

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209341

基于光储控制的微电网改进预同步控制 及离并网切换策略研究*

张文煜¹ 李明¹ 任巍曦¹ 刘宏勇¹ 赵靖英²

(1. 国网冀北张家口风光储输新能源有限公司 张家口 075000; 2. 河北工业大学电气工程学院 天津 300131)

摘要: 光储配合的微电网预同步控制和离并网切换策略是保证电网平滑运行的重要支撑。针对微电网和大电网之间存在的电压幅值、相位和频率偏差等问题,基于储能逆变器的V/f控制,引入大电网电压作为控制器参考量,简化预同步控制环节结构,提出一种改进的预同步方法。基于离网到并网负序电流变化,提出孤岛检测方法,确定离网信号的发出。考虑光储电源输出随机性和离并网切换特点,提出两储能单元分时转换V/f控制模式和P/Q控制模式的离-并网切换策略,分时控制降低系统切换冲击。设计离-并网切换试验、并-离网切换试验、三组光储出力并网策略对比实验,仿真运行结果表明,改进预同步方法在保证离-并网电压幅值、频率、相角偏差分别小于1%、±0.1 Hz、5°的同时,结构简单;基于两储能单元切换策略的并-离网切换时间缩短、冲击降低,验证了改进预同步方法和基于两储能单元切换策略的有效性。

关键词: 光储微网;离并网切换策略;改进预同步控制;V/f控制;P/Q控制

中图分类号: TM727 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on improved pre synchronization control and off-grid/on-grid switching strategy of microgrid based on optical storage control

Zhang Wenyu¹ Li Ming¹ Ren Weixi¹ Liu Hongyong¹ Zhao Jingying²

(1. State Grid Jibei Zhangjiakou Wind and Solar Energy Storage and Transportation New Energy Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China;

2. College of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: The off-grid switching strategy of solar-storage microgrid is an important support to ensure the smooth operation of the grid. Aiming at the problems such as deviation of voltage amplitude, phase and frequency between the microgrid and the large power grid, based on the V/f control of the energy storage inverter, the large power grid voltage is used as the reference value of the controller to simply the structure of the pre-synchronization control link. An improved pre-synchronization method is proposed. Based on the negative sequence current change from off-grid to grid-connected, the islanding detection method is explored to determine the off-grid signal. Considering the output characteristics of photovoltaic power supply and off-grid switching operation, a control mode of two energy storage units is proposed. The switching sequence of V/F and P/Q control modes of different energy storage units is determined. According to the time-sharing conversion, the impact of system switching is reduced. Off-grid switching test, parallel-off-grid switching test, three groups of optical storage and output power grid-connected strategy simulation comparison tests are designed. The results show that off-grid voltage deviations of amplitude, frequency and phase angle are less than 1%, ±0.1 Hz and 5° respectively with improved pre-synchronization control, and the structure is more simple. Based on the switching strategy of the two energy storage units, the switching time of the off/grid mode is shortened and the impact is reduced. The result verifies the effectiveness of the proposed improved pre-synchronization method and the switching strategy based on the two energy storage units.

Keywords: solar-storage microgrid; off-grid switching strategy; improved pre-synchronization control; V/f control; P/Q control

0 引言

清洁、高效和环保的风光等可再生新能源综合利用是

实现“双碳”战略目标的重要途径。光伏、风能等清洁能源常以微电网形式接入到大电网^[1-2]。新能源微电网并网运行时,各类发电单元的控制旨在输送符合标准的电能并配

收稿日期:2022-03-20

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(5137704)、河北省自然科学基金(E2019202481)、河北省自然科学基金(E2017202284)、河北省重点研发计划项目(20312102D)、公司成本类项目(2021120011000683)资助

合大电网进行调控;孤岛运行时,应配置主电源维持微电网母线指标^[3]。大电网故障等可能导致的新能源厂站非计划离网,先后涉及离网切换、孤岛运行网切换。为助力减碳,微电网可依赖新能源孤岛经济运行;为保证系统电压和频率的稳定性,要求离并网切换速度快,暂态电压、幅值及频率可“平滑”地无缝衔接^[4]。新能源为主体的新型电力系统将再提高风光等新能源接入比例,对系统的调节“裕度”、频率越限、功率/电压稳定、暂态过电压、宽频振荡等提出更大挑战^[5]。新能源微电网一次电压、频率、惯量、短路容量支撑能力和并网比例攀升提高的发展对孤岛运行的经济性和离并网切换的平滑性提出更高要求。

