

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220312

考虑储能倍率特性与动态 PQ 控制的非计划离网切换策略

刘伟¹, 刘小龙², 刘程华³, 李欣然², 卢颖华²

(1. 许昌学院, 河南 许昌 461000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 清华大学计算机科学系, 北京 100084)

摘要: 针对非计划离网切换过程中如何有效切除负荷并协调控制主从储能出力的问题进行研究。首先, 提出了考虑储能倍率特性约束的分步切负荷方法。该方法利用储能过载特性短时支撑离网后剩余未切除负荷, 可克服分步切负荷的缺陷。然后, 在切负荷过程中的特定阶段, 基于虚拟下垂/惯性控制原理动态调整从储能出力, 有效降低主控制单元的调节压力。在此基础上, 形成了考虑储能倍率特性约束与动态 PQ 控制的非计划离网平滑切换控制策略。最后, 在 Matlab 中搭建模型并进行了仿真验证。结果表明, 所提策略不仅能够保证切换过程中电压始终维持在较高水平, 还可显著降低电压波动幅度, 有利于实现切换过程的平滑过渡。

关键词: 微电网; 并网/离网切换; 储能倍率特性; 虚拟下垂/惯性控制

Unplanned off-grid switching strategy considering BES rate characteristic and dynamic PQ control

LIU Wei¹, LIU Xiaolong², LIU Chenghua³, LI Xinran², LU Yinghua²

(1. Xuchang College, Xuchang 461000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Department of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper studies how to effectively cut off the load and achieve coordinated control of the output of master-slave BES in the process of unplanned off-grid switching. First, a step-by-step load shedding method considering the constraints of BES ratio characteristics is proposed. This method uses the BES overload characteristics to support the remaining uncut load after off-grid for a short time. This can overcome the defect of step-by-step load shedding. Then, at a specific stage in the load shedding process, the slave BES output is dynamically adjusted based on the virtual droop/inertia control principle to effectively reduce the regulation pressure of the main control unit. An unplanned off-grid smooth switching control strategy considering the BES ratio characteristic constraint and dynamic PQ control is formed. Finally, the model is built in Matlab and verified by simulation. The results show that the proposed strategy can not only ensure that the voltage is always maintained at a high level during the switching process, but also significantly reduce the voltage fluctuation. This is conducive to the smooth transition of the switching process.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903400).

Key words: micro-grid; on-grid/off-grid switching; BES rate characteristic; virtual droop/inertia control

0 引言

微电网^[1-3]是一个可与大电网并网或脱离大电网运行的小型发配电系统, 当其处于并网运行状态时, 研究的重点在于经济调度层面^[4-6]。当大电网发生故障时, 微网需从并网模式切换为离网模式^[7-9]。其研究的重点为控制层面^[10-12]。为了保证并/离网过渡是稳定的, 国内外学者对并/离网平滑切换控制进

行了多方面的研究^[13-25]。文献[13]研究了基于主从控制的并/离网平滑切换方法, 提出一种适用于微网系统的新型锁相环, 可减小切换时的暂态影响。文献[14]提出一种基于改进锁相环(PLL)的分布式发电单元平滑切换控制策略, 克服了传统混合电压电流控制策略的缺陷。文献[15-16]提出一种微网运行模式平滑切换控制策略, 模式切换时无需改变系统运行控制策略, 即可实现电压频率和功率的平滑过渡。文献[17]提出一种改进的自调节下垂系数控制, 且加入电压和频率的误差反馈, 有效减小切换时的

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903400)

功率冲击, 实现了电压和频率的二次调节。文献[18]通过 PQ 控制同步跟随 VF 控制器输出状态来实现脱网的平滑性, 通过改进预同步控制器使预同步控制和 VF 控制不会发生冲突, 从而减小并网的暂态冲击。文献[19]提出基于锁相环的并/离网切换策略, 利用虚拟同步发电机实现微网的准同期并网功能。文献[20]在逆变器控制层, 采用 MPC 和二自由度算法构造广义控制器, 使储能能在单一控制结构下完成并网和离网运行, 实现了微网运行模式的平滑过渡。

上述研究涉及到的平滑切换策略一般都是对逆变器控制策略的切换和改进, 对切换过程如何有效切除负荷并协调各微源出力的研究较少。文献[21-22]重点研究了电存储在并/离网无缝切换过程中的控制策略, 但是研究对象只限于一个储能, 且没有考虑离网后如何切除负荷的问题。文献[23]为保证切换过程的快速性, 只粗略地估算了切负荷量, 切负荷量过大会导致切除瞬间电能过剩, 引起较大过电压。文献[24]从微网内源荷匹配程度的角度考虑, 提出了分步切负荷策略, 有效地减小了切换过程中的暂态振荡。但是该方法切负荷过程较长, 需要较长时间才能恢复到额定电压。另外, 文中所提策略主要依靠主储能(主控制)单元进行调节, 虽然可以实现电压频率的快速无差控制, 但是该方法过多依赖主储能单元, 使得并/离网过渡中主储能单元的调节压力较大。

