

主从结构微电网并网/孤岛运行模式 平滑切换控制策略

陈仁钊¹, 陈杨², 夏岩², 杨屹立¹, 石进辉², 李惠祝², 张蕊²

(1. 兴储世纪科技股份有限公司, 四川 自贡 643000; 2. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 644000)

摘要:对于主从控制结构的微电网系统,如何抑制切换过程中电压、频率的振荡,实现并网/孤岛运行模式间的平滑切换是一项亟待解决的技术难点。针对微电网并网/孤岛运行模式电压与频率的动态特性,提出一种基于并行运行与数值缓启动器的平滑切换控制策略。并行运行通过同步运行PQ控制与V/F控制策略,抑制了模式切换过程中的电流波动。数值缓启动器则平滑了电流内环的输入给定值,减小了切换过程中瞬时冲击电流对电流内环的影响,抑制了微电网模式切换过程中母线电压与频率的振荡。最后,基于Matlab/Simulink建立光储微电网系统,在并网/孤岛模式切换与负荷加载等工况下进行仿真实验,验证了所提平滑切换控制策略的有效性。

关键词:微电网; 主从结构; 并网运行; 孤岛运行; 平滑切换

中图分类号: TM 76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0008-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240502

Smooth Switching Control Strategy for Grid-connected and Islanding Operation Mode of Microgrid Based on Master-slave Structure

CHEN Renzhao¹, CHEN Yang², XIA Yan², YANG Yili¹, SHI Jinhui², LI Huizhu², ZHANG Rui²

(1. Zonergy, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 644000, Sichuan, China)

Abstract: Addressing the critical technical challenge of mitigating voltage and frequency oscillations during the transition between grid-connected operation and islanding operation modes in microgrid systems with a master-slave control structure is imperative. Focusing on the dynamic characteristics of voltage and frequency during microgrid grid-connected operation and islanding operation mode, a smooth switching control strategy is proposed based on parallel operation and numerical soft starter. Through the synchronized PQ control and V/F control, the parallel operation effectively suppresses current fluctuations during mode transitions. And the numerical soft starter plays a crucial role in smoothing the input reference values for current inner loop, and reducing the impact of transient impulse current on current inner loop during switching process, which suppresses the oscillations of bus voltage and frequency during microgrid mode switching. Finally, a model of photovoltaic-storage microgrid system is constructed using Matlab/Simulink, and the simulation experiments, covering scenarios such as grid-connected/islanding mode transitions and load variations, verify the effectiveness of the proposed smooth switching control strategy.

Key words: microgrid; master-slave structure; grid-connected operation; islanding operation; smooth switching

0 引言

近年来,随着分布式可再生能源的大规模发展^[1],具有清洁、灵活等特点的微电网受到了广泛

的应用与关注。微电网^[2]主要由分布式电源、储能系统以及用电负荷构成,既可以与主网联网为其提供电能支撑,也可以在孤岛运行模式下确保本地负荷的不间断供电。因此微电网在提升主网电能稳定性与故障应急供能等领域发挥着显著的作用^[3]。

基金项目:企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室开放基金(2023WYJ01);四川省科技计划项目(2022SZYZF01)

微电网在并网和孤岛模式下运行的能力是其提

供电力支持作用的关键,其中的并网变流器控制可分为主从控制与对等控制两种^[4]。在电力系统运行过程中,当下微电网处于并网运行时主要采用 PQ 控制^[5],处于孤岛运行模式则采用 V/F 控制^[6]、下垂控制与 VSG 控制等策略。这些控制策略虽易于实现,但在运行模式切换过程中造成的暂态冲击与功率不平衡等问题直接影响着电力系统的安全性与稳定性^[7]。因此,平滑切换策略成为微电网在并网与孤岛运行模式切换之间平稳过渡的关键技术之一。

