

## 基于 LC 串联型储能变换器的 状态反馈控制策略研究

王逸超<sup>1,2†</sup>, 欧名勇<sup>1,2</sup>, 陈仲伟<sup>1,2</sup>, 马伏军<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司 经济技术研究院, 湖南 长沙 410004;

2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;

3. 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**为了满足新能源电站的无功需求,提出了一种 LC 串联滤波型变换器.以三相 380 V/30 kW 并网变换器为例,相比传统的 L 和 LC 型滤波器结构,所提变换器结构能够在保持变换器输出无功功率能力的同时,降低系统直流工作电压约为原变换器的 71%,释放了系统 12% 的有源容量,同时效率相比原滤波结构有 6% 的提升.此外,基于 LC 变换器的离散状态模型,提出了一种基于 LC 串联滤波器型变换器的状态控制方法,有效地提升了 LC 串联滤波器在谐振频率处的系统阻尼.最后在 PSIM 中搭建了 LC 型变换器的仿真模型,验证了 LC 滤波型变换器的优势和状态反馈控制策略的可行性.

**关键词:**储能变换器;LC 串联滤波;状态反馈控制;PR 控制

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

## Study on State Feedback Control Strategy Based on LC Series Energy Storage Converter

WANG Yichao<sup>1,2†</sup>, OU Mingyong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhongwei<sup>1,2</sup>, MA Fujun<sup>3</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410004, China;

2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China;

3. National Research Center for Power Conversion and Control Engineering Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to meet the reactive power demand of new energy power stations, an LC series filter converter is proposed in this paper. Taking the three-phase 380 V / 30 kW grid converter as an example, compared with the traditional L and LC filter structure, the proposed converter structure can reduce about 71% of the original converter system DC voltage and release 12% of the active capacity while maintaining the converter output reactive power capacity. And the efficiency is improved by 6% when compared with the original filter structure. In addition, based on the discrete state model of LC converter, a state control method based on LC series filter type converter is proposed,

\* 收稿日期:2020-01-09

基金项目:湖南省自然科学基金青年项目(2019JJ50006),Hunan Provincial Natural Science Foundation of China(2019JJ50006);湖南省科技创新平台与人才计划项目(2019TP1053),Science-Technology Innovation Platform and Talents Program of Hunan Province, China(2019TP1053)

作者简介:王逸超(1988—),男,湖南双峰人,国网湖南省电力有限公司高级工程师

† 通信联系人, E-mail: 18361228606@163.com

which effectively improves the system damping of LC series filter at the resonant frequency. Finally, a simulation model of LC converter is established in PSIM to verify the advantages of LC filter converter and the feasibility of the state feedback control strategy.

**Key words:** energy storage converter; LC series filtering; state feedback control; PR control

随着国家大力倡导新能源的发展,越来越多的电力电子装置接入大电网.分布式发电的大量渗透,严重损害了配电网的电能质量,产生了一系列的负面影响.如:电流的剧烈变化引起的瞬变;发电机有功和无功功率变化引起的长时间电压变动;谐波频率范围扩大甚至产生谐振等<sup>[1-4]</sup>.

针对以上问题,文献[5]采用多台 APF 并联运行来抑制微网谐波问题.文献[6]提出了 APF、SVC 联合运行的方式完成系统的无功补偿和谐波治理,保证了分布式电源系统并网的可靠性.文献[7-8]则提出可以通过静止同步补偿器(STATCOM)动态地向电网注入感性或容性无功功率,快速抑制电压扰动,适用于风电场的无功补偿.文献[9-12]则指出微电网中可以通过微电源接口变流器的复合控制以及采用相应的控制策略实现微电网电能质量主动控制.针对大功率补偿,文献[13]研究一种级联型 SVG 的不平衡补偿控制策略,解决负序补偿时电压不平衡问题.

电池储能系统可以精准快速地参与电网功率调节,并且拥有功率密度大、地理限制因素少、功率交互迅速、运行损耗小等优点,可以应用于大电网的削峰填谷、新能源消纳、无功补偿、调压调频等多个场合.储能变换器装置是储能与大电网连接的重要组成部分,因此高效率、高可靠性的储能变换器装置将推进储能系统的广泛应用.