基于以上分析, 本文提出考虑储能倍率特性约束与动态 PQ 控制的非计划离网平滑切换控制策略。策略的创新性在于: (1) 考虑储能连续过载能力的约束下分步骤切负荷, 利用储能高倍率放电短时支撑剩余未切除负荷, 克服了分步切负荷的缺陷, 将维持电压在较高水平。(2) 基于主从控制模式, 在切负荷过程中的特定阶段, 利用虚拟下垂/惯性控制原理动态调整从储能单元出力, 辅助主控制单元调节电压, 降低了主控制单元的调节压力, 并减小了切换过程中的电压波动幅度, 实现了平滑过渡。

1 系统控制结构

本文所提策略针对的研究场景为含多组储能单元的主从控制模式^[26]微网系统。对于含有燃气机等同步发电机组的系统来说, 其惯性较好, 离网后短暂的供需不平衡不会引起剧烈的电压/频率波动。另外, 燃气机等机组的启动速度慢, 若离网前机组未启动, 则无法在短暂的切换过程中提供有效帮助。故本文在并/离网切换过程中仅考虑储能系统和负荷的控制策略。

如图 1 所示, 本文研究的系统包括两组储能单元和若干可控负荷。并网运行中, 储能均采用恒 PQ 控制。离网后需立即切换控制模式并切负荷以维持系统稳定。本文在离网后采用主从控制模式, 通过并/离网切换控制器将一组储能单元切换为 VF 控制作为主控制单元(主储能), 另一组储能单元切换为动态 PQ 控制作为从控制单元(从储能)。切换控制模式后, 如何有效切除负荷并动态调节从储能出力为本文研究重点, 下文对其进行具体介绍。

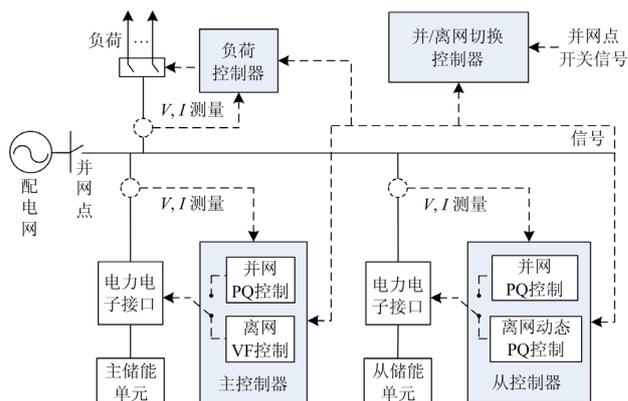


图 1 系统控制结构图

Fig. 1 System control structure

2 基于储能倍率特性的分步切负荷方法

2.1 储能倍率(过载)特性分析

储能过载能力包括两部分, 一部分为电池本体的倍率特性(倍率指电池的充/放电电流相对于额定电流的倍数), 另一部分为变流器的过载特性。对于交流系统, 电池本体需要通过变流器接入系统, 而常规变流器的过载能力远不及电池本体最高倍率^[27-28], 因此本节分析的重点放在变流器的过载特性上。

变流器的过载能力指标主要针对输出电流而言。如图 2 所示, 当过载前负载电流不大于变流器额定输出电流的 91%(此电流被称为基本负载电

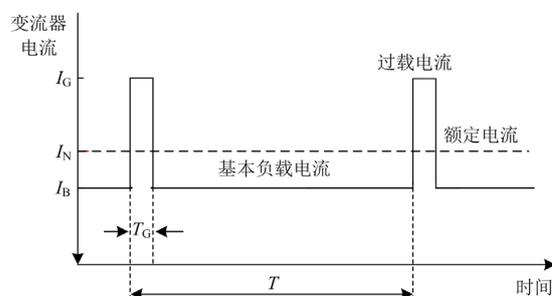


图 2 变流器基本负载电流、额定电流和过载电流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of basic load current, rated current and overload current of converter