目前,针对微电网采用主从结构的平滑切换控制的研究已经取得了相应的成果。为解决微电网由并网运行模式切换为孤岛运行过程中主电网功率无法作为 PQ 控制的给定值问题,文献[8]通过设置限幅饱和值控制电流环输出,以实现并网/离网的平滑切换,但限幅饱和值对切换过程干扰较大,影响着切换控制器的参数选定。在此基础上,文献[9]在切换控制中加入预同步控制器,缓解了切换过程中的频率振荡,实现了柔性切换;文献[10]则提出了一种基于 PQ 控制切换为 V/F 控制的平滑切换控制策略,提升了系统处于平滑切换过程时的频率稳定性,确保了微电网与本地负荷间的功率平衡。

对于采用对等控制的平滑切换控制策略,文献[11]采用下垂控制策略实现微电网的并网/离网切换,简化了系统控制结构,但却未考虑并网过程中冲击电流较大的问题。在此基础上,文献[12]提出一种基于下垂控制的微电网运行模式平滑切换控制策略,抑制交直流负荷对微电网孤岛运行控制时系统电能质量的扰动,且在微电网处于运行模式切换时,减小瞬时冲击电流对电流内环结构的冲击。但是在实际工程应用中,下垂控制有效控制的前提是线路阻抗表现为感性,而微电网线路阻抗主要表现为阻性,使得下垂控制的应用具备局限性^[13]。因此,较为成熟且适应性更强的主从控制在当下的实际工程中受到了广泛的应用。

根据上述分析,针对主从结构的微电网并网/孤岛模式切换问题,提出一种基于并行控制与数值缓启动器的平滑切换控制策略:通过并行控制策略实现了 PQ 控制与 V/F 控制的同步运行,抑制了模式切换过程中的电流波动;通过数值缓启动器减小微电网模式切换过程中的瞬时冲击电流,实现微电网运行模式的平滑切换,并基于 Matlab/Simulink 仿真验证了所提平滑切换控制策略的有效性。

1 微电网系统结构

基于主从结构的分布式光储交直流微电网拓扑结构如图 1 所示。系统主体由分布式光伏发电系统、储能系统、交流负荷单元、公共连接点 (point of common coupling, PCC) 以及相应的控制策略组成。光伏发电系统通过 Boost 电路与 DC/AC 逆变器接入 380 V 微电网交流侧;储能系统通过储能变流器接入 380 V 微电网交流侧。微电网在不同工况下运行模式的不同,使得各分布式电源的控制策略也不尽相同。

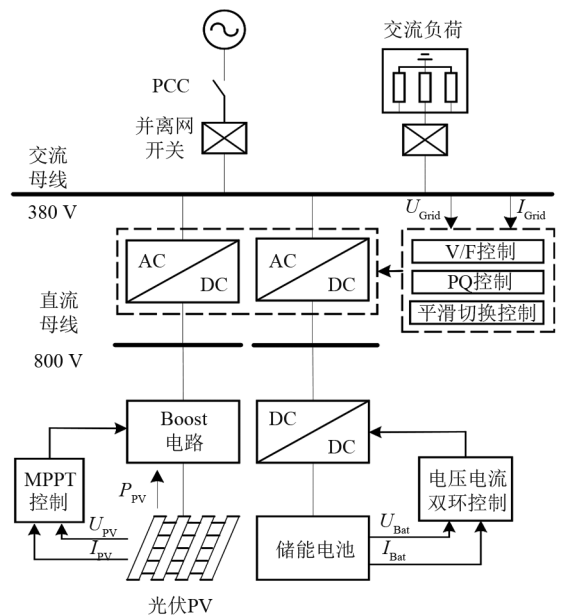


图 1 分布式光储交直流微电网拓扑结构

2 储能变流器控制策略

储能变流器将储能系统直流侧输入的直流电逆变为交流电输出至微电网交流侧,在微电网处于并网运行模式时,采用 PQ 控制策略,能够实现对其他分布式电源溢出功率的消纳,并在其他分布式电源无法满足系统所需功率时提供电能供给;在微电网处于孤岛运行模式时,则采用 V/F 控制策略,为其他分布式电源提供并网所需的电压与频率支撑。

储能系统采用的三相电压型全桥逆变器结构如图 2 所示,图中: L 为滤波电感; R 为电感等效阻抗; C 为滤波电容。储能系统经三相电压型逆变器及 LC 滤波电路,通过相应控制策略,实现微电网与主电网之间的并网/孤岛运行。

