基于模糊控制的储能型准Z源变流器

毛人杰，李媛，方番
（四川大学 电气信息学院，四川 成都 610065）

摘要：提出一种应用于储能型准Z源变流器的模糊控制算法。近年来，模糊控制因其适应性和强鲁棒性得到广泛应用。这种控制方法与传统PI控制方法的最大不同之处在于模糊控制不需要建立精确的数学模型。将模糊控制应用于储能型准Z源变流器中，对电池充放电电流进行控制，实现了能量的双向流动。与传统的PI控制方法相比，模糊控制能有效地减小电容电压纹波，减小电网电流谐波总畸变率和减小电池充放电电流的脉动。仿真结果验证了所提出控制方法的有效性。

关键词：储能型准Z源变流器；模糊控制；数学模型
中图分类号：TM46 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd18773

Energy-storaged Quasi Z-source Converter Based on Fuzzy Control

MAO Renjie，LI Yuan，FANG Fan
（*School of Electrical Engineering and Information，Sichuan University，Chengdu* 610065，*Sichuan，China*）

Abstract: A fuzzy control method applied to a energy-storaged quasi Z-source converter was presented. In recent years，fuzzy control is increasingly ubiquitous owing to its adaptiveness and strong robustness. The difference between this control method and PI control lies in that fuzzy control doesn't depends on the accurate mathematical model. Fuzzy control was applied to energy-storaged quasi Z-source converter to control battery charging/discharging current，the bidirectional flow of energy was achieved. Compared to PI control，fuzzy control could reduce the ripple of capacitor voltage，the total harmonic distortion（THD）of grid current and the pulsation of battery charging/discharging current. The simulation results validate the effectiveness of the control method proposed.

Key words: energy-storaged quasi Z-source converter（QZSG）；fuzzy control；mathematical model

自Z源变流器（ZSC）与准Z源变流器（QZSC）被提出以来[1]，已获得广泛关注和大量研究。与传统的电力电子逆变器相比，ZSC/QZSC具有以下优点：1）能够实现单级升降压；2）无需死区时间，能够消除传统逆变器死区时间带来的输出畸变；3）直通状态下，同桥臂的开关管能同时导通，增加了逆变器的抗干扰能力；4）开关数量少，因此降低了系统的成本、并提高了系统的整体效率。ZSC/QZSC利用直通状态来实现升压的目的，在光伏发电、风力发电等领域得到了广泛地应用[2-4]。

进一步地，为了改善输出功率波动性以及能更好地实施输出功率控制，构建电网友好型新能源并网系统，在ZSC/QZSC中加入储能电池并进行系统级能量管理和功率控制成为重要发展趋势。如图1所示，文献[5]在直流链电容C_2处加入蓄电池组，提出相应控制策略，实现了灵活的电池管理和输出功率控制。但此拓扑在电池放电过程中存在不连续导通模式，限制了电池放电功率继而限制逆变器输出功率。文献[6]提出在直流链电容C_1处加入蓄电池组，相比于前者，此拓扑具有更宽的电池放电功率范围。针对光伏电池和蓄电池2个功率控制对象提出了2种控制策略。但基于PI控制的蓄电池电流控制方案存在有电流控制不稳定及动态特性差等局限。综合来看，加入储能环节后的ZSC/QZSC主要需实现以下几个控制目标：1）升压控制，令ZSC/QZSC满足系统输入与输出电压增益要求，并在输入电压较大范围变动情况下维持稳定的输出电压；2）实现并网电流波形控制，令并网变流器输出电流

基金项目：国家自然科学基金项目（51407122）
作者简介：毛人杰（1991-），男，硕士研究生，Email：winsonmao@163.com

满足并网要求，无直流分量，总谐波畸变率THD低于5%；3）系统级能量管理：光伏发电功率，并网功率以及蓄电池组充放电功率的协调控制；根据多种任务要求，可令并网变流器可实现光伏最大功率点跟踪（MPPT），蓄电池组荷电状态（SOC）管控，虚拟同步机并网控制等等。而上述各种控制目标的达成，均依赖于良好的控制策略设计以及控制器实现。