流^[29])时,可在其运行过程有短时的过载能力。根据热等效原理可建立基本方程式(1),确定变流器过载能力。

$$T \cdot I_N^2 = T_G \cdot I_G^2 + (T - T_G) \cdot I_B^2 \quad (1)$$

式中: I_N 、 I_G 和 I_B 分别为额定、过载和基本负载电流; T 、 T_G 分别为负载周期和过载时长。

本文在快速切换过程中采用分步切负荷方法,即负荷量逐渐减小。如果过载电流上限具有从大变小的特征则能更好地匹配切负荷过程。由图 2 和式(1)可知,过载电流上限为一恒定值,虽然可持续过载较长时间,但前期就需要切除较大负荷以满足过载要求。故而本文将式(1)变化为式(2)的形式。根据式(2)可得到由多个阶段构成的逐渐变小的连续过载电流上限值。例如,某公司典型变流器的过载能力指标为:最大可以以 1.2 C 过载 0.4 s。变化后过载能力指标为:最大可以连续以 1.5 C、1.3 C 以及 1.1 C 分别过载 0.1 s。变化后的过载特性能更好地匹配分步切负荷过程,降低分步切负荷的约束条件。

$$\begin{cases} T \cdot I_N^2 = \sum_{k=1}^K T_{G,k} \cdot I_{G,k}^2 + (T - \sum_{k=1}^K T_{G,k}) \cdot I_B^2 \\ I_{G,1} \leq I_{\max} \\ \frac{I_{G,k} - I_{G,k+1}}{T_{G,k}} = M \\ T_{G,k} - T_{G,k+1} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 表示总共有 K 个连续不同的过载阶段; $I_{G,k}$ 、 $T_{G,k}$ 分别为第 k 个阶段的过载电流上限和过载时长; I_{\max} 表示过载电流上限值,设置为一较大正数; M 为过载电流变化率,设置为正值以保障过载电流上限逐渐减小。

2.2 基于储能倍率特性约束的分步切负荷方法

首先,确定分步切负荷的周期。周期过长会增加储能过载时长,损坏设备;切负荷后需要时间稳定电压频率,周期也不宜过短。因此可综合考虑过载能力和切负荷后的调整时间,选取适宜的切负荷周期。

然后,确定每一次的切负荷量。由于负荷切除量以功率为单位,为了便于分析与计算,将上文电流过载特性转换为功率过载特性(过载功率=过载电流与变流器出口电压的乘积)。图 3 中,横轴 P 表示储能有功功率过载值;横轴 Q 表示储能无功功率过载值。储能过载功率表示为 $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 。假设分步切负荷周期为 T_q ,储能初始过载功率为 S_0 ,经过

一个周期后,需要将过载功率降低至 S_1 才能满足过载特性要求。以此类推,可以得到由多个过载功率 (S_0 至 S_n) 围成的区域(区域 0 至区域 $n-1$)。

从图 3 可以直观地看出,负荷颗粒度较大时,切一次负荷有可能使过载功率越过相邻区域跳至下个区域。因此,只需要累计切负荷量达到一定数值以上即可满足过载特性要求。假设初始时刻储能过载功率在区域 0 内,式(3)为每步切负荷量的下限值约束。第 1 次切负荷的量 S_{L1} 需要满足条件: $S_{L1} \geq (S_0^{PQ} - S_1^{PQ}) + (S_0^{VF} - S_1^{VF})$,第 2 次切负荷的量 S_{L2} 需要满足条件: $S_{L1} + S_{L2} \geq (S_0^{PQ} - S_2^{PQ}) + (S_0^{VF} - S_2^{VF})$,以此类推。根据负荷优先级以及式(3)约束条件即可确定每步切负荷量。

$$\sum_{i=1}^l S_{Li} \geq (S_0^{PQ} - S_l^{PQ}) + (S_0^{VF} - S_l^{VF}) \quad (3)$$

式中: l 表示以 T_q 为周期的累计切负荷次数; S_{Li} 表示第 i 次切负荷的功率;公式左边部分表示累计切负荷量; S_0^{PQ} 、 S_0^{VF} 分别表示初始时刻 PQ 储能过载功率和 VF 储能过载功率; S_l^{PQ} 、 S_l^{VF} 分别表示第 l 次切负荷后 PQ 储能过载功率和 VF 储能过载功率。

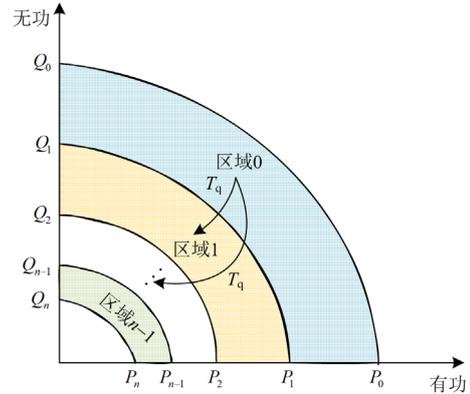


图 3 储能连续过载能力约束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of continuous overload capacity constraint of BES

