

基于 PLECS 的孤岛微电网分层控制策略设计与仿真

罗博航, 魏辰阳, 梁克靖, 许少伦

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 随着新能源发电的不断发展, 微电网的市场前景愈发广泛。微电网中的分布式微电源主体数量多、分布范围广, 使用下垂控制能够精确分配不同微电源之间的输出功率。然而, 通过下垂控制策略控制孤岛交流微电网, 会导致母线电压和频率偏移。因此, 设计了一种基于下垂控制改进的分层控制策略, 以保证母线电压和频率不因下垂控制而偏移给定参考值。然后, 利用电力电子仿真软件 PLECS 搭建了该改进分层控制策略下的微电网模型, 并封装为集成模块。该集成模块提供了与其他电力仿真软件或设备兼容的接口。最后将 Chroma 系列直流电源模拟真实的光伏电池板接入 PLECS 软件, 通过对两种控制策略下的微电网仿真对比, 验证了分层控制策略的有效性与 PLECS 下模块的可扩展性。

关键词: 微电网; 下垂控制; 分层控制; 仿真软件 PLECS

Design and simulation of hierarchical control strategy for islanded microgrid based on PLECS

LUO Bohang, WEI Chenyang, LIANG Kejing, XU Shaolun

(Electronic Information and Electrical Engineering College, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the continuous development of new energy power generation, the market prospect of the microgrid is becoming more extensive. There are many distributed micro generators in microgrid. The droop control can accurately distribute the output power between different micro generators. However, the droop control strategy for islanded AC (alternating current) microgrid will lead to bus voltage and frequency offset. Hence, an improved hierarchical control strategy based on droop control is designed, ensuring that the bus voltage and frequency will not deviate from the given reference value due to droop control. Then, the microgrid model based on the improved hierarchical control strategy is built by using power electronic simulation software PLECS, and packaged as an integrated module. The integrated module provides a compatible interface with other power simulation software or device. Finally, Chroma DC (direct current) power supply is connected to the PLECS software to simulate the real photovoltaic panels. By comparing the simulation result of microgrid based on the two control strategies mentioned above, the effectiveness of the strategy and the scalability of the module are verified.

Key words: microgrid; droop control; improved hierarchical control; simulation software PLECS

0 引言

微电网是指由分布式电源、储能装置、能量

转换装置、保护装置、监控设备和负荷等模块按照一定拓扑结构组成的小型发电配电系统^[1]。相比于传统集中配置调度的大电网, 其易于根据不

同的地理位置、电源特性及用户需求进行有针对性的设计和调整,是一种契合分布式能源的新型电网技术。

交流微电网作为当前实际应用中微电网的主要形式^[2],包含并网运行和孤岛运行两种运行模式。在并网运行模式下,系统母线电压和频率由大电网决定,可以较为容易地达到功率均分^[3];在孤岛运行模式下,为使不同变流器之间根据各自容量的比例对负荷总功率进行分配,通常采用下垂控制作为交流微电网的能量控制策略。下垂控制能够调节变流器输出的电压幅值和频率,从而保持额定输出功率^[4]。然而,变流器到交流母线之间存在线路阻抗,使得变流器实际运行点偏离下垂曲线上的标准点^[5],最终将导致母线电压和频率偏移恒定值,影响电压质量。

基于以上问题,本文提出一种基于下垂控制改进的分层控制策略,目的是在保持下垂控制准确分配变流器功率的基础上,维持微电网系统母线电压幅值和频率恒定。

同时,实际应用场景下不同直流电源接入的交流微电网各具特色。光伏电池板、风电系统接入的微电网受天气影响,波动性较大;而储能电源受容量等设备参数影响,难以充分满足微电网的运行参数需求。Multisim、Simulink 作为两款常用的仿真软件,彼此之间的兼容性较差,也难以根据实际场景需要扩展模块。