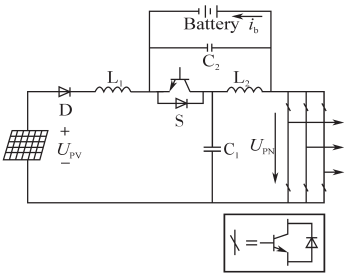


图1　储能型准Z源逆变器

Fig.1　Energy-storaged quasi Z-source inverter

已有大量文献研究基于经典控制理论的ZSC/QZSC的控制方法[7-8]。经典控制理论的应用必须以系统线性化建模为基础，通常采用小信号建模方法实现[7]。另外，基于反馈线性化的建模方法也受到一定关注[9]。而由于ZSC/QZSC属于高度非线性系统，基于现代非线性控制理论的控制方法研究同样受到相当地重视。近年来，模糊控制在ZSC/QZSC中逐渐得到研究与应用[10]。文献[10]采用模糊控制的方法对基于Z源逆变光伏系统实现最大功率点跟踪控制，并且采用模糊控制比扰动观测法速度更快、效率更高。此外，模糊控制还用于Z源逆变器直流链电压的控制[11-12]。模糊控制器的非线性特性使得系统的瞬态性能得到明显改善，提高了直流链电压的质量。模糊控制不需要建立系统的数学模型，设计过程简单，在炼钢、化工、家用电器、人文社科、经济系统以及医学心理等领域已获得成功应用。

本文研究储能型准Z源变流器的模糊控制策略及实现方法。如图2所示，采用蓄电池组接在变流器输入端，为实现功率双向流动，将准Z源阻抗网络中的二极管替换为双向功率开关Q。采用该结构的准Z源变流器可作为独立模块串联到基于准Z源模块的级联多电平光伏并网系统中。因此，对单个含储能的准Z源变流器模块的良好控制是实现准Z源级联多电平逆变器并网的关键技术。首先分析了储能型准Z源变流器的工作原理，然后基于模糊控制理论设计控制策略，最后通过仿真实现了储能型准Z源变流器的控制目标。文中将结果与传统基于PI控制的结果进行了对比分析，显示出采用模糊控制策略的储能型准Z源变流器具有良好的静/动态跟踪效果和鲁棒性。

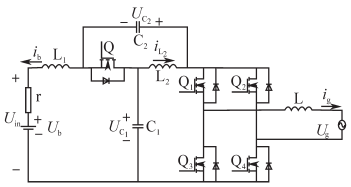


图2　储能型准Z源变流器电路结构

Fig.2　The circuit structure of the energy-storaged quasi Z-source converter

1　电路结构及其工作原理

本文所采用的储能型准Z源变流器电器结构如图2所示。与传统的准Z源逆变器（QZSI）相比，该结构用MOSFET代替阻抗源网络中的二极管，保证了QZSI中能量的双向流动。其直流侧经QZSI与储能电池相连，逆变侧与电网相连。电路中元件符号及各电压、电流的参考方向如图2所示。储能电池有2种运行状态：1）当储能电池处于充电模式时，电流i_b为正，电网电压u_g与网侧电流i_g反相位，电路处于整流状态，电网向储能电池供电；2）当储能电池处于放电模式时，电流i_b为负，电网电压u_g与网侧电流i_g同相位，电路处于逆变状态，直流侧能量回馈回电网。通过控制储能电池的充放电电流，可实现电路2种工作模式的任意切换。