微电网离并网平滑切换策略旨在暂态切换中实现网荷电压、幅值及频率的无冲击“平滑”无缝衔接。文献[6]提出一种适用于主从控制与对等控制结合条件下的控制策略,该策略离网过程中对电压、相位进行积分控制,并网过程中对电压的相位和幅值进行无差调节控制,实现平滑切换。文献[7]以主从结构微电网为研究对象,根据变流器在微电网切换过程中的不同作用,提出一种混合型交/直流微电网的电压-功率控制方法,并引入电压/电流参考补偿算法,有效抑制PQ控制和V/f控制转换引起的PI控制器扰动。文献[8]针对分布式系统中储能子模块平衡能量过程中的抖振问题,引入新的组合函数代替幂次函数,在传统滑模面基础上设计PID滑模面,减小系统超调。文献[9]提出了一种电压源逆变器在独立和并网运行模式之间的平滑过渡控制策略,利用下垂控制调节实际潮流,无需外部通信。文献[10]提出一种基于卡尔曼滤波的同步并网策略,基于微电网前一次状态和本次状态的差值,利用卡尔曼滤波算法预测下一状态,解决微电网与大电网同步并网过程中各分布式电源协调控制及平滑、快速并网问题。文献[11]提出一种基于虚拟同步发电机的并-离网无缝切换控制策略,简化控制结构,并有效抑制切换瞬间的有功、无功冲击。

预同步是微电网离并网不可或缺的环节,传统预同步环节使用锁相环与PID环节配合实现^[12]。文献[13]对预同步控制进行了改进,蓄电池PQ控制的有功功率参考值跟随蓄电池的功率输出,且在切换控制策略中共用内环、只对外环进行转换,该策略有效抑制切换过程暂态冲击,但其切换精度有待考量。文献[14]提出了关于相角差 $\Delta\theta$ 的在线整定计算方法,实时调整预同步相角,保证并网时的相角差。文献[15]提出一种在直流侧加入储能系统的新型光储并网结构,利用储能系统快速充放电特性抑制直流侧电压的波动。文献[16]提出由双二阶广义积分器和静止参考系锁相环组成的一种新同步系统,实现孤岛微电网恢复后与主电网的再同步。文献[17]搭建风电机组与储能单元联合并网运行的仿真平台,设计风电机组机侧、网侧控制策略,结合储能单元控制,实现不同风力条件下的风机的最大功率点跟踪。

目前光储微网一般采用单储能单元设计控制策略,预同步结构复杂,因此抑制系统切换过程波动的方法还有待进一步研究。本文根据光储微网系统电压幅值、相角、频率在离并网切换过程中的要求,不增加控制复杂性的情况下,提出改进预同步方法及基于两个储能单元的离并网切换策略,设计基于两储能单元V/f与PQ控制时序,以简化传统预同步结构、减少并网时间、降低切换过程负荷带来的冲击。并建立光储微网仿真模型,设计不同工况下的验证实验方案,验证设计的有效性和可实施性。

1 风光储微电网结构及小系统供电模式

1.1 光储微电网结构

本文研究的风光储微电网主要包括9条光伏线、7条储能线、1套生活变、2套站用变和8条35 kV交流母线,经升压变接至220 kV大电网输电线路并网运行,其结构如图1(a)所示。

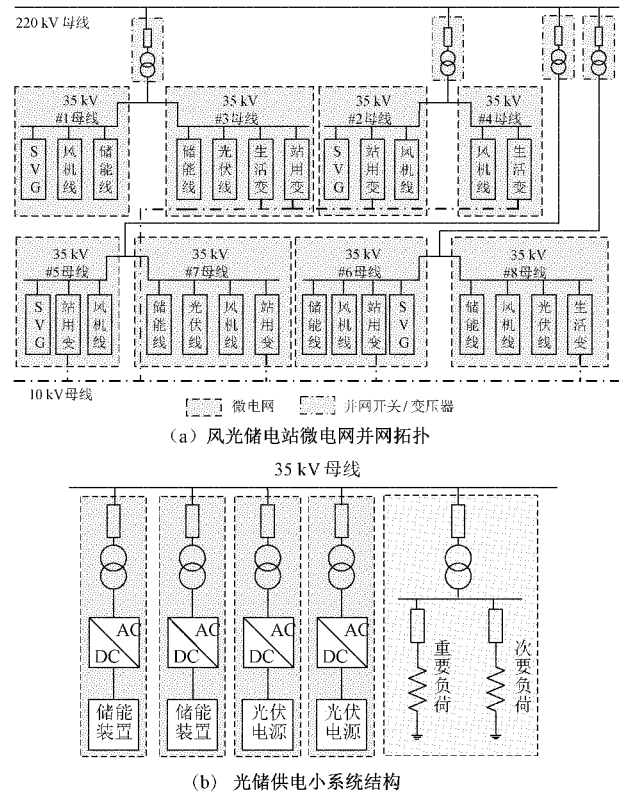


图1 风光储电站拓扑及供电系统结构

图1(a)中,35 kV母线和220 kV母线间断路器的开合状态是系统离并网状态的判断指标。要求风光储电站的站内照明、充电屏、插座箱、冷却扇等约150 kW重要负荷不断电,生活照明、空调等约100 kW次要负荷尽可能保证供电。

