

# 微网蓄电池储能系统滤波及并网控制策略

曾祥军<sup>1</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 路亮<sup>2</sup>, 王一波<sup>3</sup>

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 中国科学院电工研究所 中国科学院太阳能热利用技术及光伏系统实验室, 北京 100190)

**摘要:** 针对微网中蓄电池储能系统充放电时谐波含量较高情况, 在 DC/DC 与 DC/AC 变流器之间加入 LC 滤波器滤除低次谐波, 在 DC/AC 变流器与电网之间加入 LCL 滤波器抑制高次谐波; 并在传统 PQ 控制基础上以逆变器侧电感电流和网侧电感电流加权值作为内环电流控制信号, 降低了解耦分量的纹波含量, 减小了储能系统的电压源特性和 LCL 滤波器阻抗特性对滤波效果和电压波形的影响, 提高了控制精度和响应速度; 通过隔离变压器调节逆变器输出电压, 保证并网电压的稳定。构建仿真模型仿真验证了双层滤波结构和改进控制策略可有效提高蓄电池储能系统的电能质量。

**关键词:** 微网; 蓄电池; 储能; 滤波器; PQ 控制; 电能质量

**中图分类号:** TM 912; TM 46

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.007

## 0 引言

蓄电池具有能量密度大、投资成本低等优点, 在微网中不仅可以存储电能、削峰填谷、平抑新能源出力波动, 还可以作为紧急备用电源, 广泛应用于微网储能系统<sup>[1-2]</sup>。

国内外学者针对微网储能系统的研究主要集中在以下几个方面: 储能的建模仿真与充放电控制研究; 储能系统的并网结构与控制策略研究; 储能系统的容量设计与功率分配优化研究。文献[3-5]针对蓄电池的建模仿真、荷电状态(SOC)预测以及充放电控制策略进行了研究。文献[6]介绍了储能系统常用的 3 种并网结构及控制策略; 文献[7-8]对蓄电池与超级电容器组成的混合储能系统提出了基于负载功率高频分量检测和基于低通滤波算法的混合储能控制策略。文献[9-10]从系统运行经济性和环境效益出发, 对蓄电池储能系统和微源的容量及功率分配进行研究。上述研究多关注储能的控制和微网全局的能源优化, 而忽视了储能系统的充放电电能质量。文献[11]采用零电压相位控制提高了蓄电池放电时直流电压稳定性, 但并未考虑充电时的情况。文献[12]提出采用电容电流微分反馈控制方法抑制蓄电池充放电过程中的高次谐波, 却未提及对低次谐波的影响。虽然这些研究也注意到了谐波对储能系统充放电的影响, 却也只关注某一方面, 未能对储能系统的高低次谐波抑制进行全面考虑。

为减少微网中蓄电池储能系统的谐波含量以提

高充放电的电能质量, 本文对储能系统常用的滤波结构及各自的优缺点进行分析, 提出了微网储能系统的双层滤波结构, 在逆变器直流侧串入 LC 滤波器, 减少直流侧充放电电流的纹波含量; 在交流侧通过三相 LCL 滤波器抑制高次谐波。为达到最佳滤波效果且不引起系统谐振, 还对滤波器的参数进行设计; 同时对传统 PQ 控制法进行了改进, 以逆变器侧电感电流和网侧电感电流加权值作为内环控制信号, 在减小因系统阻尼变化对电能质量影响的同时提高了控制的精度和响应速度; 通过在并网结构上新增隔离变压器对电压进行调节, 使得并网点电压能维持稳定, 弥补了 PQ 控制法的不足, 提高了电能质量。最后基于 MATLAB/Simulink 仿真验证了双层滤波结构和改进控制策略对提高蓄电池储能系统充放电电能质量的有效性和可行性。

## 1 蓄电池储能系统设计

### 1.1 微网中的储能系统

典型微网的微源和负荷均连接在交流母线上。蓄电池储能系统经 DC/DC 与 DC/AC 变流器与交流母线实现能量交换(见图 1), 在微源供电不足时向负荷供电, 当微源出力过剩时存储多余电能。为减小变流器中因使用大量高频电力电子器件而产生的谐波污染对微网电能质量的影响, 提高储能设备的性能和使用寿命, 研究设计合理的储能系统滤波结构及其控制策略十分重要<sup>[13]</sup>。

### 1.2 常用的储能滤波结构

常用的蓄电池储能系统滤波结构可分为 L 型、LC 型、LCL 型, 其结构如图 2 所示。各种滤波结构的优缺点如表 1 所示。

收稿日期: 2016-07-19; 修回日期: 2017-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267019)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267019)