PLECS 是一款专业的电力电子仿真软件,具有良好的模块封装性,并提供与其他仿真软件的交互接口。因此,本文在 PLECS 上搭建分层控制策略下的微电网模型并封装为集成模块。将 Chroma 系列可编程直流电源接入 PLECS 软件作为输入,以模拟真实工业环境下多种直流电源接入的微电网孤岛运行状态。

总之,本文聚焦典型的交流微电网拓扑,对比孤岛运行状态下交流微电网的下垂控制和分层控制策略。利用 PLECS 搭建孤岛微电网模型并封装成集成模块,仿真验证分层控制策略在微电网控制中的有效性与该模块的可扩展性。

1 交流微电网拓扑结构和控制策略

1.1 交流微电网基本拓扑结构

一个孤岛交流微电网主要由直流电源、负载、变流器、滤波器和控制回路等几个基础模块组成。其中,直流电源往往是光伏电池板、小型风机等以清洁能源为主的发电装置;变流器和滤波器负责对电源的输出并进行变流和杂波过滤,以使其达到使用要求;控制回路则通过预设的控制策略控制母线电压和功率。

本文的研究对象为直流电源接入的孤岛交流微电网。其典型拓扑结构如图 1 所示。

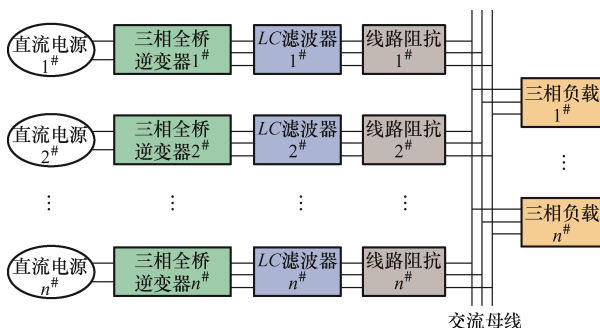


图 1 孤岛交流微电网的典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topology of microgrid

1.2 交流微电网的控制策略

在交流微电网孤岛运行的定电压状态下,各微电源根据控制策略分配功率^[6-7]。以下阐述针对该状态的下垂控制策略与改进分层控制策略的原理。

(1) 下垂控制

下垂控制是微电源根据与传统发电机相似的下垂曲线,通过有功/频率(P/f)下垂控制和无功/电压(Q/V)下垂控制来获得稳定的频率和电压的控制策略。这种控制方法简单可靠,能在保证母线电压和频率相对稳定的情况下,无须依靠组间通信,即可实现微电源组之间的无功功率和有功功率的协调控制^[8]。

经典的下垂控制方程为

$$\begin{cases} f = f_0 - k_P(P - P_0) \\ V = V_0 - k_Q(Q - Q_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_0 为给定的有功功率; P 为线路的实际功率;

f_0 为给定的频率; f 为线路的实际频率; k_P 为频率/有功下垂控制系数; Q_0 为给定的无功功率; Q 为线路的实际无功功率; V_0 为给定的电压; V 为线路的实际电压; k_Q 为电压/无功下垂控制系数。

由式(1)可知, 母线频率与逆变器输出的有功功率成反比关系, 母线电压与逆变器输出的无功功率成反比关系。

控制方程对应的下垂控制曲线如图 2 所示。A 点为给定的参考工作点, 通常为最大功率跟踪点或根据经济调度决定。由下垂曲线表达式可知, 变流器可通过调节频率和电压使不同微电源输出特定比例的功率。同时, 当逆变器输出的有功功率和无功功率偏离其各自给定值时, 母线电压和频率也会随之偏离给定参考值。故传统下垂控制为有差调节, 不能保证电压和频率维持在一个恒定值。为解决下垂控制中由逆变器功率变化引起的母线电压有效值和频率的偏移, 需要采取一定措施修正下垂控制曲线, 抵消电压和频率的偏移量。

