可以求得一天 24 小时风机和光伏功率指令，如图 13 所示。当白天风光同时运行时，风机优先输出，工作于最大功率跟踪模式，则指令功率 $P_W = P_{Wmax}$ 。当夜晚只有风机

单独工作时，其控制方法与光伏单独工作时同理，且指令功率满足 $0 \leq P_w \leq P_{wmax}$ 。求得风机功率指令后，可求得光伏功率指令 $P_{pv} = P_s + P_L - P_w$ 。系统控制风机和光伏按此指令值稳定输出，保证了并网点功率的平滑，提高了用户用电的安全性和可靠性。

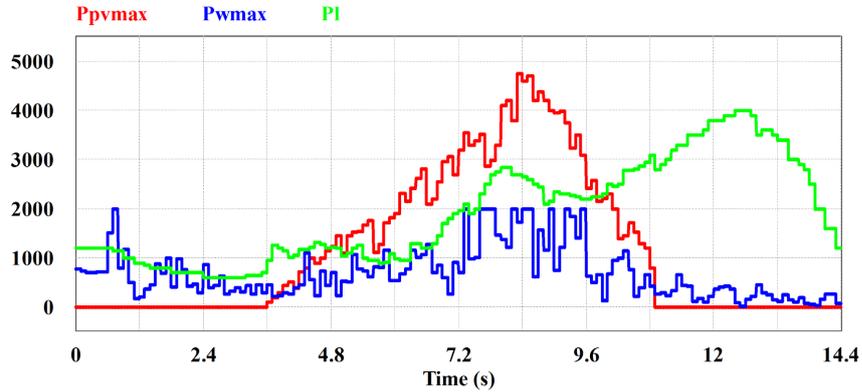


Figure 11. The curve of the maximum power of photovoltaic and wind turbines and the load power in a day

图 11. 一天中光伏和风机最大功率以及负载功率曲线

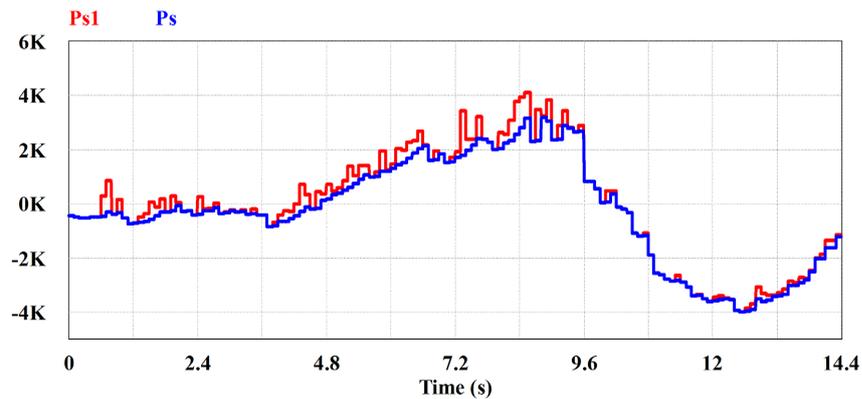


Figure 12. Grid-connected power when wind power and photovoltaic work together

图 12. 风光联合工作时并网点功率

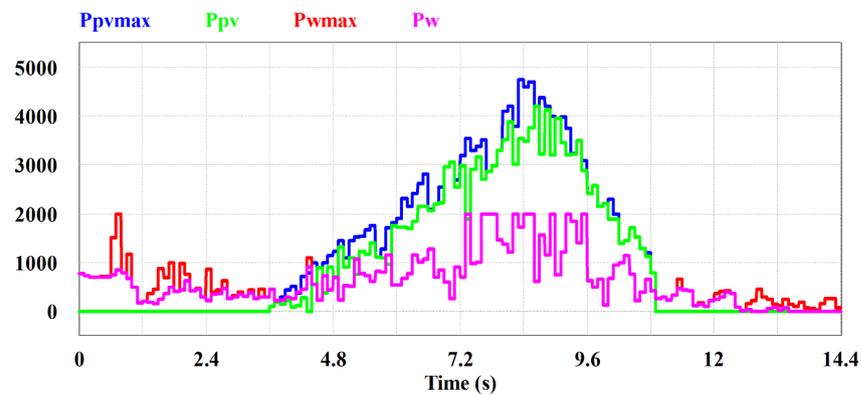


Figure 13. The maximum power and actual output power of wind and photovoltaics obtained by simulation

图 13. 仿真得风光最大功率和实际输出功率

5. 结论

本文根据家庭用户接入分布式电源需要对能量进行管理设计了一种中小容量的户用级单相交直流电能路由器, 其满足交直流分布式电源和负载的即插即用, 功率多向流动和孤网并网工况下稳定运行, 提高用户用电经济性和供电质量。针对分布式电源受天气影响出力波动, 造成电能路由器工作于并网工况下并网点功率波动, 影响大电网安全和系统本身稳定运行问题, 本文提出了一种改进滑动平均算法来求得并网点目标平滑功率和对应的分布式电源输出功率指令值。以光伏单独工作时的情况为例, 详细介绍了该功率平滑算法的实现流程。

仿真结果表明, 在维持交直流母线电压稳定的基础上实现了并网功率的平滑, 验证了该方法的可行性和有效性。该方法原理简单, 计算量小, 可节约存贮单元, 满足功率输出实时性的要求。

参考文献

- [1] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 20-28.
- [2] 孟明, 陈世超, 赵树军, 等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
- [3] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 罗建. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3314-3325.
- [4] 宗升, 何湘宁, 吴建德, 李武华, 赵荣祥. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570.
- [5] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5009.
- [6] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学(信息科学), 2014, 44(6): 702-713.
- [7] 徐梦超, 邵能灵, 黄文焘, 郑晓冬, 李国栋, 陈培育, 王旭东. 基于社区能源网的电能路由器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 177-183.
- [8] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
- [9] Dall'Anese, E., *et al.* (2014) Optimal Dispatch of Photovoltaic Inverters in Residential Distribution Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **5**, 487-497. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2292828>
- [10] Bahrami, S., Parniani, M. and Vafaeimehr, A. (2012) A Modified Approach for Residential Load Scheduling Using Smart Meters. 2012 3rd *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, 14-17 October 2012, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465717>
- [11] 郭骞. 新能源电站中储能电池技术的对比与发展前景预测[J]. 太阳能, 2021(12): 5-10.
- [12] 吴宇奇, 叶雨晴, 马啸, 王子璇, 李正天, 徐海波. 抑制电压波动与规避频率越限的孤岛微电网并网预同步方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 56-64.
- [13] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.