

基于对等和主从综合控制的微电网平滑切换控制方法研究

微电网的分布式电源是位于用户附近的模块化电力能源，它可以实现孤岛运行和与大电网并网运行两种运行方式。微电网并网和孤岛运行模式之间的平滑切换是系统能够保持安全稳定运行的重要保障。针对传统主从与对等控制策略分别存在的不足，提出一种基于微电网储能逆变器的 V/f 和下垂控制相结合的综合控制策略，有效改善了微电网由并网切换至孤岛后功率的平衡，以及电压和频率的稳定。最后运用PSCAD进行仿真分析，并验证了所提出控制策略的可行性。

岳同耿日/国网河南省电力公司新乡供电公司

余向阳 吕 优 赵怡茗/西安理工大学水利水电学院

0 引言

对大多微电网而言，分布式电源（Distributed Generation, DG）输出的功率是有限的，且不能在任何情况下满足负荷的需求，故当微电网由并网过渡到非人为计划性孤岛运行时，极大程度上会造成功率缺额，从而导致孤岛上微电网的电压和频率无法保持稳定，当超出允许范围值较大时，会引起微电网的崩溃^[1-4]。

所以微电网转换为非计划孤岛后，使微电网能够保证其频率和电压稳定在允许范围内时，最大化减少控制策略的切换，对提高微电网供电可靠性具有重要意义^[5-6]。

文献[7-8]为解决上述问题，针对分布式电源逆变器的控制方式提出一种由并网的 PQ 控制向 V/f 控制转换的控制策略，利用在孤岛时的恒压恒频控制来稳

定系统的频率和电压。但两种控制模式切换时机要求较高，动作迅速，否则容易切换失败，造成对微电网和大电网的暂态冲击，且重复切换会对元器件造成损坏。文献[9]采用自适应下垂系数调节方法来抑制电压和频率波动，但此类方法会影响系统的稳定性以及功率分配的准确度和响应速度。文献[10]针对逆变器提出一种多环反馈的控制器，可有效改善DG并网转孤岛时平滑切换的电能质量。文献[11]通过在下垂控制由并网转孤岛时，投切一种下垂额定调节环来实现平滑切换，但该方法因为在孤岛时采用Droop控制，对DG容量要求较高，故并不适用与大规模DG接入的情况。

通过对上文的分析，了解到了国内外有关微电网平滑切换方面的研究进度和方法，为解决微电网并网切换为孤岛时所出现频率和电压偏离允许值的问题，本文提出一种基于对等和主从综合控制的微电网平滑切换的控制方法，利用微电网由并网切换为孤岛时，储能装置逆变器 V/f 与Droop控制策略的合理切换，以保证微电网频率和电压的偏差在允许范围内。在PSCAD/EMTDC建立综合控制的微电网模型，仿真结果验证了所提策略的可行性。

1 微电网并网转孤岛的运行模式

当微电网并网运行时，配电网系统和微电网系统在PCC点处进行有关电能和功率的交换。如果微电网系统



岳同耿日/工程师

关键词/Keywords

微电网·
平滑切换·
 V/f 控制·
下垂控制·

国家自然科学基金资助项目（51507134）

不能满足微电网内负载所需的功率时，此时缺少的电能需要由大电网通过母线来对微电网进行相应的补充；如果微电网系统内有多余的电能，此时微电网可以通过PCC和母线将多余的电能传输到大电网中，以实现电能的双向流动性。

当配电网或微电网发生故障时，微电网会切断PCC点的连接，转为孤岛运行，然后仅由微电源向负荷供应所需电能。由此可见，对微电网在不同运行方式下的平滑切换策略进行研究有着及其重要的意义。

平滑切换是指当微电网系统在运行方式切换过程中频率和电压幅值保持稳定，有关标准指出，运行方式切换后各条母线电压幅值偏差 $\Delta U \leq \pm 7\% U_N$ ，频率偏差 $\Delta f \leq \pm 0.1 \text{ Hz}$ 。

2 微电网并网转孤岛运行控制策略

针对不同类型的DG，微电网发挥的作用也不尽相同，并网逆变器也因此要采用相应的控制方法，其差别主要是对外环不同的控制方式。其中并网逆变器外环控制方法有： PQ 控制、 V/f 控制和Droop控制。