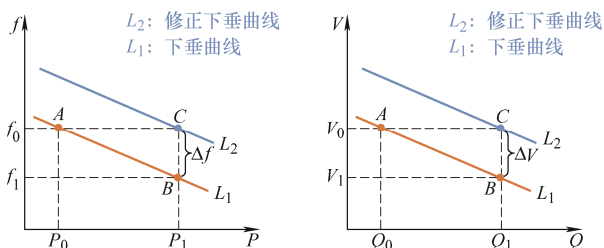


图 2 下垂控制曲线

Fig. 2 Droop control curve

(2) 基于下垂控制改进的分层控制

基于下垂控制改进的分层控制结构与具体控制流程分别如图 3 和图 4 所示。

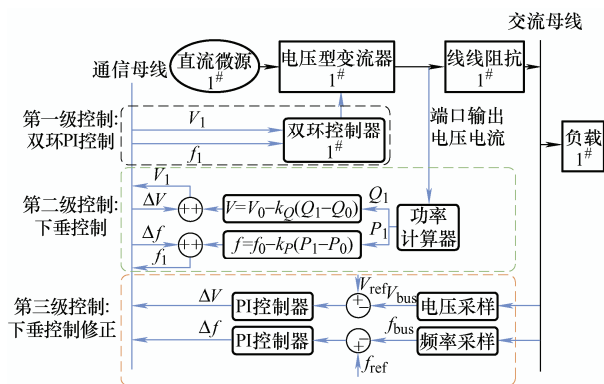


图 3 改进分层控制结构图

Fig. 3 Improved hierarchical control structure

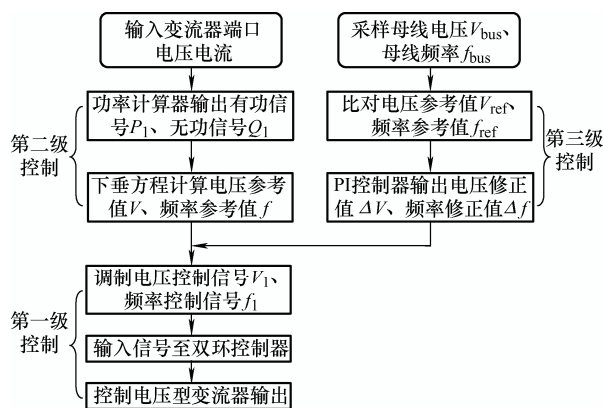


图 4 改进分层控制流程

Fig. 4 Improved hierarchical flow

其中第一层控制为作用于电压型变流器的双环控制。外环作用于电容, 以控制微电网电压恒定; 内环作用于电感, 以控制电流调节输入微电网的功率。双环控制有效改善了系统的动态性能, 使动态响应更快, 对系统扰动的抑制效果更强, 减少了谐波分量。第二层控制为下垂控制, 下垂控制提高了微电网系统中功率分配的准确度。第三层控制是对下垂控制的改善和修正, 目的是在不同变流器之间准确分配功率, 同时保证母线电压不偏移并且锁定系统频率。通信母线用于传递信息传输。

在图 2 所示的下垂曲线中, 假设某变流器的实际工作点为 B 点, 相较于给定参考工作点 A 点, 频率下降 Δf , 母线电压下降 ΔV 。第三层控制将 f/P 和 V/Q 下垂控制曲线分别向上平移 Δf 和 ΔV 单位, 使频率和母线电压仍维持在给定值, 如图 2 中曲线 L_2 所示。即需要利用上层控制计算出 Δf 、 ΔV 的值, 输入变流器中, 对下垂控制曲线进行修正, 修正后下垂控制方程为

$$\begin{cases} f = f_0 - k_P(P - P_0) + \Delta f \\ V = V_0 - k_Q(Q - Q_0) + \Delta V \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δf 为频率下降值; ΔV 为电压下降值。

2 仿真模型

不同于 Multisim、Simulink 等电力电子仿真软件, PLECS 可以与多款电力仿真软件高度兼容, 并提供集成模块、编写特殊的器件特性方程等功

能，具有很高的灵活性和可拓展性。本节利用 PLECS 搭建了包含变流器模块、双环控制模块、下垂控制模块和下垂控制修正模块的分层控制策略模型，并将该模型封装为集成模块。该模块提供了与可编程直流电源供应器及 MATLAB 等常用电力软件的交互接口。

