

U-Cell 拓扑并网逆变器的 MPC 策略

杨青峰

(山东工业职业学院 电气工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:针对七电平 U-Cell 拓扑并网逆变器的优化控制问题, 设计了模型预测控制(MPC)策略。不同于传统并网逆变器系统, 新型基于 U-Cell 拓扑的并网逆变器具有一个独立直流源和一组电容作为辅助直流回路, 故能实现多目标控制的 MPC 方案应用于此具有明显优势, 其通过对辅助电容电压的控制可实现七电平电压输出, 同时控制逆变器在并网点提供所需的有功和无功功率, 并保证电能质量。利用 U-Cell 拓扑逆变器样机进行了相关实验, 实验结果表明, 在直流电压、功率变化和功率因数变化下, 系统均具有快速且准确的动态响应。

关键词:并网逆变器; 多电平; 模型预测控制; 电能质量

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21127

Model Predictive Control Strategy for the U-Cell Topology Grid-connected Inverter

YANG Qingfeng

(School of Electrical Engineering, Shandong Vocational College of Industry, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: A model predictive control (MPC) strategy was designed for the optimal control of a seven-level U-Cell topology grid-connected inverter. Unlike traditional grid-connected inverter system, the new U-Cell topology-based grid-connected inverter has an independent DC source and a set of capacitors as auxiliary DC loop. Therefore, the MPC scheme capable of achieving multi-target control has obvious advantages, and the seven-level voltage output can be realized by controlling the auxiliary capacitor voltage, and the inverter is controlled to provide the required active and reactive power in accordance with the power quality requirements at the grid connection point. The experiments were carried out with U-Cell topology inverter prototype. The experimental results show that the system has fast and accurate dynamic response under DC voltage, power variation and power factor variation.

Key words: grid-connected inverter; multilevel; model predictive control(MPC); power quality

随着全球电能消耗量的逐年攀升, 以及诸如化石燃料等常规能源的逐步枯竭及其污染问题的日趋严重, 光伏、风电、潮汐能、生物能和地热等新能源的利用急需开发^[1-3]。光伏系统可将太阳能转换为电能, 并表现为受控电流源的形式, 此时并网逆变器是一个重要的关键设备^[4-5]。传统两电平拓扑并网逆变器存在输出电压总谐波失真(total harmonic distortion, THD)较高、开关损耗较大、高开关频率下的热应力较大、以及共模电压较高等问题^[6]。为此, 输出电平数更多、谐波

含量更低的多电平拓扑并网逆变器的研究逐渐增多^[7-8]。但传统的多电平拓扑逆变器在实现输出电压电平数增加时, 成本和工程实现难度也相应增加^[9]。为了缓解该问题, 较多文献对一些新的多电平并网逆变器拓扑开展了研究, 如单相四开关拓扑可实现 16 种开关状态输出五电平电压并保持固定共模电压^[10]; 模块化多电平拓扑设计以改善电能质量^[11]; 准 Z 源级联多电平拓扑同时实现多电平和功率密度高的优点^[12]等。其中一种较为有前景的多电平拓扑结构为 U-Cell 拓扑, 它

基金项目: 山东省职教改革研究项目(C20G321008); 山东省教育厅科技项目(2019042, 2019034);

山东工业职业学院教科研项目(202003)

作者简介: 杨青峰(1970—), 男, 硕士, 副教授, Email: 251511088@qq.com

结合了飞跨电容拓扑和级联H桥拓扑的优点,只需要使用一个隔离直流源,而当电平数相当时,级联H桥拓扑需要使用3倍的隔离直流源。同样,多电平U-Cell拓扑除了使用一个隔离直流源外,还采用一组电容作为辅助直流回路并调节到所需的电压,即可实现多电平输出^[13-14],而当电平数相当时,飞跨电容拓扑需要使用5倍的飞跨电容组。故多电平U-Cell拓扑的优势体现在功率密度高而输出同样电平数的情况下所需元件更少。多电平U-Cell拓扑的控制方案主要为滞环电流控制^[15]和非线性控制^[16],它们主要处理逆变器单位功率因数下为独立负载供电的情况。此外,还需要使用脉宽调制模块来生成脉冲到各个功率器件。