2.1 恒功率控制（ PQ 控制）

PQ 控制原理是使DG输出有功和无功功率跟随其参考值，且在允许变化的范围之内，使各DG保持输出功率不变，其实质是先将功率解耦后再对其进行控制。

如图1所示，对三相电压、电流瞬时值 u_{abc} 、 i_{abc} 进行Park变换后，得到直轴和交轴分量 i_{ab} 和 u_{ab} 。同时，通过功率计算可以得到瞬时功率 P_{grid} 、 Q_{grid} ，之后经滤波、给定信号与实际信号做差以及PI调节等环节，从而得到给定信号 i_{dref} 、 i_{qref} 。

2.2 恒压/恒频控制（ V/f 控制）

此类逆变器控制方式主要用于微电网孤岛运行时的储能元件之中。且该控制策略的原理，相当于电力系统的平衡节点，即电压和频率是给定值。根据上述Droop控制原理，图2给出了一种典型的恒压/恒频控制器的结构。

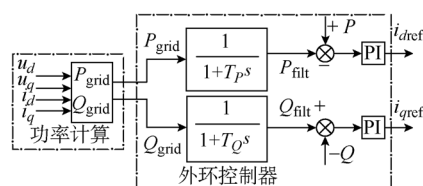


图1 PQ 控制结构框图

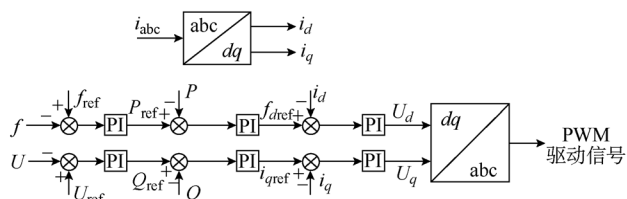


图2 V/f 控制结构框图

图2中，三相电流值经过 abc/dq 变换后得到的 d 和 q 轴分量 i_d 、 i_q 。用PI调节器分析处理频率和电压，得到有功、无功功率 P 、 Q ，将其差值再用PI调节器调节，得到 d 、 q 轴的给定值，最后再进行 dq/abc 变换，得到PWM信号。

2.3 Droop控制

下垂控制的原理近似于发电机的一次调频，可以实现负载变化在DG之间的自动分配。其中微电网逆变器Droop控制方程式为

$$\begin{cases} f = f_0 + (Q_0 - Q)K_f \\ U = U_0 + (P_0 - P)K_U \end{cases} \quad (1)$$

或者

$$\begin{cases} P = P_0 + (f_0 - f)K_f \\ Q = Q_0 + (U_0 - U)K_U \end{cases} \quad (2)$$

从上述分析可看出，Droop的两种基本的控制方法：

1) 根据系统频率的变化，来调节DG输出的有功，根据系统电压的变化，来调节DG输出的无功。即 $P-f$ 和 $Q-U$ 的Droop控制。

2) 根据系统有功的变化来调节频率，根据系统无功的变化来调节电压。即 $f-P$ 和 $U-Q$ 的Droop控制。

然而此控制策略也有其自身的不足，忽略了微电网系统频率和电压的恢复，所以其使用空间有限。

3 综合控制策略

3.1 DG综合控制策略

对于大规模DG接入微电网的情况，国内外储

能逆变器的控制研究主要集中在主从和对等控制两种控制策略上。

对等控制可实现大规模DG并网的即插即用，孤岛运行时在微电网频率和电压保持在允许范围内时，无须切换控制策略，理论上提升电能质量可降低系统成本，但它是一种有差调节，在一定程度上降低了频率和电压的稳定性；主从控制可以在孤岛状态下对微电网提供功率支撑，保证微电网电压和频率的稳定性，但其不能用于微电网的并网运行。

针对两种控制方式的不足，本文采用一种基于储能装置主从与对等控制相结合的综合控制策略，如图3所示。为实现光、风的最大功率跟踪，光伏发电和风力发电系统采用PQ控制策略。同时，在并网时储能装置的逆变器采用Droop控制策略，来保证系统运行的稳定性。