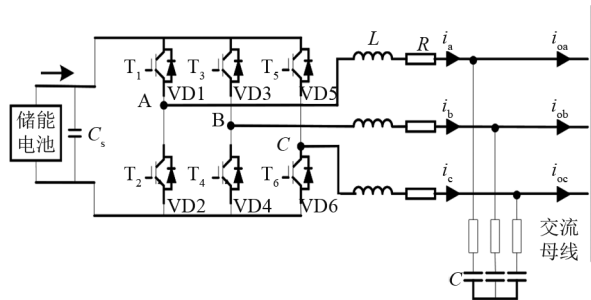


图 2 三相电压型全桥逆变器结构原理

根据图 2 所示的电路模型,当系统三相平衡时,在 a-b-c 静止坐标系下,逆变器输出的三相电压方程为

$$\begin{cases} u_{ia} = Ri_{La} + L \frac{di_{La}}{dt} + u_{oa} \\ u_{ib} = Ri_{Lb} + L \frac{di_{Lb}}{dt} + u_{ob} \\ u_{ic} = Ri_{Lc} + L \frac{di_{Lc}}{dt} + u_{oc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 为逆变器输出电压; i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为电感电流; u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 为负载电压。则输出的三相电流方程为

$$\begin{cases} i_{La} = C \frac{du_{oa}}{dt} + i_{oa} \\ i_{Lb} = C \frac{du_{ob}}{dt} + i_{ob} \\ i_{Lc} = C \frac{du_{oc}}{dt} + i_{oc} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i_{oc} 、 i_{ob} 、 i_{oa} 为负载电流。根据式(1)和式(2)交流侧三相电压和电流方程,经过 Park 变换后得到其在旋转 dq 坐标轴下的电压 u_d 、 u_q 和电流 i_d 、 i_q 关系如式(3)所示,式中 ω 为 dq 轴的旋转角度。

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + u_{od} \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + u_{oq} \\ i_d = C \frac{du_{od}}{dt} - \omega u_{oq} + i_{od} \\ i_q = C \frac{du_{oq}}{dt} + \omega u_{od} + i_{oq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 d、q 轴负载电流; u_{od} 、 u_{oq} 分别为 d、q 轴负载电压。

式(3)表示, u_d 和 u_q 在受控于输出电流 i_d 和 i_q 的同时,在 dq 轴电压之间存在着耦合的现象,同

理可知输出电流之间也存在着耦合现象。为解决上述问题,可通过研究相应控制策略对输出电压、电流进行解耦控制,提升并网/离网运行控制的精度。

2.1 并网运行模式下的 PQ 控制策略

微电网实现并网运行与主电网连接时,储能变流器采用 PQ 控制策略,根据功率输出需求设置功率控制环的参考值,在强电网下,该控制策略在实现可再生能源的最大利用率的同时,也能够为主电网提供良好的电能供给。

PQ 控制主要由功率外环与电流内环组成,功率外环通过对主电网的功率解耦实现有功功率与无功功率单独控制,并网模式下的有功功率 P 与无功功率 Q 可以表示为

$$\begin{cases} P = U_d I_d + U_q I_q \\ Q = U_q I_d - U_d I_q \end{cases} \quad (4)$$

选取 d 轴与 A 相电压矢量同方向,则 d 轴电压分量 U_d 可视为定值,q 轴电压分量 $U_q = 0$,式(4)可简化为

$$\begin{cases} P = U_d I_d \\ Q = -U_d I_q \end{cases} \quad (5)$$

PQ 控制策略的功率外环方程如式(6)所示,电流内环方程如式(7)所示

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s} \right) (P_{ref} - P) \\ i_{qref} = \left(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - \omega Li_q + u_{od} \\ u_{sq} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + \omega Li_d + u_{oq} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为系统有功调节指令与无功调节指令; K_{up} 、 K_{ul} 分别为电压外环控制器的比例和积分系数; K_{ip} 、 K_{il} 分别为电压外环控制器的比例和积分系数; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为电压控制回路输出的 d 轴、q 轴电流分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电流内环输出的 d 轴、q 轴电压分量。