3 动态 PQ 控制方法

由于频率可以通过主储能进行有效控制,因此,离网后电源有功功率不足导致电压跌落。在储能高倍率放电作用下,电压可以恢复到较高水平。但是在额定值附近切负荷时容易产生过/欠电压的情况。基于此,本文根据虚拟下垂/惯性控制原理动态调整从储能有功出力,将恒 PQ 控制优化为动态 PQ 控制,辅助主控制单元调节电压。结合图 4 可得,从储能的动态 PQ 控制策略具体描述如下。

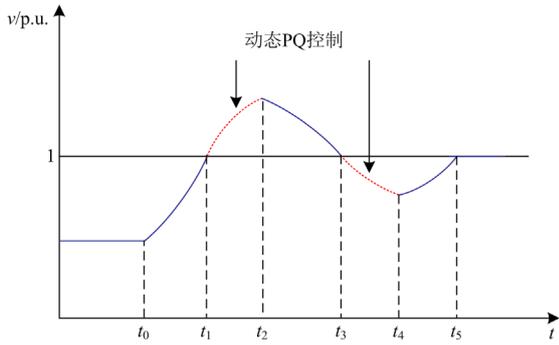


图4 从储能各阶段控制方式

Fig. 4 Control mode of each stage of slave BES

t_1-t_2 阶段: $v_i > 1$, $dv_i/dt > 0$, 目的为抑制电压上升, 降低最大过电压。电压变化率较大的前期, 可充分利用虚拟惯性控制($k_2|dv_i/dt|$)减小出力, 电压偏差较大的后期, 可充分利用虚拟下垂控制($k_1|1-v_i|$)减小出力。控制策略如式(4)所示。

t_3-t_4 阶段: $v_i < 1$, $dv_i/dt < 0$, 目的为抑制电压下降, 提高最小欠电压。在电压变化率较大的前期, 可充分利用虚拟惯性控制增加出力, 在电压偏差较大的后期, 可充分利用虚拟下垂控制增加出力。控制策略如式(5)所示。

t_0-t_1 、 t_2-t_3 、 t_4-t_5 阶段: 电压正在回调, 依靠主储能调节即可。控制策略如式(6)所示。

$$P_t^{\text{PQ}} = P_0^{\text{PQ}} - k_1|1-v_i| - k_2 \left| \frac{dv_i}{dt} \right|, \quad t \in (t_1, t_2) \quad (4)$$

$$P_t^{\text{PQ}} = P_0^{\text{PQ}} + k_1|1-v_i| + k_2 \left| \frac{dv_i}{dt} \right|, \quad t \in (t_3, t_4) \quad (5)$$

$$P_t^{\text{PQ}} = P_0^{\text{PQ}} = P_{t-1}^{\text{PQ}}, \quad t \in (t_0, t_1) \cup (t_2, t_3) \cup (t_4, t_5) \quad (6)$$

$$(S_0^{\text{PQ}} - \sum_{i=1}^I S_{L_i}) + (S_0^{\text{VF}} - S_t^{\text{VF}}) \leq S_t^{\text{PQ}} \leq S_t^{\text{PQ}} \quad (7)$$

$$S_t^{\text{PQ}} = \sqrt{P_t^{\text{PQ}^2} + Q^{\text{PQ}^2}} \quad (8)$$

式中: P_t^{PQ} 、 P_{t-1}^{PQ} 分别为储能当前时刻与前一时刻的有功出力; v_i 为当前时刻的电压值; k_1 、 k_2 分别为虚拟下垂和虚拟惯性控制系数。式(7)约束项作用在 t_0-t_5 整个阶段, 式(7)左边不等式为限制 PQ 储能最小出力, 从而使 VF 储能能够降低出力, 避免 VF 储能出力超过过载能力; 式(7)右边不等式为限制 PQ 储能最大出力, 从而避免 PQ 储能出力超过过载能力。式(8)中, Q^{PQ^2} 表示 PQ 储能无功出力, 本文设置为一常数。

4 非计划离网切换策略

根据以上分析, 本文提出考虑储能倍率特性约

束与动态 PQ 控制的非计划离网平滑切换策略, 其思路如图 5 所示, 核心步骤如下。

步骤 1: 检测并网点开关断开时, 主储能立即由 PQ 控制切换为 VF 控制, 从储能由 PQ 控制切换为动态 PQ 控制, 由储能高倍率放电支撑负荷, 使电压回升到较高水平。经过时长 T_q 进入步骤 2。