当DG在并网至孤岛切换后，频率和电压偏差仍能保持在允许范围内时($\Delta U \leq \pm 7\% U_N$ 和 $\Delta f \leq \pm 0.1 \text{ Hz}$)，则储能装置依然与并网时一样，采用相同的下垂控制策略；若频率或电压偏差超出允许范围，储能装置切换为V/f控制，以支撑电压和频率稳定。如此可见，综合控制策略可以大大减少储能装置控制方式切换的次数，从而提高了微电网运行的可靠性。

3.2 综合控制策略的实现

综合控制策略的实现如图4所示。当采用

Droop控制时， S_1 、 S_4 闭合， S_2 、 S_3 断开；当采用V/f控制时， S_2 、 S_3 闭合， S_1 、 S_4 断开。

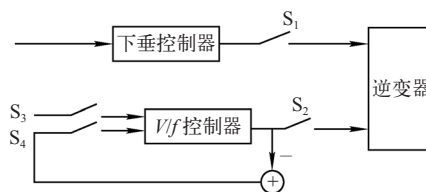


图4 综合控制策略的实现

3.3 储能系统的综合控制策略

本文设计的储能装置综合控制结构如图5所示。当整个微电网的 ΔU 或 Δf 未超出允许范围时，不论微电网是何种运行方式，储能元件均采用Droop控制。其控制原理是先通过电压参考值和实际测量值得到电压偏差后，为提高逆变器运行的稳态准确度，再通过PI调节器，从而输出无功偏差；同时，先得到频率偏差后，再通过PI调节器，输出有功偏差。

当微电网的 ΔU 或 Δf 超出范围时，控制方式则切换为V/f控制，首先得到电压偏差，再经PI调节器，以提高逆变器动态响应，输出无功偏差；频率测量值与参考值做差以得到频率偏差，再通过PI调节器，以提高逆变器运行的稳态准确度，输出有功偏差。即可得到 $P_{\text{ref}} = \Delta P + P_0$ ， $Q_{\text{ref}} = \Delta Q + Q_0$ 。