与传统的QZSI类似，本文所采用的储能型准Z源变流器也分为非直通状态和直通状态。

1.1　非直通状态

图3为储能型准Z源变流器在非直通状态下的等效电路图。在非直通状态下，Q导通。

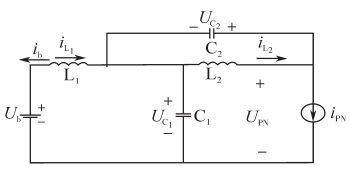


图3　非直通状态下的等效电路

Fig.3　Equivalent circuit diagram in non-shoot-through state

在非直通状态下，有：

$$L_1 \mathrm{d}i_{L_1}/\mathrm{d}t = U_b - U_{C_1} \quad (1)$$

$$L_2 \mathrm{d}i_{L_2}/\mathrm{d}t = -U_{C_2} \quad (2)$$

$$C_1 \mathrm{d}U_{C_1}/\mathrm{d}t = i_{L_1} - i_{PN} \quad (3)$$

$$C_2\mathrm{d}U_{C_2}/\mathrm{d}t=i_{L_2}-i_{PN} \quad (4)$$

$$i_b=-i_{L_1} \quad (5)$$

1.2 直通状态

图4为储能型准Z源变流器在直通状态下的等效电路图。在直通状态下，Q关断。

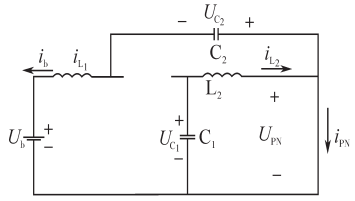


图4　直通状态下的等效电路

Fig.4　Equivalent circuit diagram in shoot-through state

在直通状态下，有

$$L_1\mathrm{d}i_{L_1}/\mathrm{d}t=U_b+U_{C_2} \quad (6)$$

$$L_2\mathrm{d}i_{L_2}/\mathrm{d}t=U_{C_1} \quad (7)$$

$$C_1\mathrm{d}U_{C_1}/\mathrm{d}t=-i_{L_2} \quad (8)$$

$$C_2\mathrm{d}U_{C_2}/\mathrm{d}t=-i_{L_1} \quad (9)$$

$$i_b=-i_{L_1} \quad (10)$$

2 控制策略

单相储能型QZSI控制系统框图如图5所示。从图5中可以看出，这是一个双闭环控制系统。内环是电压控制环，其目的是保持电容C_1两端的电压恒定。其控制原理如下：电容C_1的参考电压$U_{C_{1\text{-ref}}}$与实际电压U_{C_1}作差后，经PI控制器输出为电网电流幅值的参考值I_g^*，再通过电网电压u_g所得的相位θ得到电网电流的参考值$i_g^*=I_g^*\sin\theta$，经P控制器后与电网电压前馈得到调制波$m\sin\theta$，其中，m为调制比。外环为电流控制环，其目的是控制电池的充放电电流。其控制原理如下：将电池电流的参考值$I_{b\text{-ref}}$与实际值I_b作差后，经模糊控制器后输出直通信号d_0^*，再与三角波相比得到直通脉冲。当电池处于充电状态时，电流I_b为正；当电池处于放电时，电流I_b为负。通过所得的PMW波和直通脉冲波得到开关管Q_1，Q_2，Q_3和Q_4的驱动脉冲。在非直通状态下，开关管Q导通。

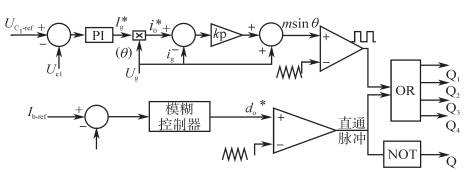


图5　单相储能型准Z源变流器控制系统框图

Fig.5　System block diagram of energy-storaged single-phase quasi-Z-source converter

本文所提出的控制方法可实现3个控制目标：1）控制电池充放电电流的大小，实现无静差跟踪控制；2）控制电容C_1电压U_{C_1}的大小，保持直流链电压的稳定；3）控制并网电流实现单位功率因数控制。

3 模糊控制器的设计

3.1 模糊控制器的基本原理

模糊控制是基于丰富操作经验总结出来的，或是由大量数据归纳总结出来的控制规则，再用自然语言表述的控制策略。它与传统控制的最大不同，在于不需要知道控制对象的数学模型，而需要积累对设备进行控制的操作经验和数据。模糊控制设计简单、鲁棒性强。模糊控制器的原理框图如图6所示。左边输入清晰值变量e及其变化率$ec=\mathrm{d}e/\mathrm{d}t$，右边输出精确值$u$。