光伏电站常规年检或非计划停电时,10 kV站外电源维持站用及生活负荷在网运行。

实际风光储电站微电网系统功率平衡过程复杂,实际

微电网中,离并网切换由光储系统配合完成,简化控制过程,减少暂态冲击。

1.2 光储微电网离网小系统供电模式设计

为充分利用厂站自身发电能力,采用基于光储单元维持 35 kV 母线电压的小系统供电模式,其结构如图 1(b)所示。图 1(b)中的储能装置由图 1(a)连接在不同母线上的多台储能装置,分为两组进行配置,满足负荷要求。

光储供电小系统中,光伏功率波动性大,储能参与一次调压调频支撑母线电压。本文考虑储能 SOC 和光伏功率 P_{PV} ,设计光储供电小系统运行策略,如图 2 所示。

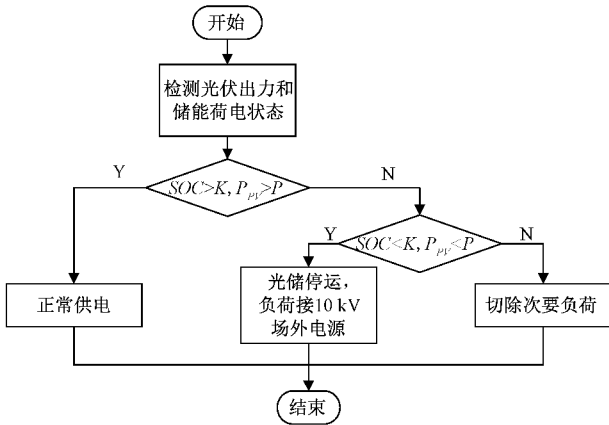


图 2 离网状态光储微电网供电策略

2 基于 V/f 控制的预同步控制策略设计

微电网离-并网切换时,若微电网母线与电网母线有瞬时电压差,则并网时会导致强烈过电流,产生巨大冲击。因此,投切断路器、将微电网接入电网时必须对微电网母线电压进行预调整,保证其与电网电压同步。

2.1 预同步控制原理

光储微电网由离网运行切换至并网运行的平滑切换效果,由切换时刻的负荷功率、光伏功率、35 kV 母线的电压幅值、频率及相位偏差暂态波形的特性描述,与储能容量和光伏功率有关,还与切换前瞬间并网开关断点间电压偏差有关。预同步控制是消除微电网模式切换参数偏差、减少微电网切换冲击的重要手段。

微电网预同步控制一般通过储能单元变流器控制实现电网电压的跟踪,其基本原理为:对电网电压 U_{gabc} 及微电网储能变流器输出电压 U_{oabc} 的检测信号进行 Clark 变换、锁相和加法运算,计算出幅值、频率及相角偏差;经 PI 调节抑制偏差、干预变流器调制,使其输出的幅值、频率和相角跟踪电网电压。

2.2 基于 V/f 控制的预同步控制策略设计

微电网离网运行时储能变流器采用 V/f 控制,调压调频。本文设计基于 V/f 控制的预同步控制策略:接收到并网信号后,将电网电压的实时检测值作为 V/f 控制器的参考输入电压,检测 V/f 控制器输出电压幅值、频率及相位,

满足追踪精度要求时发出完成预同步标志信号。基于 V/f 控制的预同步控制原理,如图 3(a)所示。

基于 V/f 控制的预同步过程控制实现过程为:

- 1) 接收到并网信号后,修改 V/f 控制器的参考电压为电网电压实时检测值;
- 2) 使用锁相环 PLL 检测电网电压相位 $\omega_g t$, 用其替换原 V/f 控制环节内部生成的参考相位 ωt ;
- 3) 基于新的参考相位 $\omega_g t$, 对电网电压检测值进行 Clark/Park 变换,获得电网 $d-q$ 轴参考电压 U_{gdref} 和 U_{gqref} ;
- 4) 将 $\omega_g t$ 、 U_{gdref} 和 U_{gqref} 作为 V/f 控制环节的参考值输入,产生 PWM 信号,储能变流器的输出电压便会在 V/f 控制环节的控制下追踪实时电网电压;
- 5) 大电网与微电网母线电压幅值偏差 ΔU 、频率偏差 Δf 、相角偏差 $\Delta \theta$ 均小于各自阈值 $10\% u_g V$ 、 0.1 Hz 和 5° 时,完成预同步。

基于 V/f 控制的预同步控制策略的关键在于:将电网电压相位 $\omega_g t$ 及 $d-q$ 轴电压检测值作为 V/f 控制环节的参考值,可分别锁定电网电压的相角/频率和幅值。