所提出的综合控制策略可以在大部分情况下利用Droop控制的“即插即用”和“合理分配”的

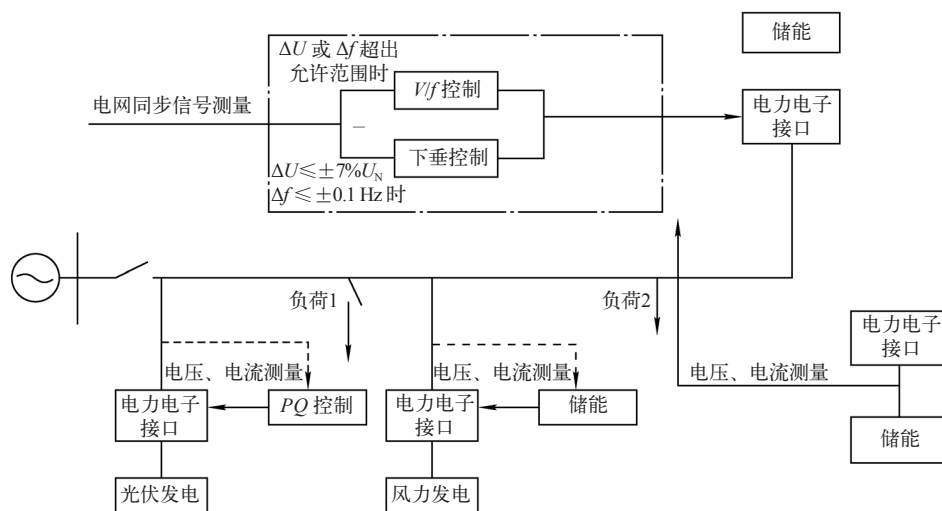


图3 微电网综合控制策略示意图

优势,且微电网在孤岛运行中出现的小部分电能质量不满足要求的情况时,逆变器随即转为主从

控制模式,以支撑微电网频率和电压的稳定,满足系统运行的稳定性。

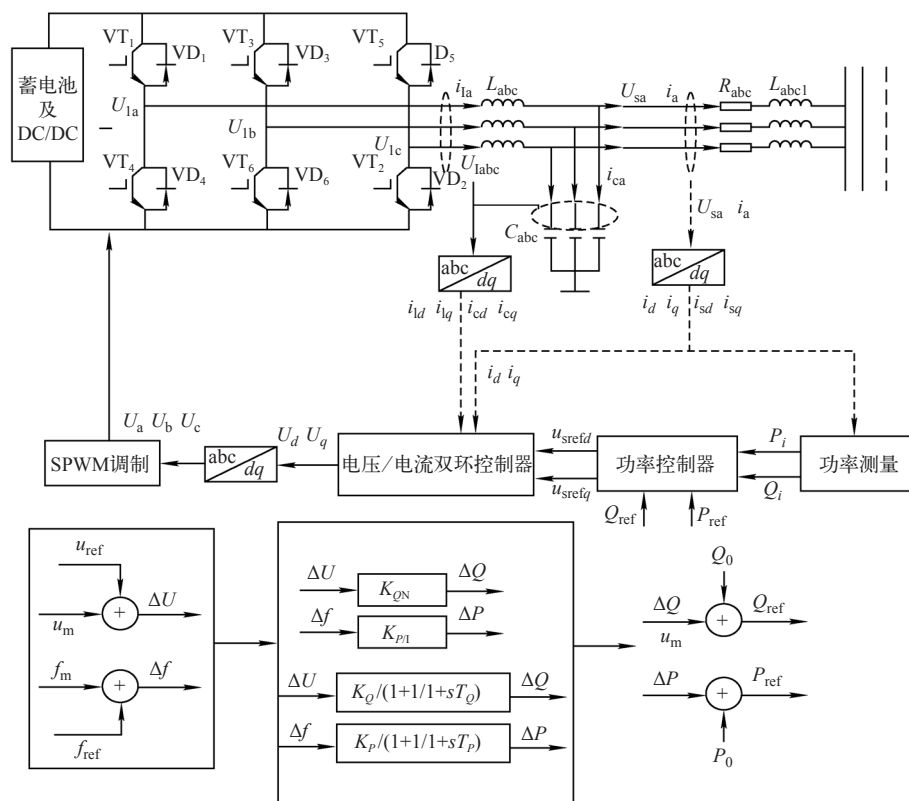


图5 储能装置综合控制结构框图

4 微电网的孤岛检测技术

4.1 孤岛运行

孤岛运行可分为计划外孤岛和计划内孤岛。当电网发生故障时,计划外孤岛运行是指微电网系统运行在孤岛模式下,该模式可以保证微电网的稳定运行。当在计划外孤岛运行时,微电网系统内的负荷所需的能量全部由微电网内的分布式电源承担。另外,在人为设置下微电网系统也可独立运行,称为计划内孤岛运行。

4.2 孤岛检测原理及测试电路

孤岛检测是保证分布式电源安全稳定运行的重要前提。可分为主动和被动两种检测方式,其目的是提高减少检测时间和控制并网电能质量。被动式孤岛检测方法对并网运行时的电能质量影响比较小,但存在一定的检测盲区。由于加入了电能扰动算法后,主动式孤岛检测对并网运行时

电能质量影响比较大。孤岛检测重点在于当微源与配电网系统断开后,孤岛监测装置能够快速检测到微电网系统处于孤岛运行状态,其电路如图6所示。

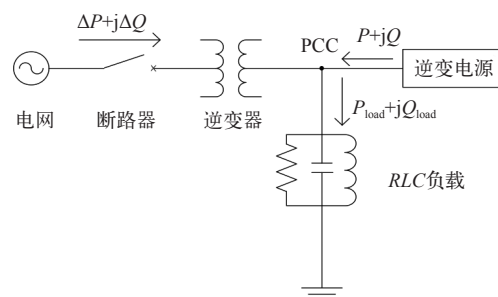


图6 孤岛检测测试电路

图6中, P 、 Q 分别为逆变器输出的有功和无功功率; ΔP 、 ΔQ 分别为微电网系统在并网运行模式

时从配电网系统获得或者流向大系统电网的逆变器输出与负载需求之间的功率差值。负载用RLC系统表示, P_{load} 、 Q_{load} 分别为消耗的有功功率和无功功率。