模型预测控制(model predictive control, MPC)属于一种计算密集型的控制策略,最初在20世纪60年代就已被提出^[17],但直到实时控制芯片技术成熟后才越来越多地应用于电力电子装置,如电机驱动器、并网逆变器和电力电子变压器等。对比传统控制器,MPC的优势主要体现在动态响应快、精确跟踪、多目标控制和无需使用调制器^[18-20]。MPC的基本原理为通过预测受控变量的未来行为,计算使所设定成本函数取最小值的开关状态,直接进行输出。基于此,本文将MPC引入到U-Cell拓扑并网逆变器的控制器设计中,相对于传统滞环电流控制或非线性控制方案,MPC可完成逆变器在并网点功率和辅助直流回路电压的完全解耦控制,实现高电能质量的多电平输出,同时控制器还无需使用调制模块。最后,进行了U-Cell拓扑逆变器并网实验验证。

1 七电平U-Cell拓扑逆变器

U-Cell拓扑于2012年在文献[15]中首次提出,其既可以作为单相变换器,也可以用作三相配置。U-Cell拓扑结构是飞跨电容拓扑和级联H桥拓扑的结合,但相对两者显著减少了电容和功率器件的数量。图1为七电平U-Cell拓扑并网逆变器电路图,其中线路阻抗分别为 r 和 L 。

将图1中直流源的电压 V_1 设置为 $3E$,电容组的电压 V_2 设置为 E ,即两者的比率为3:1,可使逆变器输出电压 V_{inv} 为七电平,即 $0, \pm E, \pm 2E$ 和 $\pm 3E$,但直流电容电压需进行控制。七电平U-Cell拓扑中共有6个功率开关器件,每个开关具有分断和导通2种状态,其中开关状态 S'_a 和 S_a, S'_b 和 S_b, S'_c 和 S_c

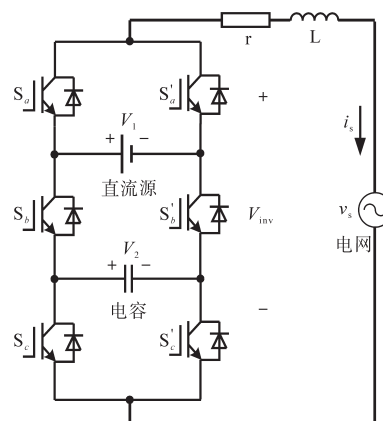


图1 U-Cell拓扑逆变器的电路图

Fig.1 Circuit diagram of U-Cell topology inverter

S_c 为成对互补开关状态。表1给出了七电平U-Cell拓扑逆变器中6个互补状态工作的开关共构成了8种开关状态组合及对应的输出电压。

表1 开关状态组合

Tab.1 Switch state combination

状态	S_a	S_b	S_c	V_{inv}
1	1	0	0	$V_1 = 3E$
2	1	0	1	$V_1 - V_2 = 2E$
3	1	1	0	$V_2 = E$
4	1	1	1	0
5	0	0	0	0
6	0	0	1	$-V_2 = -E$
7	0	1	0	$V_2 - V_1 = -2E$
8	0	1	1	$-V_1 = -3E$

与输出七电平电压的飞跨电容拓扑和级联H桥拓扑结构相比,U-Cell拓扑逆变器所需的隔离直流源、电容器和开关器件更少。该拓扑结构的逆变器中6个功率开关器件的额定电压不同,但上部2个开关以基频工作承担着最高电压,下部4个开关工作开关频率更高,所承担的电压低,这与半导体功率器件的性能是兼容的。

2 模型预测控制策略设计

如前所述,七电平U-Cell拓扑逆变器存在负载电流控制和辅助直流电容电压控制两个控制目标。考虑到MPC与传统线性控制器相比具有多目标解耦控制的优势,既可以灵活地控制不同的变量,又能处理好各种约束和额外的系统要求,故在此引入MPC控制策略。此外,MPC方案避免了传统线性控制器中的级联控制结构,意味着可实现更快速的动态响应。MPC的计算密度

较高,但得益于现代芯片技术的发展,普通的数字处理芯片上已可以实现。图2为七电平U-Cell拓扑并网逆变器的MPC控制框图。首先,MPC控制器在当前采样周期对相关变量进行测量,再代入预测控制模型,计算得到在不同有效开关状态组合下的变量预测值,然后,评估参考值和各个预测值之间的误差并选择使成本函数值最小的开关状态组合在下一个采样周期输出。