步骤 2: 判断负荷功率是否超过额定发电功率; 若是, 进入步骤 3, 若否, 进行步骤 5。

步骤 3: 按优先级顺序切除负荷, 同时, 保证负荷切除量满足式(3)约束, 不超出储能过载能力。

步骤 4: 在切负荷过程中, 根据第 4 节控制策略, 动态调整从储能出力, 辅助主储能抑制过/欠电压, 实现平滑过渡。经过时长 T_q , 进入步骤 2。

步骤 5: 从储能出力调至额定值及以下, 结束。

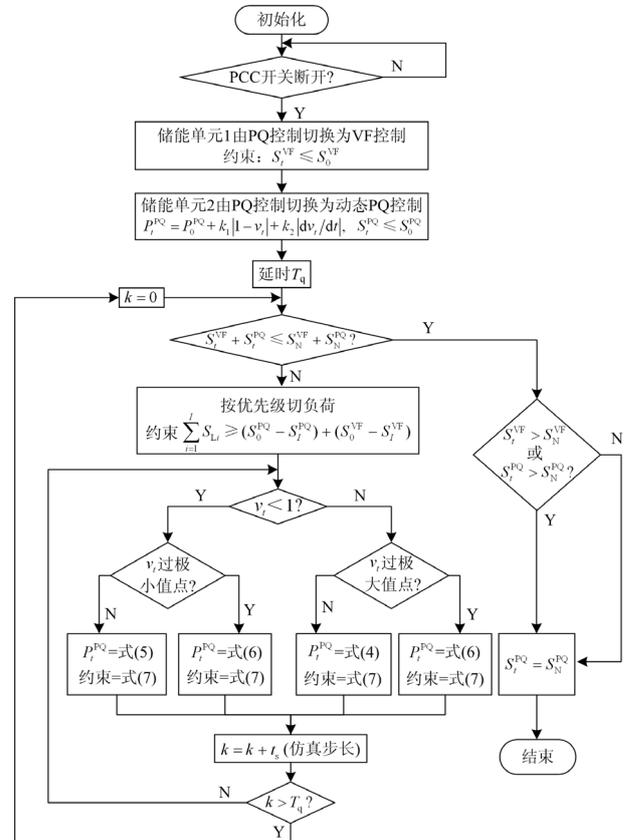


图5 考虑储能倍率特性约束和动态 PQ 控制的非计划离网平滑切换策略流程图

Fig. 5 Flow chart of unplanned off-grid smooth switching strategy considering BES rate characteristic constraints and dynamic PQ control

5 仿真分析

仿真背景设置如下: 单台变流器额定功率设置为 0.5 MW, 共 3 台 0.5 MW 的变流器。选择 1 台变

流器作为主控制器，主储能单元(储能单元 1)由 0.5 MW/0.5 MWh 的锂电池和 0.5 MW 的变流器构成。从储能单元(储能单元 2)由两组并联的 0.5 MW/0.5 MWh 的锂电池以及 0.5 MW 的变流器构成，输出功率在并联支路中平均分配。负荷总有功功率为 2.26 MW，无功功率为 0.44 Mvar。初始运行状态为并网，储能单元 1、2 均采用 PQ 控制，出力为 0。在 0.18 s 电网发生故障，当检测到并网点电压低于阈值 0.7 V 时，PCC 开关断开，同时，储能单元 1 切换到 VF 控制作为主储能，将储能单元 2 切换为动态 PQ 控制作为从储能。设置切负荷周期为 100 ms，在该周期下设置变流器电流连续过载上限值分别为 1.5 C、1.3 C、1.1 C。通过 Matlab 搭建模型进行仿真。

仿真分析 1: 常规的切负荷策略有两种。策略 1，一次性切除非重要负荷；策略 2，分步切除非重要负荷。以上两种策略从储能均采用恒 PQ 控制。

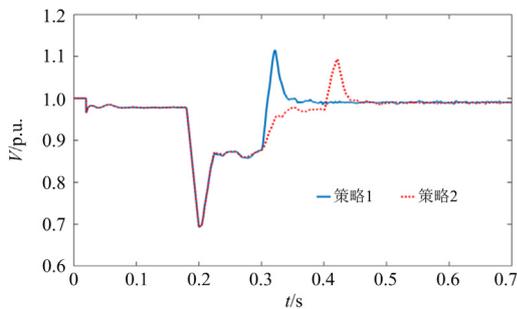
如图 6 所示，策略 1 在 0.3 s 一次性切除负荷，能够让电压快速恢复到额定值。但是该方法只能粗略地估计切负荷量，切负荷量过大时会导致切除瞬间电能过剩，主储能需大幅度减小出力(图 6(b)所示)，该过程会引起较大的过电压，影响设备的正常运行。策略 2 分两步切负荷，有一定时间调整切负荷量，0.4 s 第二次切除负荷后，电能过剩相对较小，因此主储能调节幅度相对较小，引起的过电压也相