2.1 变流器模块

本节从外部接入两组直流源，与逆变器、控制回路以及一组负载组成典型孤岛交流微电网结构。其中，逆变器和滤波器合称 DC/AC 变流器。变流器的仿真模块与集成模块整体结构如图 5 所示。

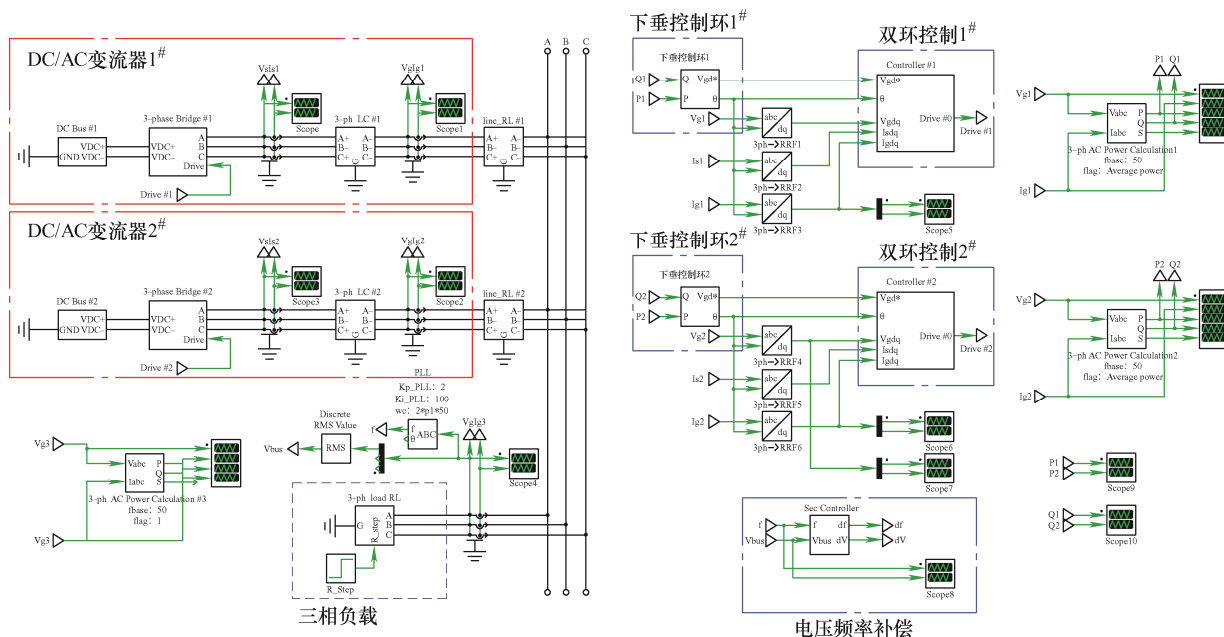


图 5 仿真模型整体结构图

Fig. 5 Structure diagram of simulation model

2.2 双环控制模块

分层控制的第一层为双环控制模块。三相逆变器输出电流、变流器输出电压和变流器输出电流共同经过 Park 坐标变换^[9]，由 abc 坐标变换为 dq 坐标，与下垂控制输出一起作用于双环控制，通过内外双环的比例积分(Proportion Integration,

PI)控制器得到的控制信号经过 Park 反变换得到 abc 坐标系下的控制信号，该信号经由正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)模块转换后，用于控制三相逆变器中的绝缘栅双极型晶体管开关(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的通断。双环控制的仿真模块如图 6 所示。