根据上述方程搭建 PQ 控制策略及其对应的控制框图如图 3、图 4 所示。

2.2 孤岛运行模式下的 V/F 控制策略

微电网运行于孤岛模式时,储能变流器采用 V/F 控制策略。V/F 控制策略由 dq 参考框架内工作的

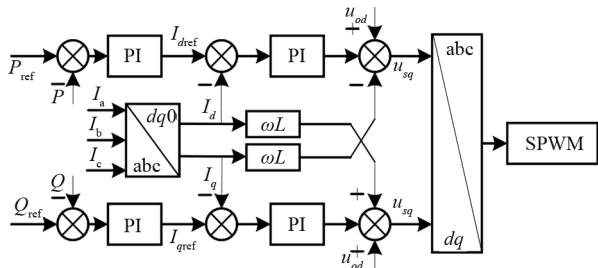


图 3 PQ 控制策略

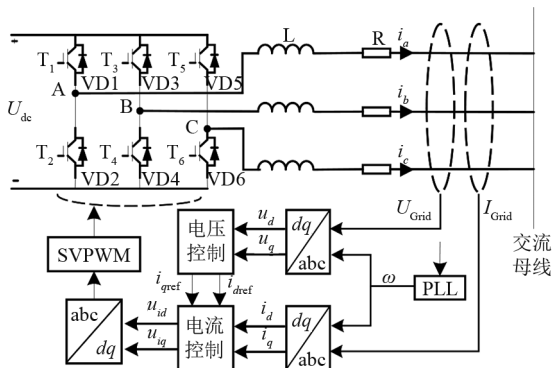


图 5 V/F 控制原理

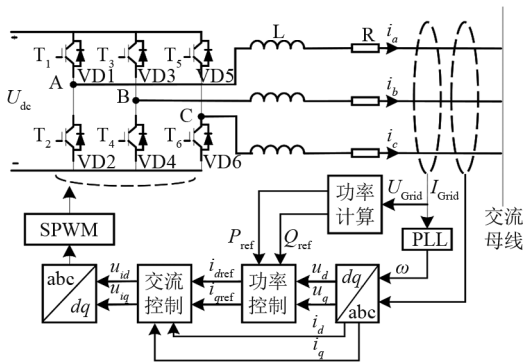


图 4 PQ 控制原理

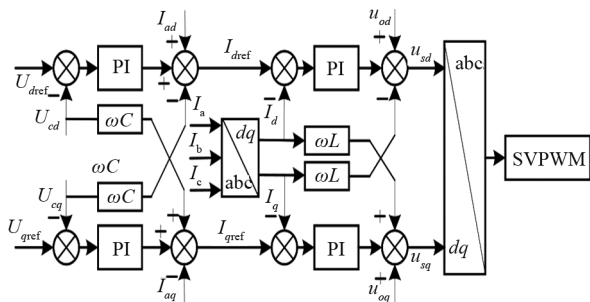


图 6 V/F 控制策略

两个级联控制环组成,电压外环通过施加频率参考以实现电压的独立调节,内环电流控制创建电流伺服系统实现动态自动加速运行,提升系统的动态响应能力,抑制因非线性负载扰动造成输出端电压的谐波失真,提升了系统的动态性能与稳态精度。

根据式(3)得到 V/F 控制策略的电压外环方程如式(8)所示,电流内环方程与 PQ 控制策略的电流内环方程式相同。

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{dref} - u_{ad}) - C\omega u_{aq} + i_{ad} \\ i_{qref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{qref} - u_{aq}) + C\omega u_{ad} + i_{aq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{ad} 、 i_{aq} 分别为系统滤波后输出电流的 d 轴、 q 轴分量; u_{ad} 、 u_{aq} 分别为系统滤波后输出电压的 d 轴、 q 轴分量。