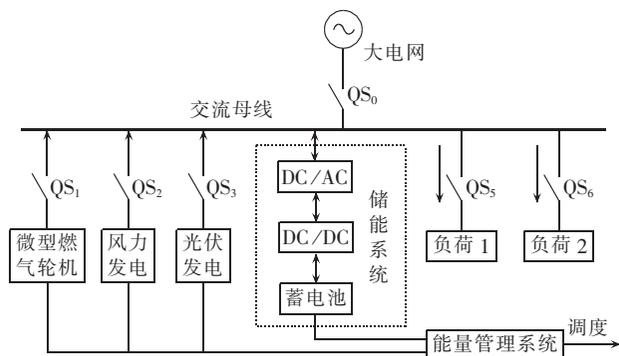


图 1 含储能微网典型结构图

Fig.1 Typical structure of microgrid with BESS

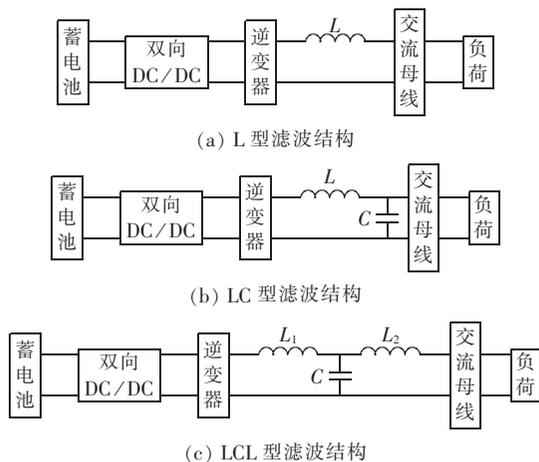


图 2 蓄电池储能系统常见滤波结构

Fig.2 Common filtering structures of BESS

表 1 常见滤波结构优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages among common filtering structures

类型	优点	缺点
L 型	结构简单	高频衰减特性差, 体积较大, 铁芯带来额外损耗
LC 型	结构和参数选取简单, 投资少, 低频特性好	高频纹波抑制效果不理想, 滤波效果易受电网阻抗影响
LCL 型	高频衰减特性好, 体积小, 且网侧电感可抑制冲击电流	低频衰减特性不明显, 对参数设计要求高, 易发生谐振, 存在谐振尖峰

## 2 微网储能系统滤波结构设计

### 2.1 双层滤波结构

常用滤波结构采用单一滤波方式, 很难同时兼顾高、低次谐波的抑制。本文根据表 1 所示的各滤波结构的优缺点, 提出将 LC 滤波器和 LCL 滤波器相结合从而提高储能系统充放电电能质量的设想。所设计的具有双层滤波结构的微网储能系统如图 3 所示(图中将储能系统以外的部分用微源 DG 表示)。

所设计的双层滤波结构如图 4 所示, LC 滤波器用于抑制直流侧的低次纹波, LCL 滤波器则用于滤除交流侧高次谐波。由于 LCL 滤波器存在谐振尖峰, 容易造成系统不稳定, 故本文在滤波电容后面串

接阻尼电阻  $R_f$  以抑制谐振尖峰<sup>[14-15]</sup>。

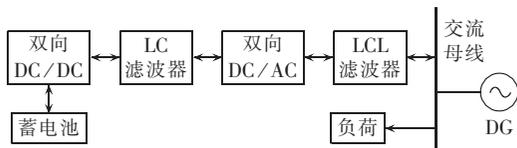


图 3 微网蓄电池储能系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of BESS in microgrid

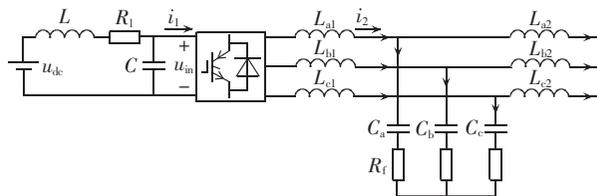


图 4 双层滤波结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of dual-filter structure

### 2.2 LC 滤波器参数

滤波参数的选取关系到充放电过程谐波的抑制效果, 甚至影响系统的稳定, 为兼顾滤波效果和系统稳定性, 本文将分别设计 LC、LCL 滤波器参数。

#### 2.2.1 LC 滤波器参数

LC 滤波器由单相电感和单相电容组成, 两侧接入直流量。为了使 LC 滤波器最大限度地滤除交流分量又不引起谐振, LC 滤波器的截止频率  $f_L$  通常按式(1)进行设计<sup>[15]</sup>:

$$10f_1 < f_L < f_{k\_min} \quad (1)$$

其中,  $f_{k\_min}$  为逆变器最小开关频率;  $f_1$  为交流侧基波频率。当开关频率  $f_k$  远大于 10 倍基波频率  $f_1$  时, 滤波器截止频率  $f_L$  则设计在 1/10~1/5 的开关频率之间<sup>[16]</sup>, 即:

$$\frac{f_k}{10} < f_L < \frac{f_k}{5} \quad (2)$$

其中,  $f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ,  $L = \frac{U_o}{\omega_1^2 I_o} \sqrt{\omega_1^2 + \omega_c^2}$ ,  $C = \frac{1}{\omega_1^2 L}$ ,  $C$  分别为 LC 滤波器的电感、电容,  $U_o$ 、 $I_o$  分别为流经 LC 滤波器的直流电压、电流,  $\omega_1$  为逆变器交流侧基波角速度,  $\omega_c$  为截止角速度。