相比传统预同步控制策略,基于 V/f 控制的预同步控制策略省掉一个 Clark 变换和一个锁相环 PLL,无需加法器和 PI 环节,无需新增硬件,简单易实现,可避免多控制模块切换带来的冲击,预同步速度也略有提升。

搭建的基于 V/f 控制的预同步结构仿真模型如图 3(b)所示。

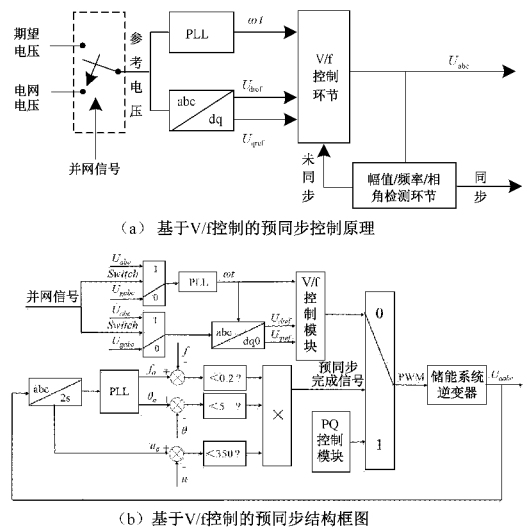


图 3 基于 V/f 控制的预同步结构

3 风光储微网离并网平滑切换控制策略

3.1 两储能单元微电网的并-离网切换策略

风光储微电网由并网状态切换至两储能两光伏供电的光储供电小系统离网运行状态时,平滑切换的效果不仅由光储单元功率、负荷功率及 35 kV 母线电压的暂态波形在切换时刻的特性体现,还与储能容量和光伏功率、孤岛检测

速度有关。并-离网切换主要包括 2 个环节:孤岛检测环节、储能环节 PQ 控制模式向 V/f 控制模式的转换环节。

1) 孤岛检测环节

停电发生前后, 35 kV 母线拓扑如图 4 所示。

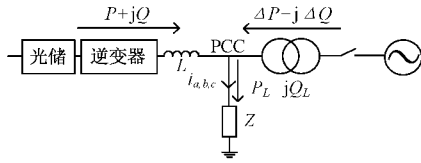


图 4 35 kV 母线拓扑

断路器闭合、微电网并网运行时负载 Z 电流 i_a, i_b, i_c 负序分量为 0、只含正序分量 i_a^+, i_b^+, i_c^+ , PCC 点电压 u_a, u_b, u_c 只含正序分量:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a \dot{I}_a^+ \\ Z_b \dot{I}_b^+ \\ Z_c \dot{I}_c^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a^+ \\ \dot{U}_b^+ \\ \dot{U}_c^+ \end{bmatrix} \quad (1)$$

断路器分断、微电网孤岛运行时, 负载 Z 的正、负序电流均非 0, PCC 点电压亦含正负序分量:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a (\dot{I}_a^+ + \dot{I}_a^-) \\ Z_b (\dot{I}_b^+ + \dot{I}_b^-) \\ Z_c (\dot{I}_c^+ + \dot{I}_c^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a^+ \\ \dot{U}_a^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_b^+ \\ \dot{U}_b^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

断路器分断后, 负序电流注入对地阻抗, 使得 PCC 电压不平衡, PCC 点电压的正序分量为 U_f , 负序分量为 U_n , 电压不平衡度表示为:

$$\eta = U_n / U_f \times 100\% \quad (3)$$

不平衡度 η 值超过 GB/T 15543-1995 所规定的 4% 时, 即判断微电网处于孤岛状态。

2) 控制模式转换环节设计

并、离网时两储能分别采用 PQ、V/f 控制模式, 故并-离网切换的关键在于采用一定逻辑实现两储能单元控制模式的转变。本文针对两储能单元光储小系统, 设计了分时转换控制模式的并-离网控制策略, 如图 5 所示。

若接收到停电指令、但未检测到孤岛运行状态, 则为计划性停电。储能 B 先以 220 kV 电网电压检测值为参考电压转换至 V/f 控制模式, 储能 A 保持 PQ 控制模式; 切除其它光储电源, 分断并网开关, 检测孤岛运行状态; 系统孤岛运行时, 调整储能 B 参考电压为期望 35 kV 母线电压, 储能 A 以 35 kV 母线电压检测值为参考电压转换至 V/f 控制模式, 进入小系统离网运行状态。