根据上述方程搭建 V/F 控制原理框图如图 5 所示,由此可得 DC/AC 变换器的 V/F 控制策略如图 6 所示。

3 微电网运行模式平滑切换控制

在实际应用过程中,微电网可运行于孤岛或并网两种模式。根据主电网的调度需求与自身实际工况,微电网需在并网/孤岛两种运行模式之间进行切换,如何在微电网运行模式切换时,特别是在主电网

突发故障造成微电网非计划性孤岛运行,导致微电网电压与频率发生剧烈变化的情况下,确保微电网运行模式的平滑切换,是目前研究的技术热点与难点。

3.1 模式切换所需解决的关键问题

针对采用主从结构的微电网系统,为实现其在并网/孤岛运行模式下的平滑切换,需着力解决以下几个关键技术难点。

1) 主电网发生非计划性掉电,使得微电网切换为孤岛运行模式时,并网功率瞬时衰减为 0。此时在孤岛检测完成前,主控单元处于 PQ 并网控制模式,给定功率仍维持为并网参考值,造成主控单元的输出功率同本地负荷功率不平衡,使得微电网交流侧电压与频率出现闪变。

2) 传统控制策略运行在模式切换状态时,电力控制内环的输入给定值发生瞬时突变,对主控单元的输出电流造成很大的扰动。

综上所述,传统的切换控制策略在微电网发生非计划性孤岛切换时无法快速、稳定地控制输出参考值,因此,在平滑切换过程中如何保持电压幅值、相位与频率的一致性,以减轻微电网并网、离网切换时的瞬时冲击,实现微电网的柔性平滑切换成为亟待解决的问题。

3.2 并网/孤岛平滑切换控制技术

基于上述储能变流器在微电网处于不同运行模

式时采用不同控制策略的运行特性,以及微电网在模式切换控制时所需解决的关键性问题,提出一种基于并行控制与数值缓启动器的平滑切换控制策略,在维持电流内环控制结构稳定的同时,减小了瞬时冲击电流对控制系统的冲击。具体控制结构如图 7 所示。

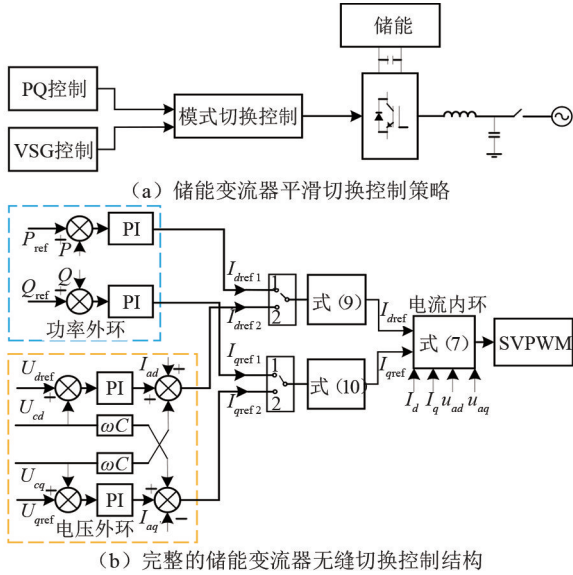


图 7 平滑切换控制结构原理

并行控制旨在并网 PQ 控制与孤岛 V/F 控制同时运行。当微电网收到模式切换控制指令时,储能变流器平滑切换控制策略只在功率外环控制与电压外环控制结构间切换,以维持电流内环控制结构的稳定,并根据切换指令输入相应电流的参考值,以确保系统在并网和孤岛模式之间实现平滑的切换。

数值缓启动器旨在将微电网模式切换前 PQ 控制回路的输出电流给定值作为缓启动器初值,将模式切换后 V/F 控制回路的输出电流给定值作为缓启动器终值,经数值缓启动器调节方程所得到的输出值作为电流解耦控制回路的给定值,实现储能变流器由 PQ 控制至 V/F 控制的平滑切换。具体数值缓启动器的调节如式(9)、式(10)所示。

$$\begin{cases} I_{dref} = I_{drefc} + \int_0^T \Delta i_{Ld} dt \\ \Delta i_{Ld} = (I_{drefc} - I_{drefi})/T \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{qref} = I_{qrefc} + \int_0^T \Delta i_{Lq} dt \\ \Delta i_{Lq} = (I_{qrefc} - I_{qrefi})/T \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{dref} 、 I_{qref} 为缓启动器输出至电流解耦控制回路的参数给定值; I_{drefc} 、 I_{drefi} 为微电网系统在模式切换