#### 2.2.2 LCL 滤波器参数

三相 LCL 滤波器的三相参数相同, 故本文以 A 相为例对滤波器参数进行设计, 主要包括电感  $L_{al}$ 、 $L_{a2}$ , 电容  $C$  以及阻尼电阻  $R_f$ 。

滤波电感  $L_{al}$  的取值由流经  $L_{al}$  的最大谐波电流  $\Delta i_{max}$  的大小决定<sup>[17]</sup>, 本文按最大谐波电流为 20% 额定电流进行设计, 见式(3)、(4), 则  $L_{al}$  应满足式(5)所示关系。

$$i_N = \frac{P}{\sqrt{3} U_N} \quad (3)$$

$$\Delta i_{max} = \frac{1}{8} \frac{U_{dc}}{L_{al} f_k} = 20\% i_N \quad (4)$$

$$L_{a1} = \frac{U_{dc}}{1.6i_N f_k} \quad (5)$$

其中,  $i_N$  为逆变器额定电流;  $U_N$  为额定电压;  $P$  为逆变器额定功率;  $U_{dc}$  为逆变器直流侧等效直流电压源。

电感  $L_{a2}$  的取值则与  $L_{a1}$  的大小有关, 取值太大将使系统的动态响应变慢, 太小则使滤波效果减弱且增加输出的脉动使损耗增加。  $L_{a1}$  和  $L_{a2}$  的值存在如下关系<sup>[18]</sup>:

$$L_{a1} = k L_{a2} \quad (6)$$

其中,  $k$  为比例系数, 通常取值在 4~6 之间时对谐波抑制效果最好。

电容的大小会影响输出电压的总谐波畸变率 (THD) 和流经开关管的电流。电容  $C$  的选取与逆变器发出的无功功率密切相关, 本文按逆变器产生无功功率为其额定有功功率的 20% 计算电容。

$$C = 20\% \frac{P}{6\pi f_1 U_N^2} \quad (7)$$

阻尼电阻  $R_f$  越大, 抑制系统谐振的能力越强, 但阻尼电阻过大会降低滤波器高频段的谐波衰减能力且增大系统损耗<sup>[19]</sup>。故  $R_f$  的设计应综合考虑谐波抑制能力和系统损耗, 本文取与 LCL 滤波器谐振频率  $f_m$  下的电容容抗值  $X_C$  相等的值, 见式 (8)、(9)。

$$R_f = X_C = \frac{1}{2\pi f_m C} \quad (8)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{a1} + L_{a2}}{L_{a1} L_{a2} C}} \quad (9)$$

### 3 储能系统双层滤波结构稳定性分析

设双层滤波器结构中所有开关元件均为理想开关元件, 忽略交流侧滤波电感寄生电阻和磁芯饱和影响, 推导得出直流输出电压  $u_{dc}$  和逆变器输入电压  $u_{in}$  之间的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{1}{LCs^2 + R_1s + 1} \quad (10)$$

其中,  $R_1$  为 LC 滤波器的寄生电阻。

逆变器的传递函数通常为一阶惯性环节, 其输入直流电压与输出电流之间的传递函数为<sup>[20]</sup>:

$$G_2(s) = \frac{1}{1 + Ts} \quad (11)$$

其中,  $T$  为逆变器的开关周期。而交流侧逆变器输出电压  $i_{inv}$  与经串阻尼 LCL 滤波后输出电压  $u_{out}$  之间的传递函数关系为:

$$G_3(s) = \frac{1 + R_f C s}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 C R_f + L_2 C R_f) s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (12)$$

则蓄电池储能系统双层滤波结构的传递函数为:

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) G_3(s) \quad (13)$$

根据式 (13) 绘制的蓄电池储能系统 Bode 图如图 5 所示, 由图可知系统的相角裕度和增益裕度均

能很好地满足系统稳定要求, 说明本文设计的双层滤波结构具有很好的稳定性。

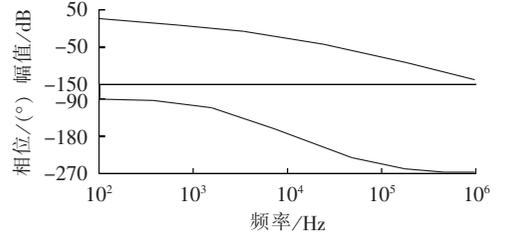


图 5 改进控制系统波特图

Fig.5 Bode diagram of improved control system

## 4 具有双层滤波结构的储能系统控制策略

### 4.1 储能系统传统的控制策略

微网蓄电池储能系统通常采用如图 6 所示的 PQ 控制法<sup>[21]</sup>。通过功率外环、电流内环的双环结构对并网逆变器的输出进行控制。外环控制通过对流过滤波电感  $L_1$  的瞬时电流  $i_{abc}$ 、并网电压  $u_{abc}$  进行 dq 变换得到其直流量  $u_d, u_q$  和  $i_d, i_q$ , 然后计算得到系统有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ , 对其滤波后与给定的参考量  $P_{ref}, Q_{ref}$  作比较并通过 PI 调节得到内环控制器的参考信号  $i_{dref}, i_{qref}$ ; 内环控制主要通过前馈补偿和交叉耦合补偿消除系统扰动量, 并将坐标变换后的电压信号加载到载波信号上得到逆变器控制信号。

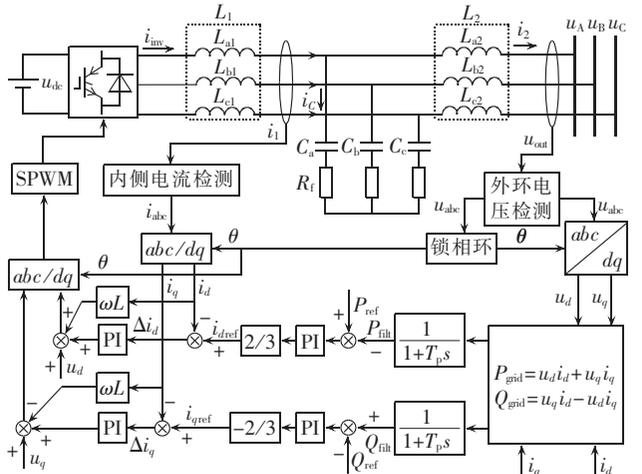


图 6 传统控制原理图

Fig.6 Schematic diagram of conventional control

PQ 控制通常采用锁相环对电网电压锁相来保证逆变器输出电压的频率稳定, 但无法维持输出电压的幅值稳定, 且受储能系统本身的电压源特性以及 LCL 滤波器阻抗特性影响, 瞬时电流  $i_{abc}$  的解耦分量  $i_d, i_q$  含有较多纹波<sup>[24]</sup>, 这不仅干扰了滤波效果使逆变器输出电压波形变差, 而且降低了控制的准确性。

### 4.2 储能系统控制策略的改进

为减小储能系统电压源特性和 LCL 滤波器阻抗特性对滤波效果的影响, 本文对 PQ 控制法进行改进, 见图 7。

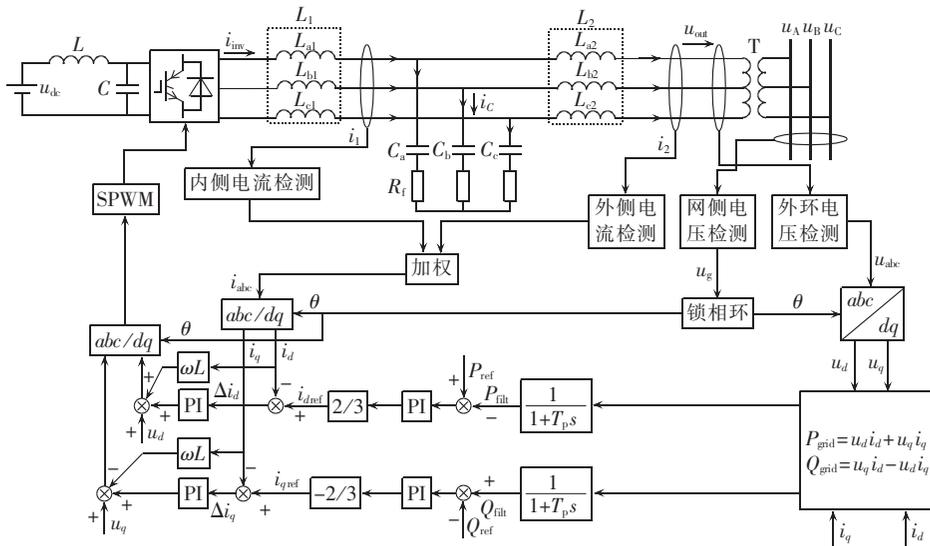


图 7 改进控制原理图

Fig.7 Schematic diagram of improved control

流过滤波电感  $L_2$  的瞬时电流  $i_2$  相对  $i_1$  的变化反映了滤波器阻抗特性对逆变器输出电流的影响。参考反馈调节原理,本文以流过 LCL 滤波器电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流  $i_1$ 、 $i_2$  的加权值代替原控制策略中瞬时电流  $i_{abc}$ ,将  $i_2$  引入电流内环,通过电流的反馈作用减少瞬时电流  $i_{abc}$  的解耦分量  $i_d$ 、 $i_q$  中的纹波含量,提高追踪精度和响应速度,以及减小因阻抗特性引起的偏差。