其中输出滤波器结构的选取影响着储能变换器的输出容量,从已有的文献可知,L型和LCL型滤波器应用最为广泛,LCL型滤波器减小了滤波器的体积<sup>[14-15]</sup>,但在控制系统中引入了谐振,增加了控制难度.为了提高储能变换器利用率,文献[16]提出了一种新型的LC串联型的输出滤波结构应用于PWM整流器;在电能质量补偿方面,相比传统L型滤波结构,提升了系统的有源容量.

综上所述,大容量的储能变换器研究一般从装

置的拓扑结构和控制方法入手.考虑到传统的L滤波式储能变换器只通过一个电感与电网连接,无法充分利用装置的有源容量,本文研究一种新型的LC串联滤波式储能变换器,这种LC串联滤波结构可以在保持变换器输出无功能力的同时,降低系统的工作电压,提高了系统的有源容量和效率.

## 1 LC 串联滤波型储能变换器工作原理

系统的结构示意图如图 1 所示.首先分析 LC 串联滤波型储能变换器的工作原理.

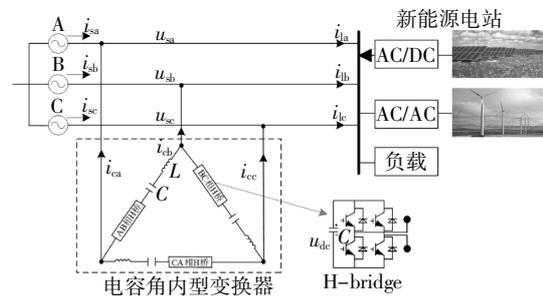


图 1 LC 串联滤波型储能变换器补偿示意图

Fig.1 LC series filter type energy storage converter compensation diagram

由于光伏、风电等新能源系统的输出功率具有随机性和波动性,且风力发电会向系统注入无功功率,导致系统无功和有功功率的波动,从而引起系统电压和频率的波动和变化.为此,这里将研究一种 LC 串联滤波型储能变换器,变换器的输出滤波器是一种电感和电容串联的结构,各相链节均经过这种 LC 串接式滤波装置与大电网相连.如图 1 所示,各相链节均为 H 桥结构,H 桥的直流侧可以连接储能电池来调节系统有功功率,从而实现系统频率调节;也可以不接电池,仅作为功率补偿器进行无功补偿用.由于滤波装置等价于在变换器的输出滤波支路上额外串接了一个电容 C,不仅滤波装置本身可为大电网提供一部分容性无功功率,而且与常规 L 型相比,

可使变换器的直流侧电压有效降低. 在大容量应用场合,可以减少变换器模块级联的数量,提升变换器的有源容量和运行效率.

图1中,  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  为三相电网电流;  $i_{la}, i_{lb}, i_{lc}$  为三相负载电流,  $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$  为变换器输出线电流,  $i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$  则为变换的输出相电流. 各相链节承受线电压, 各相之间相互独立, 建立图2所示单相等效电路分析 LC 型储能变换器的工作原理.

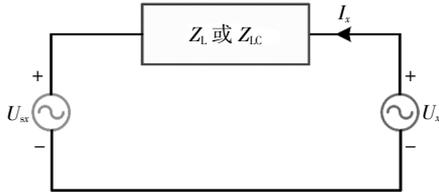
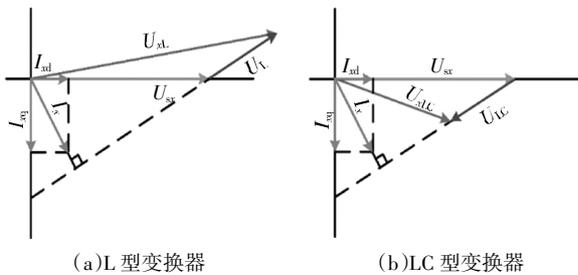


图2 LC 滤波变换器系统单相等效电路

Fig.2 LC filter converter system single-phase equivalent circuit

其中  $U_{sx}$  代表各链节电网电压矢量,  $U_x(x = ab, bc, ca)$  分别为变换器输出电压矢量,  $I_x$  为变换器的相电流矢量,  $Z_L$  为传统 L 型滤波器的阻抗,  $Z_{LC}$  则为 LC 型输出滤波器的阻抗. 图2所示的等效电路, 考虑变换器的输出有功和无功电流, 电网线电压与链节相电流的相位差并非  $\pi/2$ , 图3(a)为采用 L 型输出滤波装置的变换器的电压和电流矢量图, 图3(b)为采用 LC 串联型输出滤波装置的变换器的电压和电流矢量图.