过程前的电流参数给定值,将其作为缓启动器的输入初值; Δi_{Ld} 为步长; I_{drefi} 、 I_{qrefi} 为微电网系统在模式切换过程后的 V/F 控制策略输出的电流参数给定值,将其作为缓启动器的输入终值; T 为从初值到终值的缓启动时间。

根据式(9)、式(10)可知,此缓启动器能够使得微电网系统在并网/孤岛运行期间,针对电流解耦控制结构的输入给定值由 I_{drefc} 、 I_{qrefc} 平滑过渡到 I_{drefi} 、 I_{qrefi} ,经缓启动器调节后,减小了系统平滑切换过程中冲击电流畸变对电流解耦控制回路的影响,实现了微电网在并网/孤岛过程间的平滑切换。

4 仿真验证与分析

为了验证所提出的控制策略的有效性,搭建如图 1 所示的基于主从结构的微电网仿真模型,主从控制结构的微电网主要参数如表 1 所示。进行仿真验证时,重点围绕着微电网平滑切换难度较大的非计划性孤岛运行展开分析,进而验证所提平滑切换控制策略的有效性。图 8 为微电网中各分布式电源在系统并网/孤岛运行模式平滑切换时的输出功率仿真结果。

表 1 光储交直流微电网系统的主要参数

参数	数值
电压外环比例系数	5
电压外环积分系数	100
电流内环比例系数	10
电流内环积分系数	150
采样频率 f /kHz	10
交流侧滤波电感 L_3 /mH	5
交流侧滤波电容 C_5 / μ F	20
额定电压 U_n /V	380
标称频率 f_n /Hz	50

从图 8 能够直观地看出:微电网在 0.5 s 前处于并网运行模式,在 0.5 s 后发生非计划性脱网切换为孤岛运行模式,光伏发电系统在整个仿真过程中持续向电网输出功率 15 kW;负荷所需功率分别在 0.1 s 与 0.5 s 时加载为 5 kW 与 25 kW;主电网在 0.5 s 前消纳光伏系统冗余的发电功率,在模式切换后脱离微电网运行;储能系统为应对微电网模式切换后光伏系统无法满足加载负荷所需功率的问题,对微电网输出功率由 3 kW 提升至 10 kW,为微电网的稳定运行提供电能支撑。