对较小。理论上，切负荷步骤分的越多，最终的过电压会越小。但是该方法会导致系统电压迟迟不能恢复到额定状态，另一方面，切负荷过程太长会导致主储能过载时间太长，对设备造成严重损坏。本文提出的平滑切换策略能够很好地解决以上问题。

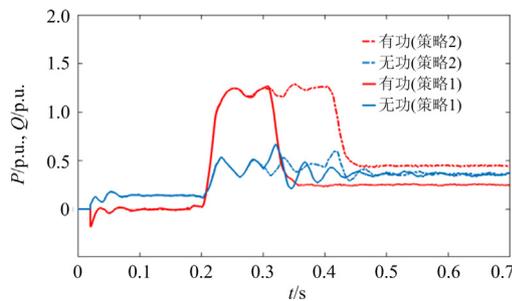
仿真分析 2: 对比本文策略与策略 2 的效果。

策略 2 中，离网后只有主储能自动的高倍率放电支撑负荷，从储能按照额定功率放电。与策略 2 相比，本文策略同时利用主、从储能高倍率放电，如图 7 所示，能够在切负荷前就将电压维持在一个较高的水平。考虑到储能连续过载特性，在 0.3 s 第一次切除负荷(有功功率为 0.45 MW，无功功率为 0.02 Mvar)，使主、从储能过载倍率降低。从图 7 可知，本文策略第一次切除负荷后电压便可回到额定值附近，大大缩短了低电压的持续时间。策略 2 则需要第二次切除负荷(有功功率为 0.83 MW，无功功率为 0.04 Mvar)后才能恢复到额定电压。第二次切负荷后存在电能过剩的问题。策略 2 仅利用主储能调节，因此过电压较大。本文策略通过动态 PQ 控制调整从储能出力，辅助主储能调节电压，大大减小了过电压幅度。

通过仿真分析 1、2 可知，策略 1: 低电压时间较短，切换过程过电压最大。策略 2: 低电压时间最长，切换过程过电压较大。本文方法: 低电压时间最短，切换过程过电压最小。对比可知，本文方法各方面结果都优于策略 1、2。



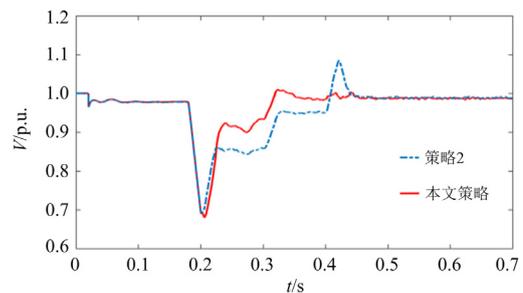
(a) 母线电压



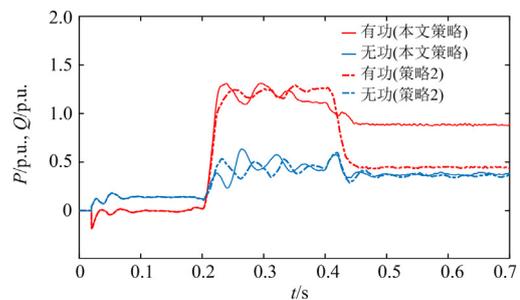
(b) 主储能出力

图 6 分步切负荷与一次性切负荷对比图

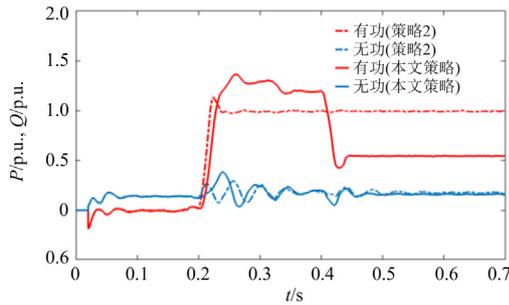
Fig. 6 Comparison between step load shedding and one-time load shedding



(a) 母线电压



(b) 主储能出力



(c) 从储能出力

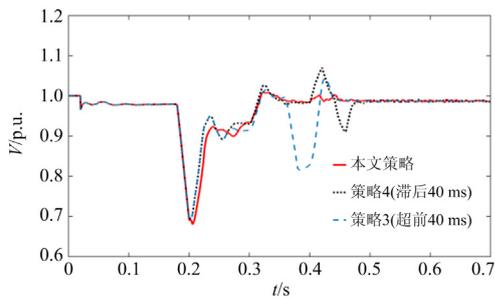
图 7 分步切负荷策略与本文策略对比

Fig. 7 Comparison between step-by-step load shedding strategy and the proposed strategy