3.2 两储能光伏小系统离-并网平滑切换策略设计

光储供电小系统巡检到并网指令后, 进行离并网平滑切换控制。本文针对两储能单元的光储供电小系统, 设计了分时预同步的离-并网切换策略, 如图 6 所示。

如图 6 所示, 光伏小系统两储能单元的离-并网平滑切换策略可确保 35 kV 母线电压在切换工程中的低扰动, 实

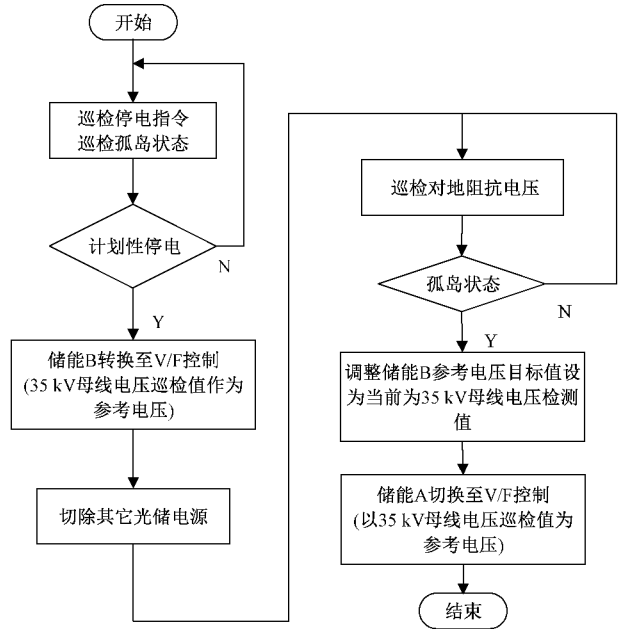


图 5 风光储微电网并-离网切换策略

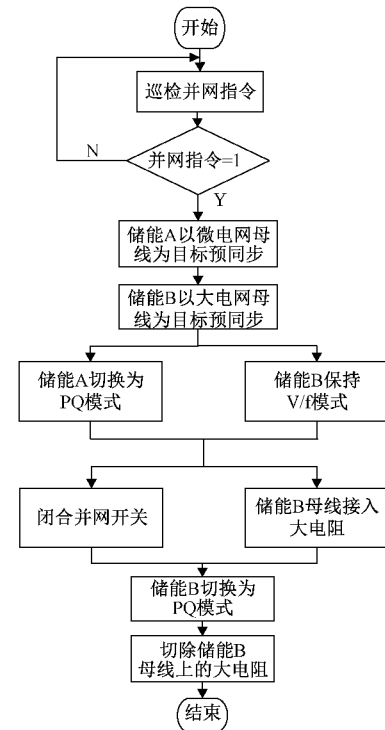


图 6 光储供电小系统离-并网切换策略

现“无缝”切换的主要步骤为: 1) 储能 A 单元的预同步控制以 35 kV 微电网母线电压为参考值, 先行预同步控制; 随后储能 B 单元以 220 kV 大电网的电压为参考电压预同步, 相比两储能单元同时预同步的模式, 可避免储能单元差异造成的 35 kV 母线电压扰动; 2) 两储能单元预同步成功后, 二者先后转换为 PQ 控制模式, 后切换的储能单元为先切换的储能单元提供稳定的母线电压, 相比同步转换为 PQ 的

控制模式,可显著抑制 35 kV 母线电压扰动。离并网过程中两储能单元均采用基于 V/f 控制的预同步策略,可确保 35 kV 母线电压“无缝”平滑切换。

4 微电网模式转换策略验证仿真与结果分析

为验证本文所提出的基于 V/f 的预同步策略和两储能单元光储供电小系统的离-并网控制策略的有效性,构建系统模型并进行仿真分析。

1) 光储供电小系统离并网建模

在 Matlab/Simulink 环境下搭建含 2 个储能单元(储能 A 和储能 B)与 2 个光伏发电单元的光储供电小系统离-并网模型,包括小系统供电策略模块、基于 V/f 的预同步控制模块、离-并网切换策略模块和并网开关模拟模块。光储供电小系统的关键参数如表 1 所示。

表 1 离-并网模型仿真模型关键参数

系统	参数	数值
光伏单元	额定功率/kW	200
	输出电压/V	260
	蓄电池容量/kAh	35
	交流侧电压/V	660
储能单元	放电时直流侧电压/V	1 800
	充电时直流侧电压/V	1 200
	直流侧电容/F	0.2
母线	微电网母线电压/V	35
	外界电网母线电压/kV	220

本文参考风光储电站实际运行工况设计离并网仿真试验方案。

2) 并网切换至孤岛运行模式的仿真结果

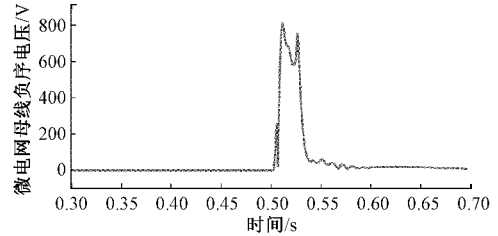
为验证第 3 章设计策略,考虑离-并网切换最大扰动因素,设计仿真方案。

仿真方案设计为:并-离网切换前,光储供电小系统光伏输出功率 100 kW,储能并网前容量已满,负荷 150 kW,系统于 0.5 s 时刻断开并网开关。该方案的仿真结果如图 7 所示。图 7(b)中实线为负载输入有功功率,虚线为光伏单元有功功率,点划线为储能单元有功功率。