电感  $L_1$ 、 $L_2$  为串联关系,理想情况下流经电感的电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、并网电流瞬时值  $i_{abc}$ 、并网电压  $u_{out}$  之间存在如下关系:

$$i_{abc} = \frac{u_{out}}{L_1 + L_2} \quad (14)$$

$$u_{out} = i_1 L_1 + i_2 L_2 \quad (15)$$

由式(14)、(15)推导得到权重与电感阻抗相关式为:

$$i_{abc} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} i_1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2} i_2 = a i_1 + b i_2 \quad (16)$$

其中,  $a$ 、 $b$  分别为电流  $i_1$ 、 $i_2$  的权值。据式(6)可知电感  $L_1$ 、 $L_2$  之间存在比值  $k$  的关系,故式(16)也可表示为:

$$i_{abc} = \frac{k i_1 + i_2}{1 + k} \quad (17)$$

为解决 PQ 控制法无法维持并网电压幅值稳定问题,通过在并网前新增隔离变压器 T,避免直流分量进入交流网络,实现交流电压幅值在小范围内可调,保证并网电压的幅值稳定;同时其滤波电抗对谐波也有一定抑制作用。

## 5 仿真验证

参照图 3 在 MATLAB/Simulink 中搭建蓄电池储能系统仿真模型。模型中蓄电池采用恒压充放电方式,充电电流限制在蓄电池单元额定容量的 10% 以内<sup>[22]</sup>,蓄电池组初始荷电状态为 50%,0.02 s 时蓄

电池开始放电,0.6 s 转为充电。蓄电池组容量为 96 kA·h,蓄电池输出电压为 320 V,并网额定电压为 380 V,DC/DC 变流器开关频率为 5 kHz,逆变器载波频率为 5 kHz,DC/AC 变流器额定容量为 100 kW,负荷有功需求  $P_{ref}=20$  kW,负荷无功需求  $Q_{ref}=5$  kvar,LC 滤波电感  $L=1.29$  mH,LC 滤波电容  $C=8.72$   $\mu$ F,寄生电阻  $R_1=0.03$   $\Omega$ ,比值  $k=5$ ,LCL 电感  $L_{a1}=8.31$  mH,LCL 电容  $C_a=14.3$   $\mu$ F,LCL 电感  $L_{a2}=1.66$  mH,阻尼电阻  $R_f=232$   $\Omega$ 。由于蓄电池充放电较为缓慢,在不影响其他性能的情况下,仿真过程中对蓄电池模型的积分倍数进行调整以加速仿真。

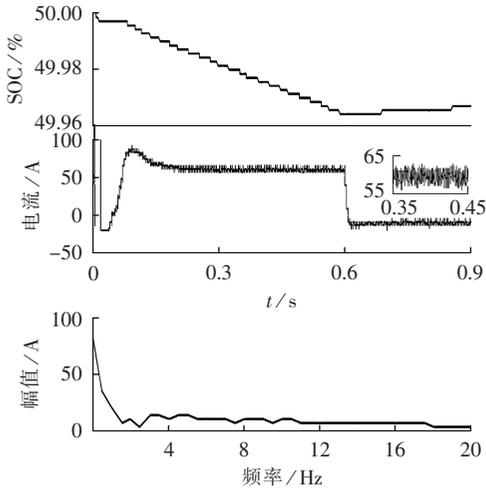
本文分别对储能系统在传统 PQ 控制下采用 LCL 滤波、LC 与 LCL 双层滤波以及改进 PQ 控制下采用双层滤波结构 3 种情况进行仿真。图 8—10 分别为 3 种情况下蓄电池充放电电流波形和交流侧并网电压波形,为对其波形成分进行分析,给出了电流和电压波形的幅值谱曲线,曲线的紧密程度及幅值可反映波形中的谐波含量。

图 8 为采用 LCL 型滤波结构的储能系统采用传统的 PQ 控制的仿真结果。仿真结果说明蓄电池直流侧的充放电电流纹波含量较高,谐波分析可知其中主要含低次谐波(见图 8(a))。从并网点充放电状态转换前后的电压波形可知:蓄电池对外放电期间三相电压波形虽满足正弦波,但谐波含量较多(见图 8(b)),蓄电池充电期间(0.6 s 后),其电压波形与外部电网一致。