(a)L型变换器 (b)LC型变换器

图3 变换器的工作矢量关系图

Fig.3 Vector operation diagram of inverter

由图3可得储能变换器输出电压表达式为:

$$\begin{cases} U_{xL} = \sqrt{U_{xLd}^2 + U_{xLq}^2} = \sqrt{(U_{sx} + Z_L I_{xd})^2 + (Z_L I_{xq})^2} \\ U_{xLC} = \sqrt{U_{xLCd}^2 + U_{xLCq}^2} = \sqrt{(U_{sx} + Z_{LC} I_{xd})^2 + (Z_{LC} I_{xq})^2} \end{cases} \quad (1)$$

且有滤波器阻抗为:

$$\begin{cases} Z_L = \omega L \\ Z_{LC} = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_{xd}$  为输出相电流的 d 轴分量,  $I_{xq}$  为输出相电流

的 q 轴分量; 参考式(1)可知, L 型滤波器的基频阻抗大于 0, 而优化参数后的 LC 型滤波器在基频处阻抗呈容性, 从向电网注入无功的角度考虑, 相当于阻抗小于 0. 当变换器应用于补偿容性无功时, 即  $I_{xq} < 0$ . 参考图3的矢量分析可知, L 型变换器的工作电压比 PCC 处电压高, 然而 LC 型变换器在参数优化的情况下工作电压可以比 PCC 处电压更低, 同时仍能保持类似于传统 L 型变换器的补偿能力. 因而, 对比 L 型滤波器, LC 型变换器的优点为具有更大有源容量、更低的直流侧电压. 更低的直流侧电压可以有效地降低开关管通断产生的能量损耗, 有利于实现变换器的高效运行.

## 2 LC 型变换器数学模型及状态反馈控制

LC 型变换器相比于 L 型滤波器, 虽在补偿容性无功方面具有一定优势, 但由于输出滤波装置部分引入了动态元件电容, 会导致系统的阶数以及控制的复杂度增加. 因此本文考虑首先针对 LC 型变换器的离散状态建立相关数学模型, 提出了一种基于 LC 串联滤波器型变换器的状态控制方法, 在传统的控制方法中引入了状态值的反馈环节. 通过状态信息并反馈控制, 有效地提升了 LC 串联滤波器在谐振频率处的系统阻尼, 进而提升了系统的控制性能. 基于所提 LC 型变换器的电路结构, 可得变换器的时域方程如下:

$$\begin{cases} di_x/dt = (u_x - u_{sx} - u_{cx})/L \\ du_{cx}/dt = i_x/C \\ du_{dx}/dt = \frac{u_x - i_x}{Cu_{dx}} \end{cases} \quad x \in \{ab, bc, ca\} \quad (3)$$

式中:  $u_{cx}$  代表 LC 滤波器中各链节的电容 C 的电压;  $u_{dx}$  表示链节各模块直流侧电压. 本文所述内容主要针对系统内部的电流内环控制, 选取的状态量分别为滤波电容电压和输出滤波电感电流, 变换器的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0], \mathbf{u} = [u_x \ u_{sx}]^T, \mathbf{x} = [i_x \ u_{cx}]^T, \mathbf{y} = i_x$$

将上式离散化得到离散状态方程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G} = e^{A T_s}, \mathbf{H} = \int_0^{T_s} e^{A\tau} d\tau \mathbf{B} \\ \mathbf{u} = [u_x(k) \ u_{sx}(k)]^T, \mathbf{x} = [i_x(k) \ u_{cx}(k)]^T, y = i_x(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $T_s$  表示变换器一个开关周期. 构建 LC 串联型变换器控制框图如图 4 所示, 其中的  $G_i(z)$  为控制器传递函数;  $H_i$  表示电流采样的反馈系数;  $K_{\text{PWM}}$  表示 PWM 环节的增益.