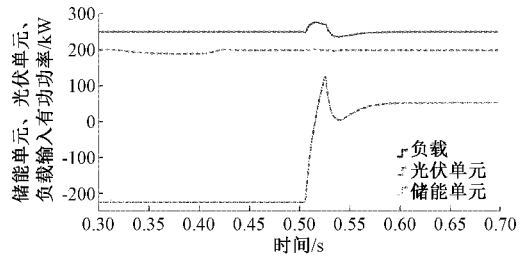
由图 7 可知,微电网在离网后,母线电压的负序分量波动峰值可达 800 V,通过对母线电压的负序分量进行检测实现系统的孤岛检测。根据母线负序电压分量波形及阈值,可检测孤岛运行状态。负序分量阈值设为 200 V 时,离网孤岛检测时长为 0.1 s;并网开关分断至孤岛运行的过渡时长小于 0.1 s,负荷功率扰动上下不超过 11%,并-离网实现平滑切换。

3) 孤岛切换至并网运行模式的仿真结果

设计孤岛切换至并网运行实验方案,验证改进预同步控制方法与两储能单元并网控制策略的可行性。



(a) 负载侧负序电压变化



(b) 储能单元、光伏单元、负载输入有功功率

图 7 并-离网切换试验仿真结果

(1) 改进预同步方法验证试验方案设计和结果分析

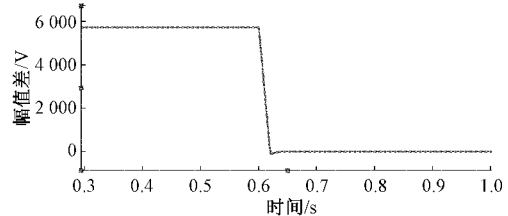
为验证新型预同步控制效果,考虑离-并网切换最大扰动因素,设计 3 组试验,如表 2 所示。

表 2 预同步验证试验初始条件

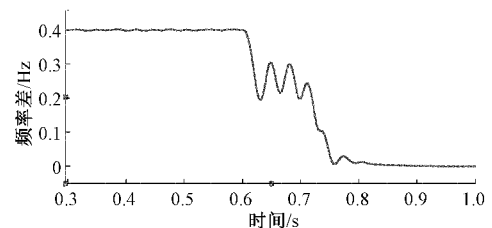
方案	幅值差/ V	频率差/ Hz	相位差/ (°)	光伏功率/ kW
1	0.2 倍额定值	0	0	200
2	0	0.4	0	200
3	0	0	180	200

根据《微电网接入电力系统技术规定》,35 kV 电压等级微电网并网条件如下:供电电压正、负偏差值绝对值之和不超过标称电压的 10%;频率限值为 50 ± 0.2 Hz。

对照规定,严格设置预同步控制指标:幅值偏差绝对值小于标称电压的 1%,频率偏差小于 ± 0.1 Hz,相角偏差绝对值小于 5° 。仿真结果如图 8 所示。



(a) 微电网与外界电网电压幅值差值



(b) 微电网与外界电网电压频率差值

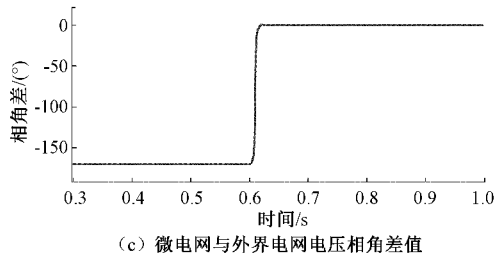


图8 预同步实验仿真结果

由图8中(a)~(c)可知,改进预同步控制分别在预同步开始0.04 s、0.25 s、0.03 s后,使微电网与大电网指标差值缩小为0,微电网电压满足并网国家标准,预同步在短时间内完成,降低系统并网给电网带来的冲击。

基于文献[18]中传统预同步结构与本文改进预同步结构,进行频率调整结果的对比分析,如表3所示。两种方法频率调整过程趋势类似,均在0.2 s内从初始频率差值降到0左右,达到预期;但本文改进的预同步控制策略省略了一个单独的预同步控制器,结构简单。