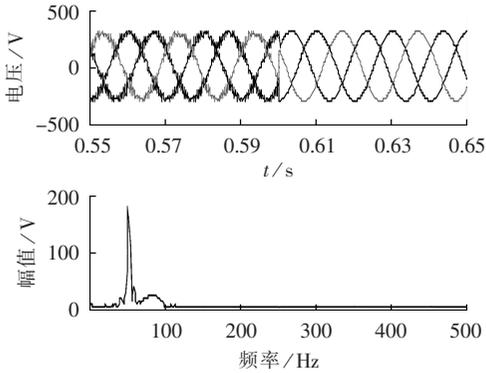
图 9 为双层滤波结构采用传统 PQ 控制法时的仿真波形。对比图 8、图 9 可知,直流侧电流与交流侧电压波形趋势基本一致。直流侧 LC 滤波器的引入使电压和电流中的谐波含量明显减少,且蓄电池的放电速度有所减慢、而充电速度加快,原因是 LC

滤波器的引入,减少了直流侧纹波,提高了蓄电池的充放电效率,降低了放电时的电能损耗,故双层滤波结构在谐波抑制上较单独的 LCL 滤波器有明显的优势。对图 9(b)分析可知,尽管双层滤波结构能有效减小谐波含量,但交流侧电压波形仍存在一定的谐波干扰,且电压幅值在充放电状态改变时有波动。

图 10 为双层滤波结构采用改进 PQ 控制策略的

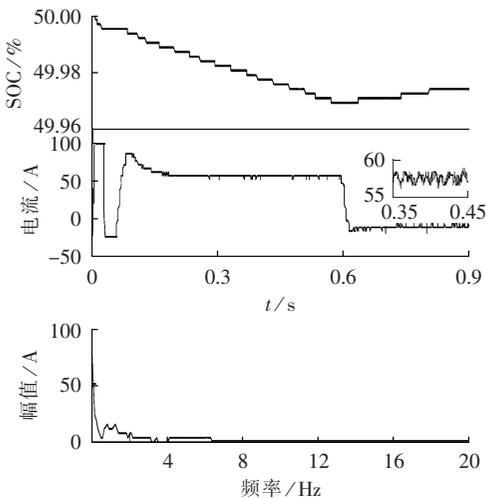


(a) 直流侧蓄电池充放电波形及谐波分析

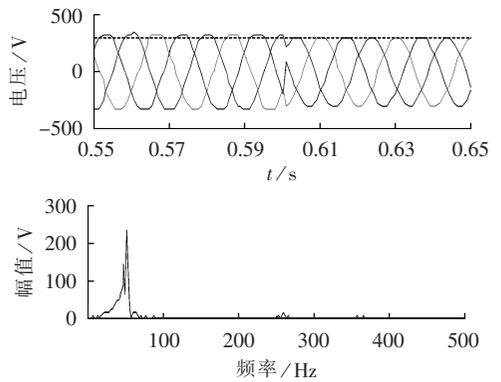


(b) 交流侧并网电压波形及谐波分析

图 8 传统控制下采用 LCL 滤波结构仿真波形  
Fig.8 Simulative waveforms of LCL-filter structure under conventional control

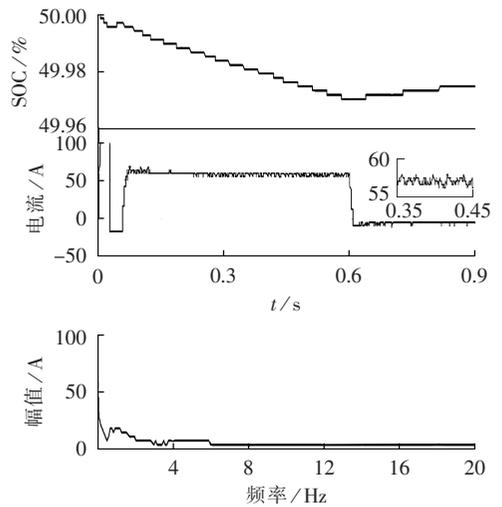


(a) 直流侧蓄电池充放电波形及谐波分析

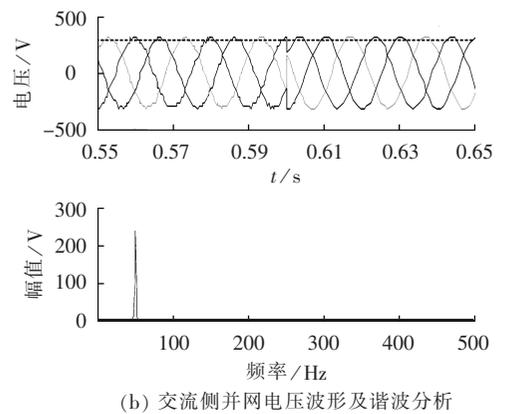


(b) 交流侧并网电压波形及谐波分析

图 9 传统控制下采用双层滤波结构仿真波形  
Fig.9 Simulative waveforms of dual-filter structure under conventional control