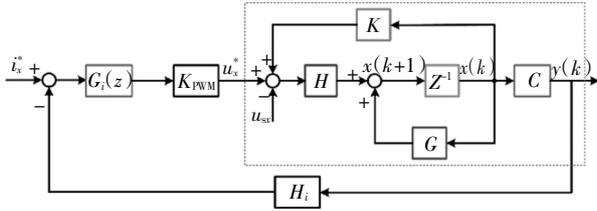


图 4 LC 型变换器的整体控制框图  
Fig.4 Control block diagram of LC-inverter

由于输出滤波装置存在两个动态元件 L 和 C, 系统等效一个二阶环节, 系统存在固有谐振频率. 当系统工作于谐振频率时, 阻抗很小, 稳定性降低不利于控制器的控制<sup>[17]</sup>. 电网电压  $u_{sx}$  为控制系统的输入扰动, 变换器输出指令信号  $u_x^*$ , 变换器电流  $i_x$  分别为控制系统的输入和输出, 根据系统的状态方程, 系统滤波环节的输入输出关系如下:

$$G_{\text{LC}}(z) = \frac{i_x(z)}{u_x^*(z)} = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1}\mathbf{H} \quad (8)$$

选取一组参数(包括 L, C 参数等)代入式(8), 绘制 LC 滤波环节开环传递函数的幅频特性曲线, 观察幅频特性曲线可知, 系统在频率 290 Hz 处发生谐振, 而在基频段的开环增益较小. 为了应对该问题, 可增加状态反馈控制环节以增大系统谐振频率处阻尼<sup>[18-19]</sup>, 另外利用状态反馈矩阵可以将状态变量反馈引入至输入环节, 并叠加输入变量后所引入的状态反馈矩阵为  $K = [k_1, k_2]$ . 图 4 所示为加入状态反馈控制方法后的系统控制框图. 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{G} + \mathbf{H}\mathbf{K})\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (9)$$

其中, 图 4 虚线方框部分的传递函数可表示为:

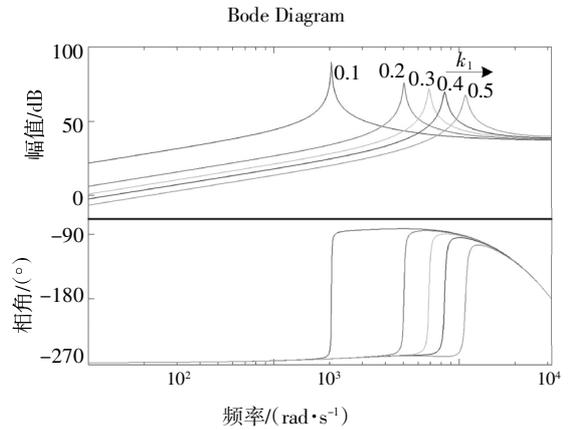
$$G_{\text{LCK}}(z) = \frac{i_x(z)}{u_x^*(z)} = \mathbf{C}[z\mathbf{I} - (\mathbf{G} + \mathbf{H}\mathbf{K})]^{-1}\mathbf{H}_i \quad (10)$$

同时, 考虑加入电流 PR 控制器后, 整体系统的开环传递函数为:

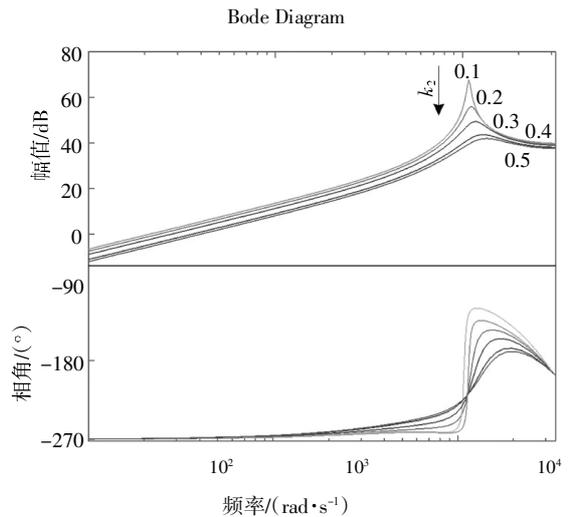
$$G_{\text{open}}(z) = K_{\text{PWM}} G_{\text{PR}}(z) G_{\text{LCK}}(z) \quad (11)$$

式中:  $G_{\text{PR}}(z)$  代表电流 PR 控制器的  $z$  变换函数. 前文所述的状态反馈控制, 选取的状态量为输出滤波器的电容电压  $u_c$  和电感电流  $i$ .