表3 预同步方法对比分析

	传统预同步	改进预同步
初始频率差值/Hz	0.1	0.4
过渡时间/s	0.2	0.2
结构复杂程度	复杂	简单

(2) 并网过程验证试验方案设计和结果分析

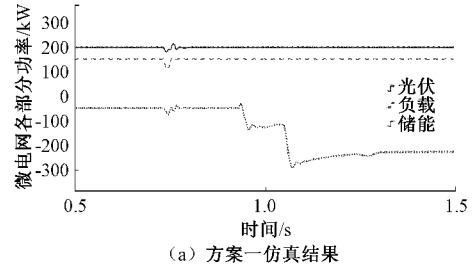
为验证两储能单元离并网控制策略设计以下3组实验,分别验证本控制策略在不同初始条件下的运行情况,初始条件如表4所示。

表4 两储能单元并网策略验证试验初始条件

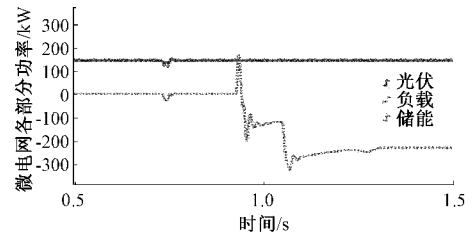
方案	光伏功率/ kW	储能单元 工作状态	相位差/ (°)	负载功率/ kW
1	200	充电	60	150
2	150	无充放	60	150
3	75	放电	60	150

方案一、方案二、方案三分别在0.7 s接收并网信号,系统开始离并网切换。输出功率情况如图9所示,其中短虚线为储能输出功率,长虚线为负载输入功率,实线为光伏输出功率。系统在0.7 s开始离-并网切换后,光伏输出功率和负载输入功率波动幅值均在10%以内,切换冲击小,储能输出功率呈阶梯状过渡到PQ控制方法预设功率。验证了基于V/f控制的预同步控制策略和两储能单元结构的有效性。

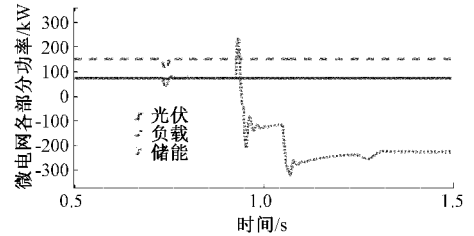
微电网母线电压幅值与频率在孤岛至并网转换时的波动情况如图10所示,其中实线、虚线、点划线分别为方案一、



(a) 方案一仿真结果

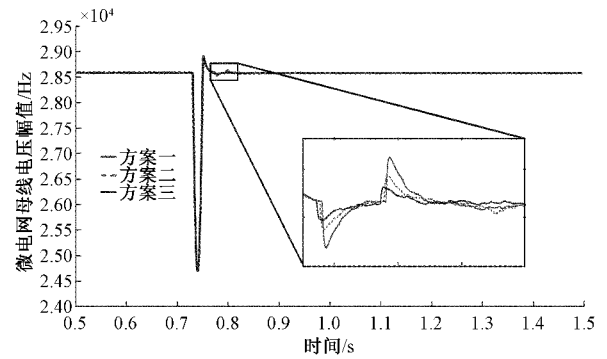


(b) 方案二仿真结果

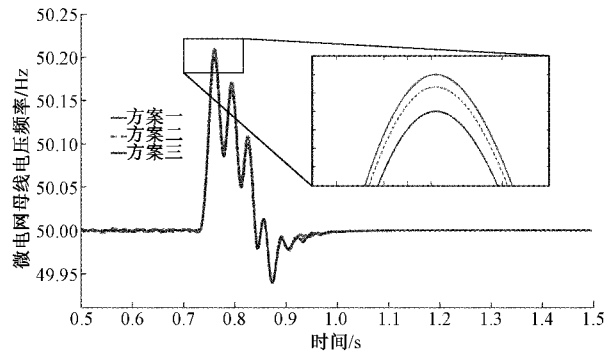


(c) 方案三仿真结果

图9 微电网各部分功率输出



(a) 微电网母线电压幅值



(b) 微电网母线电压频率

图10 微电网母线电压幅值与频率

方案二、方案三仿真结果。三种方案微电网35 kV母线电压幅值、频率变化相似,只在系统预同步阶段出现波动,最

长持续时间为 0.25 s,最大冲击值为稳定值 12%,微电网并网前后没有明显波动,系统平滑切换至并网运行状态。

基于相同的光储微网系统参数和改进的预同步方法,在光伏输出功率为 75 kW 的条件下,设计传统单储能单元的微电网并网实验进行对比分析,仿真结果如图 11 所示。

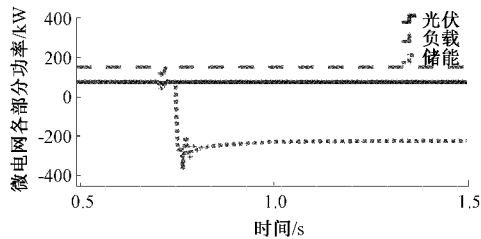


图 11 单储能单元并网仿真结果图

对比分析图 9(c)与图 11,单储能单元的微电网并网冲击达到 390 kW;而基于两储能单元的并网切换过程仅出现两次较小的冲击,大约为 200 kW,避免了由于单储能单元输出过大而产生的电网波动,离-并网模式切换的平稳性得到提升。