(a) 直流侧蓄电池充放电波形及谐波分析



(b) 交流侧并网电压波形及谐波分析

图 10 改进控制策略采用双层滤波结构仿真波形  
Fig.10 Simulative waveforms of dual-filter structure under improved control

仿真波形,对比图 9(a)和图 10(a)可知,改进前蓄电池放电在 0.18 s 达到稳定,而改进后稳定时间缩短到 0.12 s,加快了系统响应速度;对比图 9(b)和图 10(b)可知改进控制策略后交流侧电压波形中谐波含量减少。通过隔离变压器的调节电压幅值在充放电状态改变前后基本不变。对比图 10 和图 8 可知本文设计的具有双层滤波结构的储能系统采用改进控制策略

可有效抑制交流侧和直流侧的谐波,提高蓄电池储能系统充放电电能质量。

## 6 结论

本文为提高储能系统电能质量和并网可靠性,提出了双层滤波结构;对传统 PQ 控制进行了改进,同时在结构上增加了隔离变压器。在上述研究过程中本文得出如下结论。

**a.** 蓄电池储能系统采用单一的 LCL 滤波器在一定程度上能够抑制系统并网时的高次谐波,但对影响蓄电池充放电电流的低次谐波抑制效果不足。

**b.** 蓄电池储能系统采用双层滤波结构能很好地抑制交、直流侧的高低次谐波干扰,但受电压源特性和 LCL 滤波器阻抗特性影响,并网电压波形中仍含有一定量的谐波。

**c.** 蓄电池储能系统将双层滤波结构与改进控制策略相结合后,不仅可有效地治理储能系统中的高低次谐波,而且可以减小系统自身阻抗特性和非理想电压源特性对并网电压波形的影响;隔离变压器不仅可在小范围内对电压进行调节以保证并网电压的幅值稳定,其滤波电抗也可以抑制谐波,提高系统的电能质量。

## 参考文献:

- [1] 石庆均,江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):76-82.  
SHI Qingjun,JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):76-82.
- [2] 范立新,郭浩,顾文,等. 基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):100-105.  
FAN Lixin,GUO Hao,GU Wen,et al. Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):100-105.
- [3] 彭思敏,施刚,蔡旭,等. 基于等效电路法的大容量蓄电池系统建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):11-18.  
PENG Simin,SHI Gang,CAI Xu,et al. Modeling and simulation of large capacity battery systems based on the equivalent circuit method[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):11-18.
- [4] 赵轩,康留旺,马建,等. 铅酸蓄电池模型研究及 SOC 模糊估计[J]. 蓄电池,2014,51(1):10-14.  
ZHAO Xuan,KANG Liuwang,MA Jian,et al. Study on the model of lead-acid battery and fuzzy estimation of state-of-charge[J]. Chinese Labat Man,2014,51(1):10-14.
- [5] 叶曙光,胡蕊,刘钊,等. 基于 LCL 滤波器的双向储能变流器研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):88-92.  
YE Shuguang,HU Rui,LIU Zhao,et al. Bi-directional power conversion system based on LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):88-92.
- [6] ETXEBERRIA A,VECHIU I. Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids[J]. Energy Conversion & Management,2012,54(1):113-121.
- [7] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(4):334-340.  
ZHANG Chunjiang,DONG Jie,LIU Jun,et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(4):334-340.
- [8] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.  
DING Ming,LIN Gende,CHEN Zinian,et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):1-6.
- [9] 郭力,刘文建,焦冰琦,等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):524-536.  
GUO Li,LIU Wenjian,JIAO Bingqi,et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(4):524-536.
- [10] 肖峻,张泽群,张磐,等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):19-26.  
XIAO Jun,ZHANG Zequn,ZHANG Pan,et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(12):19-26.
- [11] 李圣清,栗伟周,徐文祥,等. 微电网储能单元与有源电力滤波器的组合研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(18):56-60.  
LI Shengqing,LI Weizhou,XU Wenxiang,et al. Combination research of micro-grid storage unit and active power filter[J]. Power System Protection and Control,2013,41(18):56-60.
- [12] 李宁宁,梁爽,纪延超,等. 基于 LCL 滤波器的蓄电池双向 DC/DC 变换器的研究[J]. 电机与控制学报,2015,19(7):8-13.  
LI Ningning,LIANG Shuang,JI Yanchao,et al. Research on battery DC/DC bidirectional converter using LCL filter[J]. Electric Machines and Control,2015,19(7):8-13.
- [13] 张琪,唐忠. SVPWM 逆变器的开关频率和调制电压幅值对输出电压谐波的影响[J]. 华东电力,2014,42(8):1589-1595.  
ZHANG Qi,TANG Zhong. Influence of switching frequency and modulation voltage amplitude of SVPWM inverter on output voltage harmonic[J]. East China Electric Power,2014,42(8):1589-1595.
- [14] 王盼,刘飞,查晓明. 基于有源阻尼的并联有源滤波器输出 LCL 滤波器设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):161-166.  
WANG Pan,LIU Fei,ZHA Xiaoming. Design of output LCL filter based on shunt APF with active damping[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):161-166.
- [15] 宋强,刘文华,严干贵,等. 大容量 PWM 电压源逆变器的 LC 滤波器设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(3):345-348.  
SONG Qiang,LIU Wenhua,YAN Gangui,et al. LC filter design for high-power PWM voltage source inverter[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2003,43(3):345-348.
- [16] 俞杨威,金天均,谢文涛,等. 基于 PWM 逆变器的 LC 滤波器[J]. 机电工程,2007,24(5):50-52.  
YU Yangwei,JIN Tianjun,XIE Wentao,et al. LC filter based on PWM inverter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2007,24(5):50-52.
- [17] 唐亮. 三相并网逆变器滤波特性分析及控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2010.