PCC开关在断开前,如下式,即

$$P_{\text{load}} = P + \Delta P, Q_{\text{load}} = Q + \Delta Q \quad (3)$$

$$P_{\text{load}} = \frac{U_{\text{PCC}}^2}{R} \quad (4)$$

$$Q_{\text{load}} = \frac{U_{\text{PCC}}^2}{\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)} \quad (5)$$

式中, U_{PCC} 为PCC点处的电压; ω 为并网时PCC点处的角频率。

当PCC点断开时,微电网系统的逆变器输出的有功和无功功率依然保持恒定值不变,当其输出功率与负载所需功率达到新的平衡时,得出

$$P = P'_{\text{load}} = \frac{U_{\text{PCC}}^2}{R} \quad (6)$$

$$Q = Q'_{\text{load}} = \frac{U_{\text{PCC}}^2}{\left(\frac{1}{\omega' L} - \omega' C\right)} \quad (7)$$

式中, U'_{PCC} 为孤岛稳定后PCC点处的电压; ω' 为孤岛稳定后PCC点处的角频率。

5 仿真分析

5.1 微电网模型

通过PSCAD/EMTDC搭建了基于风/光/储并联运行的微电网基本结构,如图7所示。

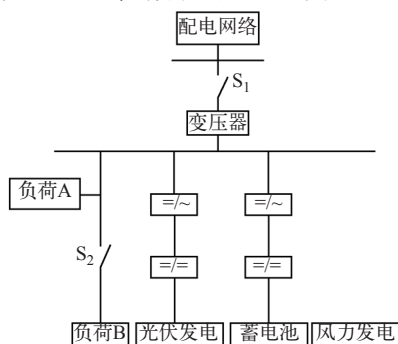


图7 风/光/储/微电网基本结构

其中,储能逆变器的主要参数如表1、表2所示。

表1 储能逆变器Droop控制的主要参数

V_{dc}/V	F_c/kHz	L/mH	$C/\mu\text{F}$	R/Ω	m	n
800	4	5	200	0.001	1×10^{-5}	3×10^{-4}

表2 储能逆变器V/f控制主要参数

V_{dc}/V	F_c/kHz	L/mH	$C/\mu\text{F}$	R/Ω
800	4	5	200	0.001

5.2 微电网并网转孤岛运行时切换仿真

按照图7搭建的仿真模型如图8所示。设置在运行模式切换过程中,保持光伏发电和风力的输出情况不变。设置微电网运行时间为5 s,在1 s时微电网与配电网脱离,随即转为孤岛运行,传统Droop控制与改进后的综合控制策略分别得到仿真图形,如图9~图13所示,并进行对比分析。

由图9可知,当采用传统Droop控制策略,0~1 s微电网为并网运行,2~3 s微电网为孤岛状态运行,3~5 s微电网为并网运行。从图9中可以看出,2 s微电网由并网转为孤岛时,PCC点处频率在切换时有较大波动,此时由于Droop控制器的调节作用,转换时频率变化幅度超出了允许范围(± 0.1 Hz),则微电网无法为用户提供良好的电能质量。

由图10可知,采用主从和对等综合控制策略时,当在孤岛时检测(响应较快)到频率偏差超出了允许范围,则储能装置切换为V/f控制。此时由于微电网检测到了PCC点处功率缺额,随即控制储能元件增发一部分有功,改进后的微电网由并网向孤岛转换时,频率波动在 ± 0.1 Hz内,满足微电网运行可靠性的要求。