通过系统状态方程, 加入电流 PR 控制器及状态反馈控制后, 系统开环传递函数的幅频特性曲线如图 5 所示, 需要注意 PR 控制器的参数  $k_p = 2, k_r = 500$ , 通过改变状态反馈矩阵  $[k_1, k_2]$  的参数来观察系统开环特性. 图 5(a) 所示为  $k_1$  从 0.1 渐变至 0.5 时  $G_{\text{open}}(z)$  的幅频特性, 由系统开环增益的变化情况可知, 增大状态反馈矩阵中的  $k_1$  可以有效增大 LC 串联变换器的谐振频率, 但系统在基频处的控制效果不佳, 较小的  $k_1$  值的基频特性较好, 但谐振处阻尼较小. 图 5(b) 所示为  $k_2$  从 0.2 渐变至 0.5 时  $G_{\text{open}}(z)$  的幅频特性, 由系统开环增益的变化情况可知, 增大状



(a)  $k_1$  逐渐增大时开环传递函数的幅频特性曲线



(b)  $k_2$  逐渐增大时开环传递函数的幅频特性曲线

图 5 开环传递函数随  $k_1, k_2$  变化幅频特性曲线

Fig.5 Amplitude-frequency characteristic curve of open loop function

态反馈矩阵中的  $k_2$  可以有效增大 LC 串联变换器系统的阻尼,但系统的相角裕度降低. 可以通过调整  $k_1$  的取值确定系统合适的谐振频率,并通过增大  $k_2$  降低系统在谐振频率处的阻尼.

LC 型储能变换器的整体控制框图如图 6 所示. 图 6 提供了两种典型的工作模式,一种负载补偿工作模式,通过检测负载电流,用 LC 型储能变换器来输出补偿相应的无功和谐波电流. 第二种模式是 PQ 运行控制模式,这里 LC 型储能变换器接受上层监控系统发过来的 PQ 指令进行有功和无功调节,来维持母线电压幅值和频率的稳定. 两种模式为基于状态反馈控制的电流控制器提供电流指令信号.

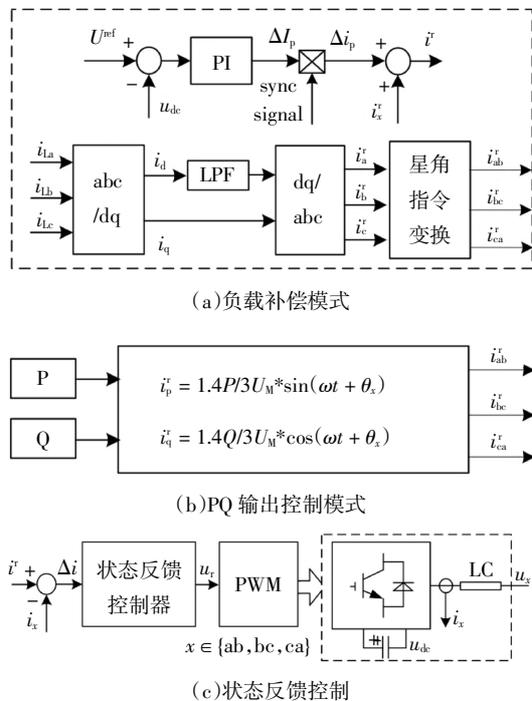


图 6 LC 串联型变换器的整体控制框图

Fig.6 Overall control block diagram of LC-inverter

### 3 仿真实验

为了验证本文所提出的一种适应于新能源电站的 LC 串联滤波型变换器及状态反馈控制策略的正确性. 搭建了 380 V 电压等级 LC 串联型变换器的仿真模型. 这里考虑将 LC 型储能变换器作为无功功率补偿器用,采用电阻和电感模拟负载;直流侧电压采用 PI 控制,电流内环采用状态反馈控制,验证 LC 型储能的动态补偿性能. 各个元件及相关项目参数如下.

表 1 LC 串联变换器系统仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters of LC series converter system

仿真项目	系统参数
电网线电压/kV	0.38
直流侧电容 C/F	0.005
滤波电抗 L/H	0.0005
滤波电容 C/F	0.01
直流侧电压 $U_{ref}/V$	0.55
开关频率 $f_s/kHz$	10

设定 0.3 s 时变换器开始补偿负载中的无功电流,仿真结果如图 7 所示. 图 7(a)(b)分别表示的是 LC 串联型变换器投入前后电网的电压电流波形.对比之下可知,投入变换器前电网电流中的无功含量相对较高,补偿之后电网电流中的无功分量大大减少,功率因数将达到 0.99. 图 7(c)(d)分别表示 LC 串联型变换器输出电流波形和直流侧电压波形,输出电流 THD 仅为 3.3%,系统参与电网无功补偿时,各模块电容电压依然保持均衡,直流侧电压稳定在 0.55 kV 左右. 图 7(e)所示为 AB 链节输出电流实际值和指令值,从仿真图可知在预设状态的反馈控制下,系统可以实现无差的电流跟踪.