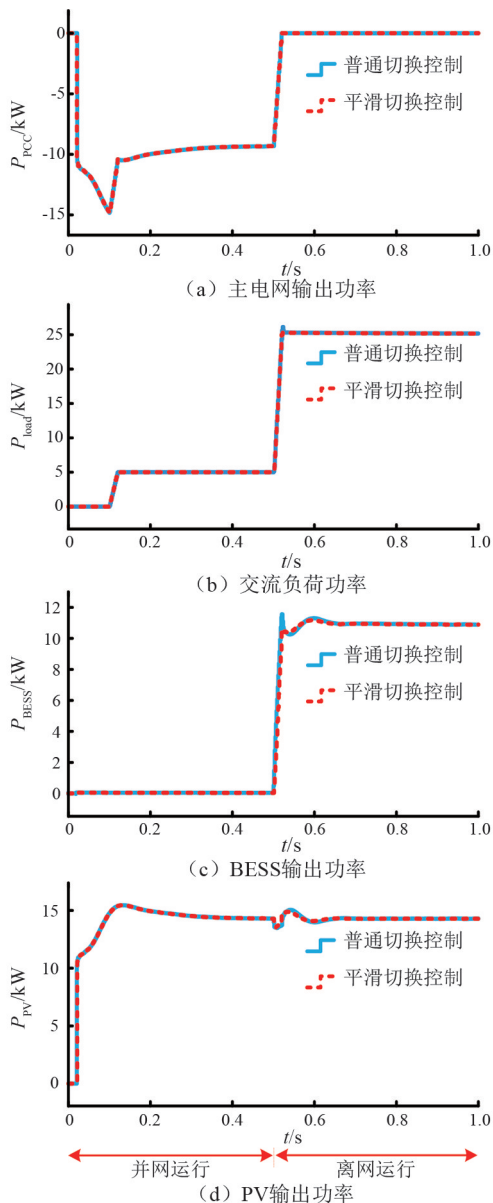


图 8 基于不同切换控制策略下的各分布式电源输出功率仿真结果

由上述仿真结果可以得出,采用平滑控制策略的微电网在并网切换为孤岛模式时,较普通切换控制而言,能够很好地平抑因切换冲击电流造成的储能系统、交流负荷以及光伏发电系统的输出功率,且控制性能优于普通切换控制策略,可以实现微电网模式切换的平滑过渡。

图 9 为在不同模式切换控制策略下的微电网与主电网间相电压与频率的对比仿真曲线。由图可知:1)在电压幅值与相位控制方面,采用平滑切换控制的微电网 ab 相间电压在模式切换后仅发生微小抖动,相位偏差值为 2° ,且在 0.02 s 后迅速恢复;而采用普通切换控制策略的光储微电网在切换过程中的电压相位偏差则为 3° 。2)在频率控制方面,采

用平滑切换控制策略的微电网在模式切换控制前后微电网频率发生轻微振荡,超调量较小,频率偏差极值为 0.06 Hz ,经过 0.10 s 快速恢复为 50 Hz ;而采用普通切换控制策略的微电网在切换前后电网频率的偏差极值为 0.09 Hz ,且频率恢复时间为 0.13 s 。因此,基于缓启动器的平滑切换控制策略较普通切换控制策略而言,在电压相位偏差抑制、频率波动抑制以及恢复方面具有明显的优越性,能够为光储微电网在模式切换过程中提供有力的电压与频率支撑,实现其运行模式的平滑切换。

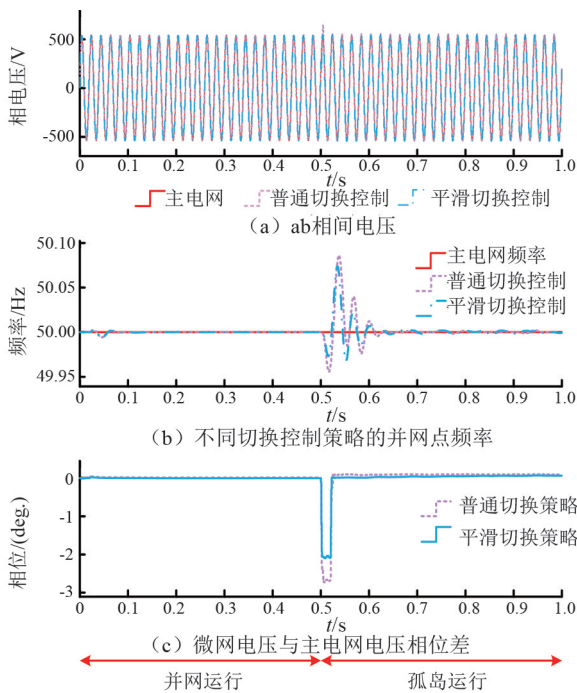


图 9 微电网与主电网间电压与频率对比仿真结果

基于上述仿真分析可知,所提出的平滑切换控制策略可以有效地抑制系统运行模式切换期间的功率振荡,提供有力的电能支撑能力,实现了微电网运行模式的平滑切换。

5 结 论

上面提出了一种适应微电网并网/离网平滑切换控制策略,搭建了采用主从结构的微电网的并网/离网切换仿真模型,验证了系统理论分析的正确性与控制策略的有效性,主要结论如下:

1)引入并行控制策略,在微电网模式切换时,变更主变流器控制策略的同时维持电流内环给定电流值的稳定输入,减小因控制回路切换造成的瞬时冲击电流对电流内环结构的影响。(下转第 52 页)

科学版), 2021, 48(6): 71-80.