当蓄电池与其他分布式电源并联运行时,充电或放电的工作状态由分布式电源的运行情况和交流网络情况所共同决定。

由图11改进后的蓄电池SOC波形可以看出,在0~2 s和3~5 s并网运行时,蓄电池向大电网传输电能,在2~3 s孤岛运行时,由光伏发电并向蓄电池充电。

由图12可知,当采用传统Droop控制,1 s时微

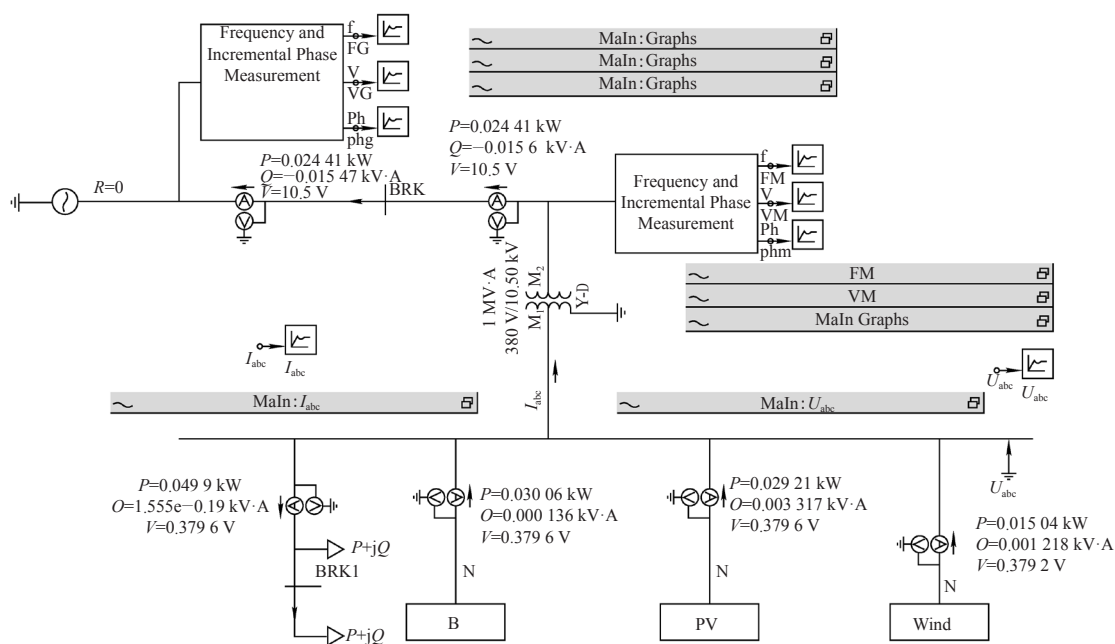


图8 风光储微电网仿真模型

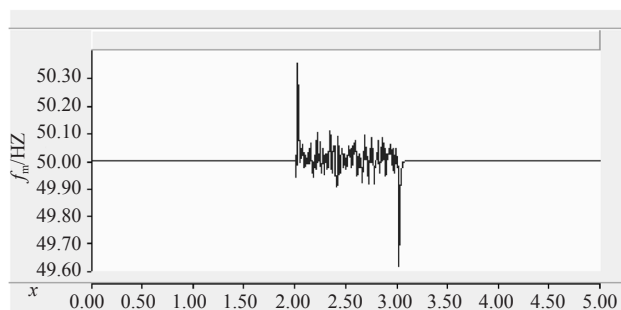


图9 储能逆变器采用传统Droop控制的频率仿真波形

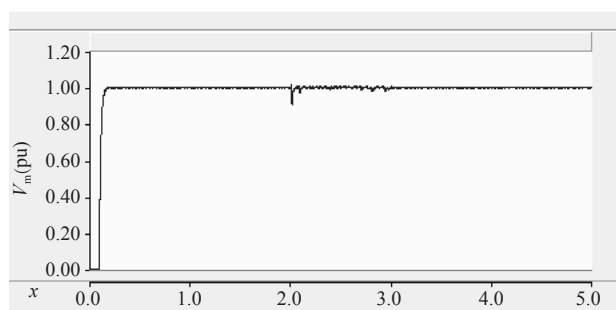


图12 储能逆变器采用传统Droop控制的电压仿真波形

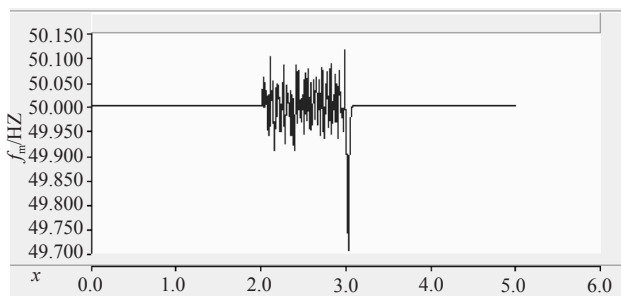


图10 储能逆变器采用综合控制的频率仿真波形

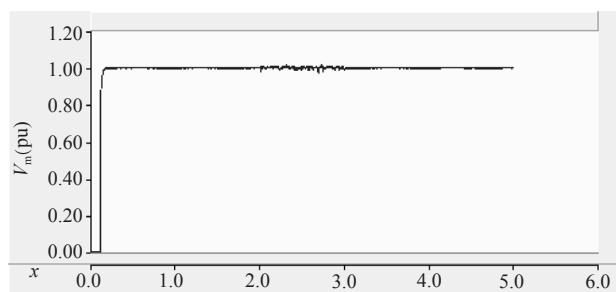


图13 储能逆变器采用综合控制的电压仿真波形

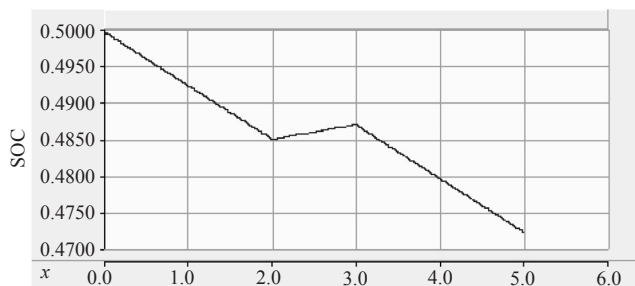


图11 储能逆变器采用综合控制时SOC的仿真波形

电网转为孤岛运行时，PCC点处的电压在切换时出现较大波动，微电网电压幅值在切换时在0.9 (pu) 附近，不满足切换时电压质量的要求。

由图13可知，当储能逆变器采用主从与对等综合控制策略时，储能转换为V/f控制，此时由于系统检测到PCC点处的功率缺额，随即控制储能元件增发一部分无功，从而使微电网由并网转孤岛

时切换的电压0.900 (pu) 改善为0.975 (pu), 微电网的电压波动在其额定值的5%内, 均满足微电网运行要求, 大大改善了微电网运行的电能质量。

由上述分析可知, 改进后的控制策略能在保证较少切换次数的前提下, 有效地抑制在运行模式转变过程中有关参数出现的波动, 并保持微电网在暂态过程时, 由并网转换为孤岛运行后系统的运行稳定性。

6 结束语

针对微电网储能逆变器传统主从和对等控制存在的不足, 提出一种基于对等和主从综合控制微电网的平滑切换控制方法, 相关结论如下。

1) 在并网向孤岛转换时, 频率、电压未超出允许范围时, 无须切换控制策略, 依然采用Droop控制。

2) 在并网向孤岛转换时, 当频率、电压超出允许范围时, 才切换控制策略, 相比传统PQ至V/f切换, 减少了切换次数, 提高了电能质量。

3) 在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建仿真系统, 验证了所提方法的可行性。

参考文献

- [1] 王成山. 微电网分析与仿真实理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相, 等. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
- [3] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.
- [4] Hong Mingguo, Yu Xiangyang. An energy scheduling algorithm supporting power quality management in commercial building microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

2016, 7(2): 1044-1056.

- [5] 孙昶辉, 吴子平. 含分布式发电系统的微电网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
- [6] 鲁鸿毅, 应鑫龙, 何奔腾. 微型电网联网和孤岛运行控制方式初探[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 28-31.
- [7] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17-24.
- [8] 王燕廷. 微电网并网与孤岛运行模式切换的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.
- [9] 麻常辉, 潘志远, 刘超, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 12(18): 17-24.
- [10] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
- [11] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微电网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-5.
- [12] Jin Liping, He Zhong, Zhang Yingchao, et al. A new virtual impedance method for parallel inverters with droop control[C]. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2016: 1-4.
- [13] Yu Xiangyang, Nan Haipeng, Wu Luochang. Adaptive sliding mode controller for a class of nonlinear system with uncertainty [C]. 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, 2010: 46-51.
- [14] Hou Guolian, Xing Fulin, Yang Yu, et al. Virtual negative impedance droop method for parallel inverters in microgrids[C]. 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications, 2015: 1009-1013.

(收稿日期: 2018-06-27) **EA**