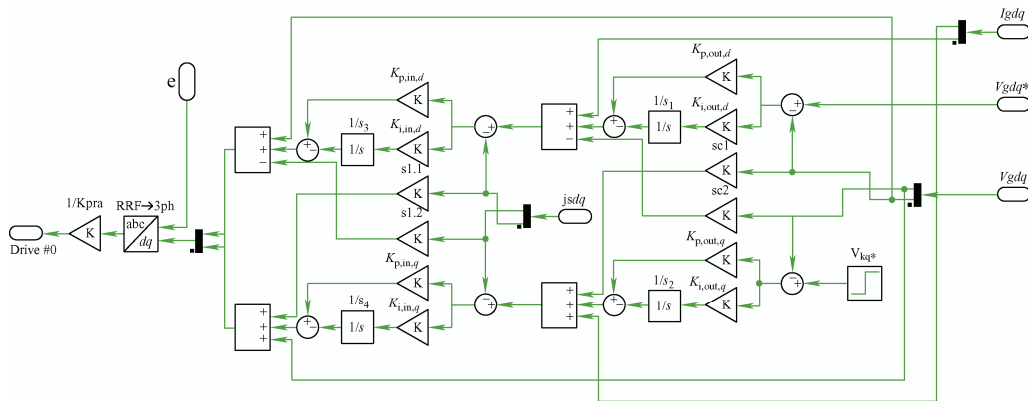


图 6 电压电流控制模块

Fig. 6 Voltage and current control module

2.3 下垂控制模块

下垂控制环为下垂控制电路的封装模块，处于分层控制的第二层。将变流器支路中输出的电压电流信号作为功率计算模块的输入量，计算模块输出的有功和无功信号作为下垂控制的输入，在模块中根据下垂方程计算出电压参考值和频率参考值。电压值作为 dq 坐标系下 d 轴参考值，频率转化为相位参考值 θ ，两者共同作用于双环控制模块。下垂控制的仿真模块如图 7 所示。

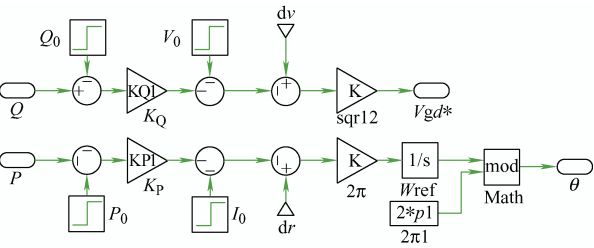


图 7 下垂控制模块
Fig. 7 Droop control module

2.4 下垂控制修正模块

分层控制的第三层为下垂控制修正模块，起电压、频率补偿的作用。将交流母线当前电压的有效值和频率值输入该模块，经过 PI 控制器和限幅，输出母线实时电压和频率与给定参考值的偏差值。下垂控制修正的仿真模块如图 8 所示。

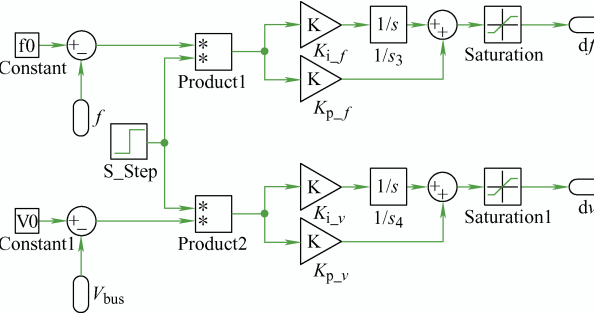


图 8 下垂控制修正模块
Fig. 8 Droop control correction module

3 算例分析

本节从外部接入 Chroma 62000 H 系列直流电源，与变流器模块、一组负载共同组成前文所述的典型孤岛交流微电网结构。Chroma 62000 H 系列直流电源可模拟光伏电池板、小型风电和储能

设备等多种直流电源，接入孤岛交流微电网。本算例模拟光伏电池板接入的孤岛交流微电网，其电力参数及控制参数如表 1 所示。以下从功率分配与电压、频率波动两方面来检验不同控制策略的控制效果。