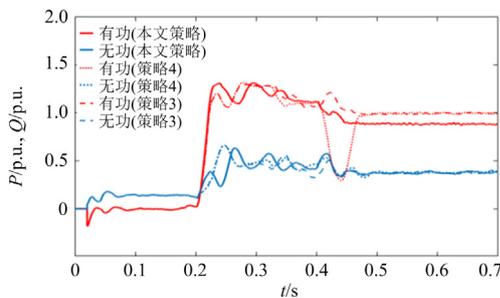
仿真分析 3: 理论上, 如果负荷开关断开时间和从储能响应指令时间完全同步, 可直接按照切负荷的大小确定从储能出力指令。然而, 实际中开关断开时间和储能响应指令时间无法完全同步。下面对比三种控制策略验证本文策略的有效性。

(1) 本文策略; (2) 策略 3, 从储能恒 PQ 控制, 响应动作超前切负荷动作 40 ms; (3) 策略 4, 从储能恒 PQ 控制, 响应动作滞后切负荷动作 40 ms。

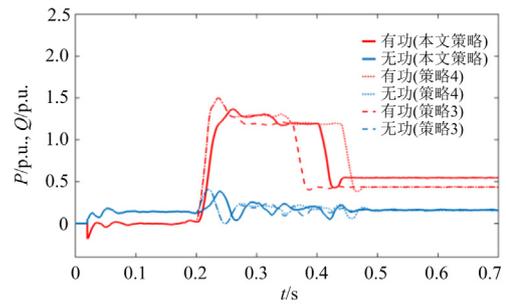
由图 8 可知, 对于策略 3, 第 2 次切负荷还未发生时从储能已经提前降低出力, 而主储能无法增加相应出力, 导致供不应求, 使电压发生很大跌落。切负荷后, 由于暂态振荡, 存在较大过电压。对于策略 4, 第 2 次切负荷发生时从储能还未降低出力, 供大于求, 从而引起较大的过电压。当从储能开始降低出力时, 又会导致电压跌落。由此可见, 切换



(a) 母线电压



(b) 主储能出力



(c) 从储能出力

图 8 不同步策略和本文策略对比

Fig. 8 Comparison between asynchronous strategy and the proposed strategy

时间不同步会造成较大扰动。而本文策略通过实时采集电压信息动态调整从储能出力, 可以有效减小切负荷过程中的电压振荡。

6 结论

本文以主从控制模式的微电网为研究背景, 针对并/离网切换过程中如何有效切除负荷并协调控制主从储能出力的问题进行研究, 提出了考虑储能倍率特性约束与动态 PQ 控制的非计划离网平滑切换控制策略。主要工作可总结为以下两个方面:

(1) 提出了考虑储能倍率特性约束的分步切负荷方法。仿真结果表明, 在考虑储能连续过载能力的约束下, 分步骤切负荷, 能够利用储能高倍率放电短时支撑剩余未切除负荷, 克服分步切负荷的缺陷, 维持电压在较高水平; (2) 基于虚拟下垂与虚拟惯性控制原理, 提出了储能动态 PQ 控制方法。分析表明, 所提方法在切负荷过程中的特定阶段动态调整从储能出力, 能够辅助主控制单元调节电压, 实现并网转离网过程的平滑过渡。

综合而言, 本文所提方法不仅能够保证并/离网切换过程中电压始终维持在较高水平, 还可显著降低切换过程中电压波动幅度, 有利于实现切换过程的平滑过渡, 保证供电可靠性。

参考文献

- [1] LI J, XUE Y, TIAN L, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 389-396.
- [2] YANG L, YANG Z, LI G, et al. Optimal scheduling of an isolated microgrid with battery storage considering load and renewable generation uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66: 1565-1575.

[3] 刘练, 李林, 丁明, 等. 面向园区的光储型微电网设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 171-179.
LIU Lian, LI Lin, DING Ming, et al. Design and application of photovoltaic and energy storage microgrid for the park[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 171-179.

[4] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.

[5] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20.

[6] 慕明良, 李守茂, 孟祥鹤, 等. 考虑灵活性的冷热电联供型微网优化调度[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 39-46.
MU Mingliang, LI Shoumao, MENG Xianghe, et al. Optimal scheduling of CCHP microgrid considering flexibility[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 39-46.

[7] 吴济东, 汪可友, 黄鑫, 等. 孤立直流微电网多DC-DC变换器分布式协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 76-83.
WU Jidong, WANG Keyou, HUANG Xin, et al. Distributed coordinated control scheme of parallel DC-DC converters in isolated DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 76-83.