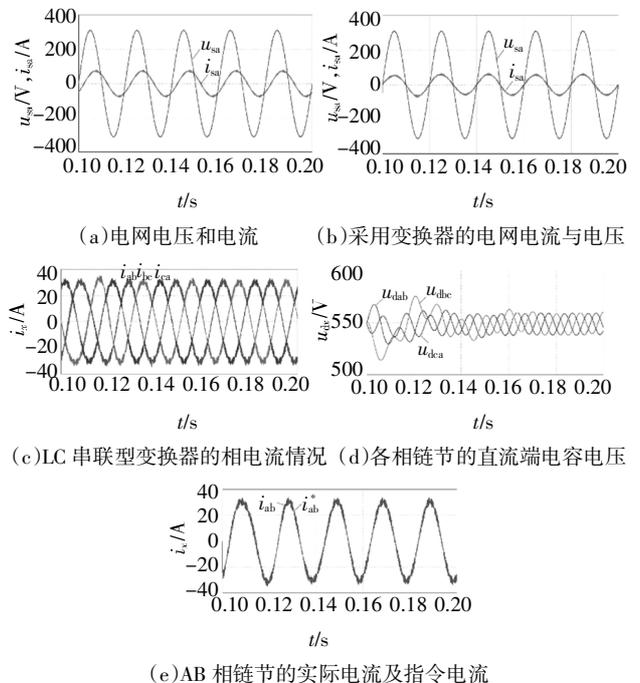


图 7 LC 型储能变换器的静态补偿仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of LC-inverter

接下来,在 0.6 s 时设置使得无功电流指令值幅值增加至原来的两倍,指令幅值跳变后得到的指令

变化及实际电流变化如图 8(a)所示.由图可知在状态反馈控制方案下,输出实际电流能够很好地跟踪指令电流的变化,动态响应较快.图 8(b)分别为三相链节调制波波形,在 LC 型变换器补偿感性无功的情况下,随着补偿电流的增大输出电压会减小,调制度也随之降低.因此 LC 型变换器可在较低的直流侧电压水平下运行并提供大容量容性无功,以达到较低开关损耗和较高运行效率的效果.系统无功功率与输出滤波器阻抗匹配时,输出滤波电容可以提供补偿的无功功率,PWM 调制模式下链节直流侧电压二倍频波动相对较小,调制度也相对较小,链节直流侧电压二倍频波动也很小,如图 8(d)所示.

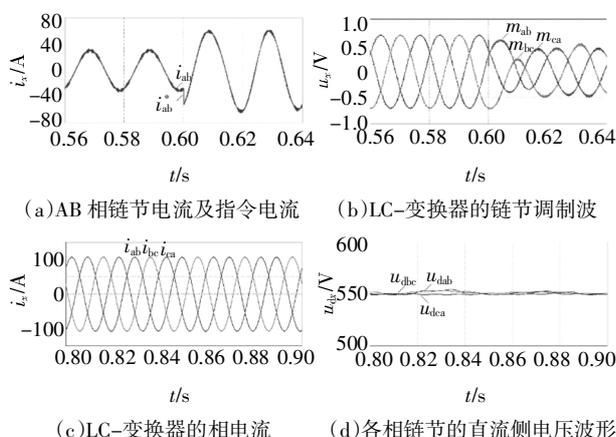


图 8 LC 型储能变换器的动态补偿仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms of LC-Inverter

从系统仿真可以看出,系统能够迅速响应无功指令,同时系统的直流侧电压 550 V 小于 L 型滤波器直流侧 700 V,输出可以提高系统输出能力约 12%,且在输出同等无功下,有效地降低了系统损耗约 6%.

## 4 小 结

为了满足新能源电站的功率补偿需求,本文提出了 LC 串联滤波式储能变换器.该变换器采用电感和电容串联的结构作为输出滤波装置,在一定的无功需求内,其输出电压将随补偿无功电流的增大而减小,可以有效地降低直流侧的电压值.相比传统 L 型变换器,其在有源容量、容性无功补偿容量、运行效率等方面具有优势.为抑制 LC 串联结构中 LC 动态元件耦合产生的谐振,本文还设计了适用于 LC 串联型变换器的状态反馈控制方法.最后经过软件仿真,验证了本文所述的 LC 串联型变换器及其控制策

略的正确性和优越性.