表 1 微电网参数设置
Tab. 1 Microgrid parameter setting

参数符号	参数含义	数值大小
V_{DC+}, V_{DC-}	直流电压源正负极电压	约 400 V; -400 V
f_s	IGBT 开关频率	20 kHz
L_f	滤波器电感值	0.588 mH
R_f	滤波器电感等效电阻值	0.009 24 Ω
C_f	滤波器电容值	0.010 6 mF
$R_{line}+L_{line}$	线路阻抗	0.05 Ω +20 mH
$R_{load}+L_{load}$	负载阻抗	小负载时 10 Ω +20 mH 大负载时 5 Ω +5 mH
k_Q	无功下垂控制系数	0.003
k_P	有功下垂控制系数	0.002 2
P_0, Q_0	下垂控制给定有功、无功	5 kW、5 kvar
V_0, f_0	下垂控制给定电压有效值、频率值	220 V、50 Hz

3.1 功率分配

首先对孤岛交流微电网分别使用下垂控制策略。设定两个变流器具有相同的下垂控制曲线，电路负载在 0.5 s 时由小负载变为大负载。模型输出波形如图 9~图 11 所示，功率分配结果如表 2 所示。

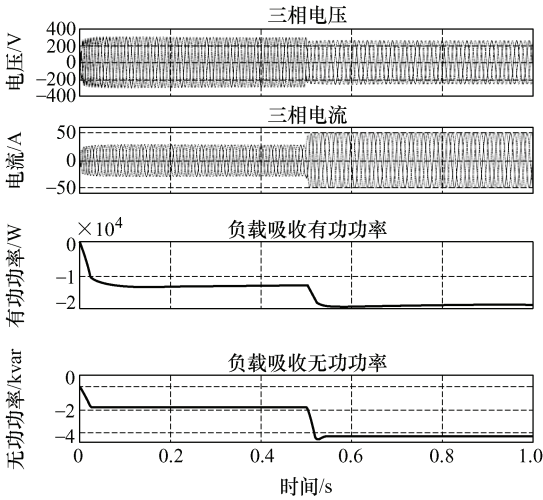


图 9 负载电压、电流及功率波形图
Fig. 9 Load voltage, current and power waveforms

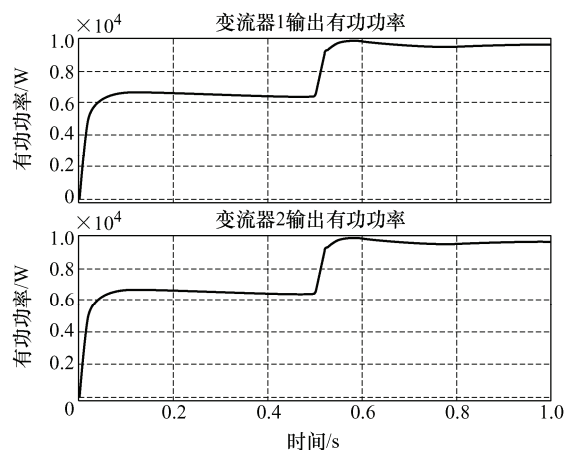


图 10 变流器输出有功功率波形图
Fig. 10 Output active power waveforms of converter

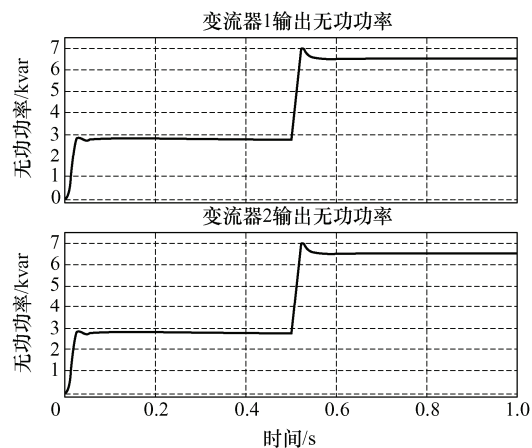


图 11 变流器输出无功功率波形图
Fig. 11 Output reactive power waveforms of converter

表 2 使用下垂控制策略的功率分配结果
Tab. 2 Results of power distribution using droop control strategy