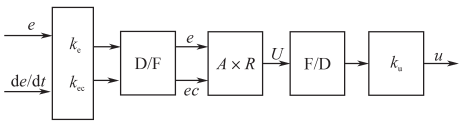


图6　模糊控制器原理框图

Fig.6　Schematic diagram of fuzzy controller

图6中，k_e和k_{ec}构成“量化因子”模块；k_u为“比例因子”模块。这2个模块对模糊控制器输入、输出的清晰值信号具有比例缩放的作用，是模糊控制器的输入和输出接口，它们除了使其前后模块匹配外，还有改善模糊控制器某些性能作用。D/F为模糊化模块，它能完成清晰量转换成模糊量的运算；$A\times R$是模糊推理模块，它通过模糊控制规则计算出模糊控制量U。F/D为清晰化（或反模糊化）模块，将模糊控制量U转换成清晰量。

3.2 模糊语言变量及其隶属函数的确定

将电池电流偏差量$e=i_b^*-i_b$及其变化率$\mathrm{d}e/\mathrm{d}t$作为模糊控制器的输入语言变量，直通占空比D为输出语言变量。其模糊子集划分为：负大（***NB***），负中（***NM***），负小（***NS***），零（***Z***），正小（***PS***），正中（***PM***），正大（***PB***）7个模糊子集。其隶属度函数如图7所示。

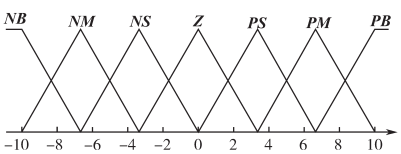


图7　输入变量和输出变量的隶属度函数

Fig.7　Membership function of the input variable and output variable

3.3　模糊控制规则的制定

模糊控制规则是模糊控制器的核心，它相当于传统控制系统中的校正装置或补偿器（如工业中经常使用的PID控制器），是设计控制系统的主要内容。本文中模糊规则可由以下语句表示：

Rule1：If e is ***NB*** and ec is ***NB***, then u is ***PB***；

Rule2：If e is ***NB*** and ec is ***NM***, then u is ***PB***；

Rule3：If e is ***NB*** and ec is ***NS***, then u is ***PB***；

⋮

Rule49：If e is ***PB*** and ec is ***PB***, then u is ***NB***；

根据准Z源的升压原理：

$$U_{C_1}=(1-D)U_{in}/(1-2D) \tag{11}$$

$$U_{C_1}=[(0.5+0.5/(1-2D)]\cdot(U_b+ri_b) \tag{12}$$

式中：U_{in}为直流侧输入电压；r为电池内阻；D为直通占空比。当e>0时，由于在稳态时U_{C_1}可以认为是恒定值。所以，要想降低i_b，由式（12）可知需增大D；反之，当e<0时，要想增大i_b，需减小D。由此制定出模糊控制规则表，如表1所示。

表1　模糊控制规则表

Tab.1　Rules table for fuzzy logic controller

de/dt	e						
	NB	***NM***	***NS***	***Z***	***PS***	***PM***	***PB***
NB	***PB***	***PB***	***PM***	***PS***	***Z***	***NS***	***NS***
NM	***PB***	***PB***	***PM***	***PS***	***Z***	***NS***	***NM***
NS	***PB***	***PM***	***PS***	***Z***	***NS***	***NS***	***NM***
Z	***PM***	***PM***	***PS***	***Z***	***NS***	***NM***	***NM***
PS	***PM***	***PS***	***PS***	***Z***	***NS***	***NM***	***NB***
PM	***PM***	***PS***	***Z***	***NS***	***NM***	***NB***	***NB***
PB	***PS***	***PS***	***Z***	***NS***	***NM***	***NB***	***NB***

3.4　模糊控制的清晰化

模糊推理的结果是一个模糊集合。我们必须通过清晰化的方法将模糊推理的结果转换成一个清晰的数值，这样才能达到控制的目的。模糊集合的清晰化在模糊控制中几乎是不可或缺的。