[8] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.
DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.

[9] 郝飞, 袁贞, 袁志彬, 等. 离网型微电网稳态功率控制策略研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 173-179.
HAO Fei, YUAN Zhen, YUAN Zhibin, et al. Research and practice on off-grid microgrid steady power control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 173-179.

[10] 于国星, 侯睿, 汪任潇, 等. 孤岛微网分层分布式频率调节及功率优化控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 53-60.
YU Guoxing, HOU Rui, WANG Renxiao, et al. Hierarchical distributed frequency regulation and power optimization control for island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 53-60.

[11] 沈霞, 帅智康, 沈超, 等. 大扰动时交流微电网的运行与控制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 174-188.
SHEN Xia, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Review on operation and control of AC microgrid under large disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 174-188.

[12] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20.

[13] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 163-170.
CHEN Xin, JI Qiuhua, LIU Fei. Smooth transferring control method of microgrids based on master-slave configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 163-170.

[14] 孟鑫, 刘进军, 刘增, 等. 一种基于改进锁相环的并网平滑切换策略[J]. 电力电子技术, 2018, 52(10): 1-4.
MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng, et al. An improved phase-locked loop based on seamless transfer control strategy[J]. Power Electronics, 2018, 52(10): 1-4.

[15] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
SUN Xiaofeng, LÜ Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.

[16] 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.
XU Sheng, CAO Wu, ZHAO Jianfeng. An integrated control strategy of the stabilization operation and mode smooth transfer for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3855-3867.

[17] 许吉强, 卢闻州, 吴雷. 低压微电网逆变器的自调节下垂系数控制策略[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 13-18.
XU Jiqiang, LU Wenzhou, WU Lei. Control of self-adaptive droop coefficient for inverter in low voltage microgrid[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(6): 13-18.

[18] 张腾飞, 黎旭昕. 含光伏源的微电网孤岛/联网平滑切换控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 904-910.
ZHANG Tengfei, LI Xuxin. A control strategy for smooth

- switching between island operation mode and grid-connection operation mode of microgrid containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 904-910.
- [19] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [20] ZHENG F, LIN X, LIN Y, et al. Design of a novel hybrid control strategy for ES grid-connected inverter for smooth microgrid transition operation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 171950-171965.
- [21] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴. 微网储能变流器平滑切换控制方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 137-143.
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing. Research on smooth switching control method for micro-grid power converter system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 137-143.
- [22] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 279-284.
TANG Xisheng, DENG Wei, QI Zhiping. Research on grid-connected/islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 279-284.
- [23] 张雪松, 赵波, 李鹏, 等. 基于多层控制的微电网运行模式无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 179-184.
ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, LI Peng, et al. Seamless switching strategies for microgrid based on multi-layer control architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 179-184.
- [24] 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.
ZHENG Jinghong, WANG Yanting, LI Xingwang, et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 17-24.
- [25] 蒋闻, 李骊, 赵晋, 等. 基于微电网运行模式识别的逆变器自适应控制结构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 78-82.
JIANG Wen, LI Li, ZHAO Jin, et al. Adaptive control structure of inverter based on microgrid operation mode identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 78-82.
- [26] 刘晖, 雷勇, 朱英伟, 等. 微电网运行模式切换下储能变流器双无源控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 196-202.
LIU Hui, LEI Yong, ZHU Yingwei, et al. Dual-passivity-based control strategy for energy storage converter under microgrid operation mode switching[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 196-202.
- [27] 黎淑娟. 储能电池参与电网快速调频的综合选型与优化配置[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
LI Shujuan. Energy storage battery participates in the comprehensive selection and optimal configuration of power grid fast frequency modulation[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [28] 赵斌, 呼如威, 蒋东方, 等. 高寒高海拔地区微网储能锂电池系统优化设计[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 128-134.
ZHAO Bin, HU Ruwei, JIANG Dongfang, et al. Optimized design of lithium battery system for microgrid energy storage in severely cold and high elevation regions[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 128-134.
- [29] 朱安远. 变流器过载能力初探[J]. 电气传动, 2011, 41(6): 31-34, 53.
ZHU Anyuan. Primary research on overload capability of converter[J]. Electric Drive, 2011, 41(6): 31-34, 53.

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-05-21

作者简介:

刘伟(1974—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: dswdliuwei@163.com

刘小龙(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统调度与控制; E-mail: 123195668@qq.com

刘程华(2000—), 男, 研究方向为计算机科学及应用。E-mail: liuch18@mails.tsinghua.edu.cn

(编辑 许威)