5 结 论

本文针对微电网离并网快速性和稳定性的要求,提出一种改进预同步方法和两储能单元的离并网切换控制策略,并进行仿真验证。

提出了改进预同步方法。利用储能单元的 V/f 控制,承担经典预同步系统的预同步环节,简化原有预同步结构,解决预同步调节结构复杂、调节速度较慢等缺点。

研究了双储能单元分时转换 VF-PQ 控制模式的离-并网切换策略。引入负序电流的孤岛检测方法,获取离网信号;设计两储能单元的不同控制模式的切换时序,解决运行模式切换开关动作滞后、控制模式切换不及时等带来的冲击问题,实现平滑切换。

设计了离-并网仿真试验、并-离网切换试验,3 组预同步光储出力仿真对比分析实验,对改进的预同步方法和离并网切换策略进行验证,结果表明:改进预同步方法使预同步电压偏差符合《微电网接入电力系统技术规定》。并网开关断开时刻负序电流冲击大,验证了负序电流检测法的可靠性。离并网控制策略使微网系统运行状态波动较小、调整时间短,保证了离并网切换的平滑性。

本文仅分析了不同辐照度(不同输出功率)下改进预同步方法和两储能单元的离并网切换策略的有效性。但工况现场复杂,光储系统输出波动性、负载随机性等因素同样会对系统离并网和运行特性产生一定影响,后续将结合系统不同运行状态,进一步研究不同工况下离并网优化控制策略。

参考文献

[1] 杨海柱,徐锦举.微电网并网逆变器的改进下垂控制策略研究[J].电子测量技术,2016,39(5):36-40.

- [2] 余岳,粟梅,孙尧,等.计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1261-1268.
- [3] 邵永明,张朝川,尹泰康.微电网混合储能功率分频控制策略研究[J].电工电气,2016,9:12-15.
- [4] 毕大强,赵润富,葛宝明,等.直流微电网能量控制策略的研究[J].电源学报,2014(1):1-7.
- [5] 张宇,冯鑫振,余豪杰,等.风光储微电网模式切换策略研究[J].电测与仪表,2016,53(23):38-44,50.
- [6] 杨彦杰,杨康,邵永明,等.微电网的并离网平滑切换控制策略研究[J].可再生能源,2018,36(1):36-42.
- [7] JIA L,ZHU Y,DU S,et al. Analysis of the transition between multiple operational modes for hybrid AC/DC Microgrids[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2018,4(1):49-57.
- [8] 付昶鑫,赵咪,许伟奇.光储微网系统的新型趋近律滑模控制研究[J].电源技术,2021,45(12):1612-1615,1619.
- [9] ARAFAT M N, ELRAYYAH A, SOZER Y. An effective smooth transition control strategy using droop based synchronization for parallel inverters [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2015, 51(3):2443-2454.
- [10] 王建平,郑成强,徐晓冰,等.基于卡尔曼滤波的微电网同步并网研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(5):809-815.
- [11] 万晓凤,詹子录,廖志鹏,等.虚拟同步发电机并离网无缝切换策略研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(5):33-40.
- [12] WU Y, CHEN G Z, SHEN Y, et al. Long-term stabilization of the optical fiber phase control using dual PID[J]. Instrumentation,2015,2(4):40-46.
- [13] 刘梦超,王生铁,温素芳.光储微电网并离网平滑切换控制策略研究[J].可再生能源,2020,38(12):1633-1639.
- [14] 唐酿,盛超,赵天扬,等.虚拟同步发电机并离网无缝切换控制策略研究[J].可再生能源,2016,34(11):1665-1673.
- [15] 韩洲,任永峰,胡宏彬,等.基于直流侧带储能单元的光储并网协调控制[J].电源技术,2015,39(8):1739-1741,1767.
- [16] MARIO R, FRANCISCO H, EMILIO B. A synchronization technique for microgrid reclosing after islanding operation [C]. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012:25-28.
- [17] 梁洲,陈意军.风储联合并网发电系统的控制策略研究[J].电子测量技术,2015,38(11):1-5,13.
- [18] 毕永健,徐丙垠,赵艳雷,等.同步定频微电网的并网/孤岛无缝切换控制策略[J].电网技术,2022,46(3):923-933.

作者简介

张文煜,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电及运行控制技术研究。

E-mail:zhang.wyu@hotmail.com