清晰化的方法有很多种，其中面积中心（重心）法（centroid）受到了广泛的应用。面积中心法就是求出模糊集合隶属函数曲线和横坐标包围区域面积的中心，选这个中心对应的横坐标作为模糊集合的代表值：

$$u^*=\int_U A(u)u\mathrm{d}u/\int_U A(u)\mathrm{d}u \tag{13}$$

式中：u^*为面积中心所对应的横坐标；$A(u)$为模糊集合的隶属函数。经面积中心法计算后，输出变量的曲面如图8所示。

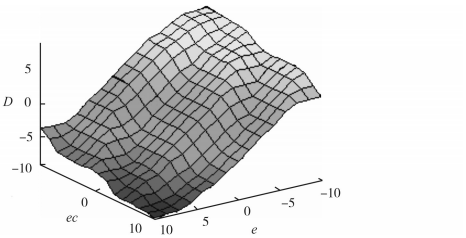


图8　模糊推理输出变量的曲面

Fig.8　Simulated surface viewer of output variable

4　仿真分析

为验证理论分析的正确性以及所提出模糊控制器的有效性和可实施性，在Matlab平台对本文所提的模糊控制系统进行仿真研究，并与传统的PI控制进行比较，PI控制采用如图9所示的控制电路，比例系数k_p=1，积分系数k_i=1 000。

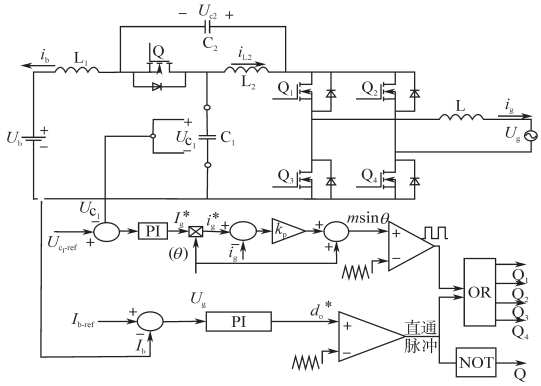


图9　基于PI控制器单相储能型准Z源变流器系统框图

Fig.9　System structure diagram of energy-storaged single-phase quasi-Z-source converter based on PI control

仿真时间为3 s，共分为2个阶段：1）0～2 s时，i_b^*=40 A，即电池处于充电状态，充电电流为40 A；2）2～3 s时，i_b^*=−40 A，即电池处于放电状态，放电电流为40 A。具体仿真参数为：开关频率f_0=10 kHz，电网电压幅值U_g=500 V，电池电压U_b=600 V，电感L_1=3 mH，电感L_2=1.8 mH，电容C_1=40 mF，电容C_2=40 mF。

当充电电流参考值从40 A跳变到−40 A时，在模糊控制下系统的仿真波形如图10所示，在PI控制下系统的仿真波形如图11所示。因为能量的流向发生改变，所以系统到达稳态的时间有所增加。但是模糊控制依然保持了上述优点，实现了系统级能量方向的控制。此外，从仿真图可以看出，当电流方向发生改变时，在PI控制下的系统实际放电电流有一个较大的超调量。与之相比，模糊控制下系统的放电电流经过一个平稳的调节过程到达稳态。从并网电流i_g的波形可以看出，系统在模糊控制下能更快的到达稳态。

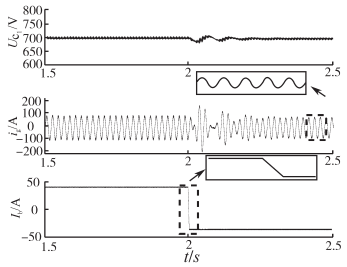


图10　在模糊控制下i_b^*从40 A跳变到−40 A时电路的仿真波形

Fig.10　Simulation results when i_b^* changed from 40 A to −40 A based on fuzzy control

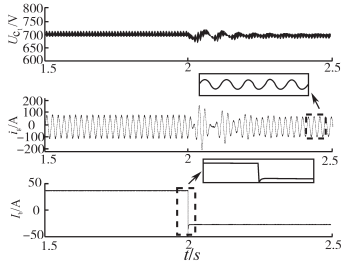


图11　在PI控制下i_b^*从40A跳变到−40 A时电路的仿真波形

Fig.11　Simulation results when i_b^* changed from 40 A to −40 A based on PI control