- [13] 柳洋, 何永秀, 李漠兴, 等. 市场环境下抽水蓄能电站的价格市场衔接机制设计与效益评估[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 42-49.
- [14] 谢正义, 王义民, 畅建霞, 等. 新能源并网下混合式抽水蓄能电站竞价策略[J]. 水力发电学报, 2023, 42(12): 14-26.
- [15] 马良, 翟海燕, 杨文婷, 等. 现货市场下抽水蓄能电站电量收益及综合效益分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S1): 283-289.
- [16] 罗莎莎, 刘云, 刘国中, 等. 国外抽水蓄能电站发展概况及相关启示[J]. 中外能源, 2013, 18(11): 26-29.
- [17] 孟鑫成. 电力市场条件下抽水蓄能电站辅助服务补偿机制研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [18] 张溟生, 陈涛, 李永兴. 日本抽水蓄能电站考察述评[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 1-5.
- [19] 罗开颜, 王睿, 刘庆, 等. 国外抽水蓄能电站盈利模式

(上接第 13 页)

2) 引入数值缓启动器, 在微电网并网/孤岛模式切换过程中, 使得输入电流内环控制结构中的参考给定值缓慢变化, 进一步减小因控制结构切换造成的瞬时冲击电流, 实现了微电网并网/孤岛运行模式的平滑切换。

参考文献

- [1] 乐健, 廖小兵, 章琰天, 等. 电力系统分布式模型预测控制方法综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 179-191.
- [2] 吴宇奇, 叶雨晴, 马啸, 等. 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.
- [3] XIAO J F, WANG P, SETYAWAN L. Implementation of multiple-slack-terminal DC microgrids for smooth transitions between grid-tied and islanded states[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 273-281.
- [4] 张纯江, 徐菁远, 庆宏阳, 等. 主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 125-133.
- [5] ANSARI S, CHANDEL A, TARIQ M. A comprehensive review on power converters control and control strategies of AC/DC microgrid[J]. IEEE Access, 2020, 9: 17998-18015.
- [6] GAO D W Z. Basic concepts and control architecture of microgrids[J]. Energy Storage for Sustainable Microgrid, 2015: 1-34.
- [7] TANG X S, DENG W, QI Z P. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 698-706.

探析[J]. 中国能源, 2022, 44(7): 16-23.

- [20] 王昊婧. 新形势下我国抽水蓄能电站运营效益评价方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [21] 周丽. 抽水蓄能电站主辅市场容量分配模型及竞价策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

作者简介:

何璞玉(1991), 男, 硕士, 经济师, 研究方向为电价机制与电力技术经济;

张玉鸿(1970), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电价机制与电力技术经济;

焦杰(1992), 男, 硕士, 经济师, 研究方向为电价机制与电力技术经济;

任文诗(1994), 女, 硕士, 经济师, 研究方向为电价机制与电力技术经济;

张冀嫫(1987), 女, 硕士, 高级经济师, 研究方向为电价机制与电力技术经济。

(收稿日期: 2024-05-23)

- [8] AHMED I, SUN L T, CHEN X. A novel control scheme for microgrid inverters seamless transferring between grid-connected and islanding mode [C]//2017 China International Electrical and Energy Conference (CIEEC), October 25-27, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017: 167-172.
- [9] LI H J, WANG J, HU A P, et al. Smooth switching control strategy for microgrid based on state following controller [C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China. IEEE, 2018: 1-4.
- [10] LIANG B M, KANG L, HE J Z, et al. Coordination control of hybrid AC/DC microgrid [J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 3264-3269.
- [11] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, LUNA A, et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4088-4096.
- [12] 许胜, 曹武, 赵剑锋. 微网稳定运行与模式平滑切换综合控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3855-3867.
- [13] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.

作者简介:

陈仁钊(1970), 男, 硕士, 高级工程师, 从事智能微电网分布式能源、储能电池及电池管理系统研究;

陈杨(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与智能电网控制;

夏岩(1983), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子技术与新能源发电。

(收稿日期: 2024-02-23)