变流器 编号	小负载(0.2 s 时)		大负载(0.7 s 时)	
	有功功率 / kW	无功功率 / kvar	有功功率 / kW	无功功率 / kvar
变流器 1	6.45	9.56	2.77	6.51
变流器 2	6.43	9.58	2.76	6.52

由图 9~图 11 可知,下垂控制策略下,小负载接入后约 0.05 s,模型达到稳定状态;负载变化后约 0.05 s,模型重回稳定。

由表 2 可知,下垂控制策略下,分别接入小负载与大负载时,两个变流器输出功率的差值均处于误差范围内,符合理论上下垂曲线的功率分配要求。

对孤岛交流微电网分别使用改进分层策略时的模型,输出波形与下垂控制策略相似,不再赘述。使用改进分层策略时的功率输出结果如表 3 所示。

表 3 使用改进分层控制策略的功率分配结果
Tab. 3 Results of power distribution using improved hierarchical control strategy

变流器 编号	小负载(0.2 s 时)		大负载(0.7 s 时)	
	有功功率 / kW	无功功率 / kvar	有功功率 / kW	无功功率 / kvar
变流器 1	6.44	9.57	2.75	6.50
变流器 2	6.44	9.56	2.76	6.52

由表 3 可知,改进分层控制策略下,分别接入小负载与大负载时,两个变流器输出功率的差值均处于误差范围内,符合理论上下垂曲线的功率分配要求。

综上,两种控制策略无论在大负载还是小负载下,均能使两个变流器单元根据预定的下垂控制曲线分配功率,并保持变流器输出电压、电流、功率以及负载的电压、电流和功率稳定。

3.2 电压、频率波动

设定孤岛交流微电网 0.5 s 前带小负载运行,0.5 s 后小负载改变为大负载。电路在下垂控制及分层控制下的电压频率波形分别如图 12、图 13 所示。小负载与大负载接入时的电压、频率波动结果分别如表 4、表 5 所示。

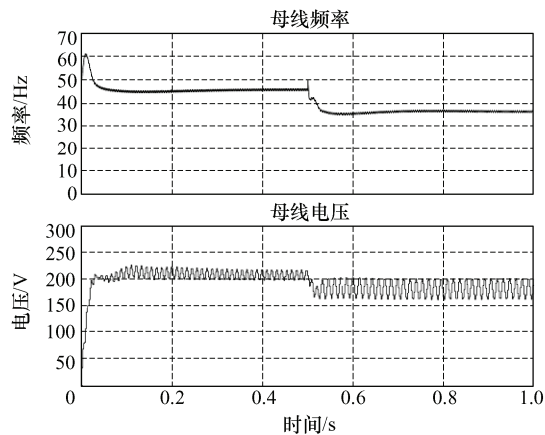


图 12 母线电压频率波形图(下垂控制)
Fig. 12 Bus voltage and frequency waveform (Droop control)

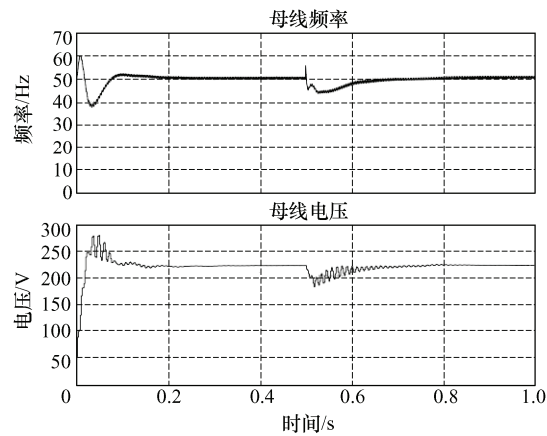


图 13 母线电压频率波形图(分层控制)

Fig. 13 Bus voltage and frequency waveform (Hierarchical control)