图12为系统稳态时电网电流谐波分析图。从图12可以看出，模糊控制、PID控制时的电网电流谐波总畸变率THD分别为3.14%和4.72%，皆满足低于5%的控制目标，与PI控制相比，模糊控制的电网电流谐波总畸变率更低。

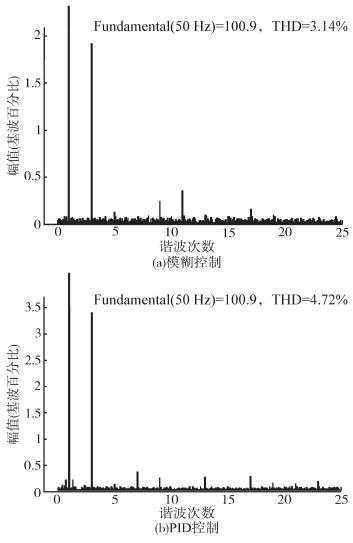


图12　稳态时电网电流谐波分析

Fig.12　Harmonic analysis of grid current in steady state

5　结论

本文研究了一种基于模糊控制的储能型准Z源变流器，并对其工作原理进行了深入分析。与传统的PID控制方法相比，模糊控制的优势具体体现在以下4个方面：1）电容电压波动小，直流侧电压更加稳定；2）稳态时，电网电流谐波总畸变率更低；3）电池充放电电流变化时，过渡过程平稳，稳态时充放电电流波动较小；4）不需要建立系统的数学模型，设计过程简单。仿真结果验证了所提出方法的有效性。

参考文献

[1] Peng F Z. Z-source Inverter[J]. IEEE Trans.on Industry Applications，2003，39(2)：504−510.

[2] Badin R，Huang Y，Peng F Z，*et al.* Grid Interconnected Z-source PV System [C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference，Orlando，USA，2007：2328−2333.

[3] Li Y，Anderson J，Peng F Z，*et al.* Quasi-Z-source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems[C]//Twenty-fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition，Washington DC，2009：918−924.

[4] Supatti U，Peng F Z. Z-source Inverter with Grid Connected for Wind Power System[C]//Energy Conversion Congress and Exposition，San Jose，USA，2010：398−403.

[5] Sun D，Ge B，Peng F Z，*et al.* Power Flow Control for Quasi-Z-source Inverter with Battery Based PV Power Generation System[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition，Phoenix，AZ，2011：1051−1056.

[6] Ge B，Abu-Rub H，Peng F Z，*et al.* An Energy-stored Quasi-Z-source Inverter for Application to Photovoltaic Power System [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic，2013，60(10)：4468−4481.

[7] Li Yuan，Jiang Shuai，Cintron-Rivera Jorge G，*et al.* Modeling and Control of Quasi-Z-source Inverter for Distributed Generation Applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2013，60(4)：1532−1541.

[8] Shi Yanjun，Kayiranga Thierry，Li Yuan，*et al.* Exploring the LCL Characteristics in GaN-based Single-L Quasi-Z-source Grid-tied Inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2017，64(10)：7758−7768.

[9] Gong H，Li Y，Wang Y，*et al.* Input-output Feedback Linearization Based Control for Quasi-Z-source Inverter in Photovoltaic Application[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)，Milwaukee，WI，2016：1−6.

[10] 庞玮，高心，邵仕泉. 基于Z源逆变的光伏系统MPPT模糊控制研究[J]. 可再生能源，2013，31(10)：30−33.

[11] 丁新平，钱照明，崔彬，等. 基于模糊PID的Z源逆变器直流链升压电路控制[J]. 中国电机工程学报，2008，28(24)：31−38.

[12] Ding Xinping，Qian Zhaoming，Yang Shuitao. A Direct DC-link Boost Voltage PID-like Fuzzy Control Strategy in Z-source Inverter[C]//Power Electronics Specialits Conference，Rhodes，Greece，2008：405−411.

收稿日期：2018−02−06
修改稿日期：2018−04−11