- TANG Liang. Research on the LCL filter characteristic aanalysis and control of there-phase grid-connected inverter[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2010.
- [18] 刘飞,查晓明,段善旭. 三相并网逆变器LCL滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报,2010,25(3):110-116.
- LIU Fei,ZHA Xiaoming,DUAN Shanxu. Design and research on parameter of LCL filter in three-phase grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(3):110-116.
- [19] 王要强,吴凤江,孙力,等. 阻尼损耗最小化的LCL滤波器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(27):90-95.
- WANG Yaoqiang,WU Fengjiang,SUN Li,et al. Optimized design of LCL filter for minimal damping power loss[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(27):90-95.
- [20] 王成山. 微电网分析与仿真理论[M]. 北京:科学出版社,2013:130-140.
- [21] 金鹏,艾欣,孙英云,等. 平抑功率脉动的微电网PQ控制策略优化设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):30-36.
- JIN Peng,AI Xin,SUN Yingyun,et al. Optimal design of microgrid PQ control stragegy for reducing power oscillations [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):30-36.
- [22] 李俄收,王远,吴文民. 铅酸蓄电池充电技术研究[J]. 蓄电池,2010,47(6):253-258.
- LI Eshou,WANG Yuan,WU Wenmin. Research on charging technology of lead-acid battery[J]. Chinese Labat Man,2010,47(6):253-258.

#### 作者简介:



曾祥军

曾祥军(1990—),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为微网仿真技术(E-mail:120743597@qq.com);

李凤婷(1965—),女,河北平山人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为可再生能源并网技术与电力系统保护(E-mail:xjllt@sina.com)。

## BESS filtering and grid-connection control of microgrid

ZENG Xiangjun<sup>1</sup>,LI Fengting<sup>1</sup>,LU Liang<sup>2</sup>,WANG Yibo<sup>3</sup>

(1. Renewable Power Generation and Grid Connection Techniques Engineering Research Center of the Ministry of Education,Xinjiang University,Urumchi 830047,China;

2. Wind Power Technology Centre of Gansu Electric Power Company,Lanzhou 730050,China;

3. Solar Thermal Technology and Photovoltaic System Laboratory,Institute of Electrical Engineering,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China)

**Abstract:** Aiming at the high harmonic contents due to the charging and discharging of BESS (Battery Energy Storage System) in microgrid,a dual-filter structure is proposed,which applies an LC filter between DC/DC converter and DC/AC converter to filter out the low-order harmonics and an LCL filter between DC/AC converter and grid to restrain the high-order harmonics. Based on the conventional PQ control,the weighted inverter-side and network-side inductive currents are used as the signals of inner-loop current control to lower the ripples of decoupled components,reduce the influence of the voltage-source characteristics of BESS and the impedance characteristics of LCL filter on the filtering effect and voltage waveform,and improve the control accuracy and response speed. An isolation transformer is used to adjust the output voltage of inverter for stabilizing the grid-connection voltage. A simulation model is built and the simulation results show that the power quality of BESS is effectively improved by the proposed dual-filter structure and control strategy.

**Key words:** microgrid; electric batteries; energy storage; electric filters; PQ control; power quality