表 4 小负载接入时的电压、频率波动结果

Tab. 4 Results of voltage and frequency fluctuation connecting light load

控制策略	母线电压值/ V		母线频率值/Hz	
	上界	下界	上界	下界
下垂控制	215.9	215.2	47.5	47.2
改进分层控制	220.1	219.8	50.2	49.9

表 5 大负载接入时的电压、频率波动结果

Tab. 5 Results of voltage and frequency fluctuation connecting heavy load

控制策略	母线电压值/ V		母线频率值/Hz	
	上界	下界	上界	下界
下垂控制	202.1	162.3	38.5	37.8
改进分层控制	220.2	219.6	50.2	49.8

由图 12、图 13 及表 4 可知，在仅有下垂控制时，虽然系统能够稳定运行，但系统频率偏离 50 Hz 的给定值，母线电压也低于 220 V 的有效值；且随着负载增大，电压和频率进一步跌落，电压有效值波动愈发明显。此时虽然能够稳定运行，但电能质量不佳。在相同负载条件下采用基于下垂控制改进的分层控制时，系统频率能够维持在 50 Hz，母线电压有效值也能维持在 220 V，且在负载增大后已然能够保持不变，电压质量有明显提升。

可见，当微电网处于孤岛、定电压的运行状态时，基于下垂控制改进的分层控制能有效抑制由单一下垂控制引发的电压与频率波动。

3.3 仿真结果分析

本节分别使用下垂控制与分层控制策略，控制孤岛交流微电网的变流器输出。仿真结果分析总结如下：

1) 孤岛交流微电网的负载变化时，下垂控制和改进分层控制均能在短时间内控制各微电源按预定的下垂曲线重新分配功率。

2) 采用单一下垂控制时，系统电压、频率明显偏离给定值，且偏离值随着负载增大而增加；改进分层控制策略能够维持电压波动在±7%以内，维持频率波动在 0.5 Hz 以内，符合 10 kV 电压等级以下交流微电网的电压质量要求。

3) 电力电子仿真软件 PLECS 能接受用户以网络表或电路图形式输入的电路系统，且具有较快的仿真速度、较高的仿真准确度与较高的拓展性，能够胜任微电网仿真工作。

4) 光伏电池板接入的孤岛交流微电网验证了基于 PLECS 的改进分层控制集成模块的有效性。该模块提供与可编程直流电源供应器、其他电力仿真软件兼容的接口，方便开展后续光伏电池板、小型风电和储能设备等多种直流电源接入的孤岛微电网运行状态与故障保护效果测试。

4 结束语

本文设计了一种基于下垂控制改进的分层控制策略。在交流微电网孤岛状态运行时，该策略能精确分配变流器功率，并维持母线电压和频率恒定。通过 PLECS 搭建了改进的分层控制下的微电网模型，并封装为与其他软件兼容的集成模块。Chroma 62000H 系列直流电源接入的孤岛交流微电网验证了分层控制策略的有效性与分层控制模块的可扩展性。

参考文献

[1] 周孝信，陈树勇，鲁宗相，等．能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]．中国电机工程学报，2018，38(7)：1893-1904，2205．

- [2] FARROKHABADI M , CAÑIZA C A , SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions , analysis , and examples[J] . IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 35(1): 13-29.
- [3] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Inertia design methods for islanded microgrids having static and rotating energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5165-5174.
- [4] 李红萍, 杨洪耕, 曾巧燕, 等. 孤岛微电网中改进下垂控制策[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 49-548.
- [5] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴, 等. 孤岛型微网并联逆变器下垂控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 119-124.
- [6] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.
- [7] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.
- [8] ZHAO Z, HU J, CHEN H. Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid based on AC power grid and battery[C]. 2017 IEEE International Conference on Energy Internet(ICEI), 2017.
- [9] 王亮, 王志新, 陆斌峰. 基于 Park 变换的单相光伏并网控制研究[J]. 电气传动, 2015, 45(6): 37-40.

作者简介:



罗博航

罗博航(1999—), 女, 科研助理, 从事能源区块链、电力市场研究。

(收稿日期: 2020-10-9) **EA**