## 参考文献

- [1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10—14.  
WANG C S,LI P. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10—14.(In Chinese)
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56—60.  
WANG Z Q,ZHU S Z,ZHOU S X,et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56—60.(In Chinese)
- [3] 罗安.电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M].北京:中国电力出版社,2006:88—93  
LUO A. Power grid harmonic control and reactive power compensation technology and equipment [M]. Beijing:China Electric Press,2006:88—93.(In Chinese)
- [4] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等.含分布式发电系统的微网技术研究综述[J].电网技术,2009,33(9):14—18.  
HUANG W,SUN C H,WU Z P,et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system [J]. Power System Technology,2009,33(9):14—18.(In Chinese)
- [5] 彭佳凤.基于多台 APF 并联的微网谐波抑制方法研究[D].长沙:湖南大学,2013.  
PENG J F. The harmonic suppression of microgrid based on the parallel operation of multiple APF [D]. Changsha:Hunan University,2013.(In Chinese)
- [6] 吴艳娟.采用 APF 和 SVC 改善微网电能质量[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(1):147—150.  
WU Y J. Combined system of APF and SVC for power quality improvement in microgrid[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation,2012,24(1):147—150.(In Chinese)
- [7] 李超.基于 STATCOM 改善风电场电压稳定性的若干问题研究[D].天津:天津大学,2013.  
LI C. Research on problems of STATCOM to improve voltage stability of wind farms [D]. Tianjin:Tianjin University,2013.(In Chinese)
- [8] MOHARANA A,VARMA R K,SEETHAPATHY R. SSR alleviation by STATCOM in induction-generator-based wind farm connected to series compensated Line[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2014,5(3):947—957.
- [9] 李彦林.微电网电能质量主动控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:66—68.  
LI Y L. Research on power quality active control strategy of micro-grid [D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2014:66—68.(In

- Chinese)
- [10] 张国荣,张铁良,丁明,等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真[J]. 中国电机工程学报,2007,27(14):82—86.  
ZHANG G R,ZHANG T L,DING M,*et al.* Simulation research on unified power quality conditioner with PV grid connected generation [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(14):82—86. (In Chinese)
- [11] 姚勇,朱桂萍,刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报,2012,27(1):85—89.  
YAO Y,ZHU G P,LIU X C. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):85—89. (In Chinese)
- [12] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术,2006,30(15):54—58.  
ZHANG B H,ZENG J,MAO C X,*et al.* Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system [J]. Power System Technology,2006,30(15):54—58. (In Chinese)
- [13] LUO R,HE Y J,LIU J J. Research on the unbalanced compensation of delta-connected cascaded H-bridge multilevel SVG [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(11):8667—8676.
- [14] 李旷,刘进军,赵国鹏,等. L型滤波器对变换器系统特性的影响及其设计方法研究[C]//中国电工技术学会电力电子学会学术年会. 2006.  
LI K,LIU J J,ZHAO G P,*et al.* Study on the influence of L-type filter on the characteristics of SVG system and its design method [C]// Academic Annual Meeting of Institute of Power Electronics,China Electrotechnical Society. 2006. (In Chinese)
- [15] NISHIDA K,AHMED T,NAKAOKA M. A novel finite-time settling control algorithm designed for grid-connected three-phase inverter with an LCL-type filter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(3):2005—2020.
- [16] 马伏军,易伟浪,梅成成,等. LC串联式脉宽调制整流器及其电流迭代控制方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):179—187.  
MA F J,YI W L,MEI C C,*et al.* Pulse-width modulation rectifier with LC-series filter and its current iterative control method [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):179—187. (In Chinese)
- [17] AKAGI H,KONDO R. A transformerless hybrid active filter using a three-level pulsewidth modulation (PWM) converter for a medium-voltage motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(6):1365—1374.
- [18] 何志兴. 级联多电平静止同步补偿器关键技术及应用研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.  
HE Z X. Research on the key technologies and application of cascaded multilevel static synchronous compensator [D]. Changsha: Hunan University,2016. (In Chinese)
- [19] 夏超英. 交直流传动系统的自适应控制[M]. 北京:机械工业出版社,2007:30—35.  
XIA C Y. Adaptive control of AC/DC transmission system [M]. Beijing:China Machine Press,2007:30—35. (In Chinese)