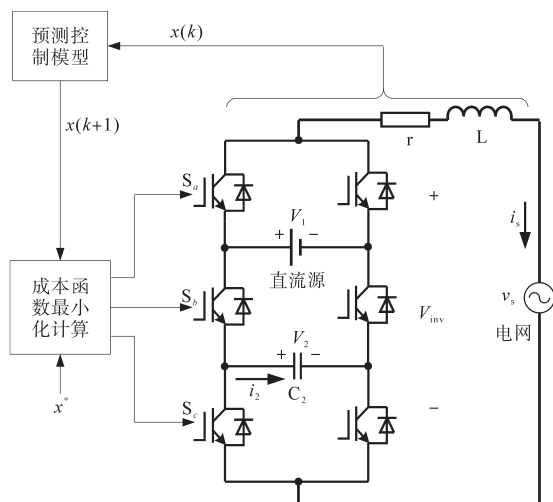


图2 U-Cell拓扑逆变器的MPC方案框图

Fig.2 MPC block diagram of the U-Cell topology inverter

对U-Cell拓扑逆变器建模时,假设功率开关器件为理想元件,只有导通和断开2种状态。同时,表1中有2个零电压组合,故有效开关状态组合只有7种。考虑到MPC控制器需控制负载电流 i_s 和电容电压 V_2 。故为了简化计算,可定义两个新的开关状态变量 S_1 和 S_2 替代 S_a, S_b 和 S_c 来降低计算量, S_1 和 S_2 的表达式为

$$S_1 = S_a - S_b \quad (1)$$

$$S_2 = S_b - S_c \quad (2)$$

引入新的开关状态变量 S_1 和 S_2 后,表1可改写为表2。

表2 开关状态组合升级

Tab.2 Switch state combination upgrade

状态	S_1	S_2	V_{inv}
1	1	0	$V_1=3E$
2	1	-1	$V_1-V_2=2E$
3	0	1	$V_2=E$
4	0	0	0
5	0	-1	$-V_2=-E$
6	-1	1	$V_2-V_1=-2E$
7	-1	0	$-V_1=-3E$

引入 S_1 和 S_2 后,逆变器输出电压矢量为

$$V_{inv} = S_1 V_1 + S_2 V_2 \quad (3)$$

电容电压动态表达式为

$$i_2 = C_2 \frac{dV_2}{dt} = -S_2 i_s \quad (4)$$

使用前向欧拉法离散,电容电压的微分可表示为

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{V_2(k+1) - V_2(k)}{T_s} \quad (5)$$

式中: T_s 为采样周期。

将式(5)代入式(4),可得:

$$V_2(k+1) = V_2(k) - \frac{T_s S_2}{C_2} i_s(k) \quad (6)$$

并网电流动态可以用微分方程描述为

$$V_{inv} = v_s + r i_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (7)$$

使用前向欧拉法离散,并网电流的微分可表示为

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{i_s(k+1) - i_s(k)}{T_s} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中可得:

$$i_s(k+1) = (1 - \frac{rT_s}{L}) i_s(k) + \frac{T_s}{L} [V_{inv}(k) - v_s] \quad (9)$$

最终,可推导出成本函数 g 的表达式如下:

$$g(k) = k_1 [i_s(k) - i_s^*]^2 + k_2 [V_2(k) - V_2^*]^2 \quad (10)$$

式中: k_1, k_2 为权重系数; g 为成本函数; i_s^* 为并网电流参考值; V_2^* 为电容电压参考值。

针对7种可能的开关状态计算成本函数值,然后选取使 g 最小的对应开关状态 S_1 和 S_2 ,进而由表2和表1生成三相脉冲信号输出。

图3给出了应用于七电平U-Cell拓扑并网逆变器的MPC算法流程图。在数字芯片中可设置两个中断,一个中断处理采样,即在每次采样间隔执行,中断中对并网电流和电容电压进行采样,另外一个中断中计算并网电流和电容电压的预测值,然后计算成本函数 g 的值进行存储,并执行完七种可能的开关状态代入计算后,选择使成本函数 g 最小的开关状态应用。

考虑到MPC控制器对系统的数学模型准确性要求较高,故对模型参数不匹配情况进行分析。设电感和电阻参数的误差分别为 $\tilde{L}$ 和 $\tilde{r}$,代入式(9),可得电流预测误差为

$$\Delta i = \frac{T_s}{L(L_{act})} [(\tilde{r}L - r\tilde{L})i(k) + \tilde{L}(V_{inv}(k) - v_s)] \quad (11)$$

式中: Δi 为电流预测误差。

令 $r_{act}=r+\tilde{r}$ 和 $L_{act}=L+\tilde{L}$ 分别代表实际电感和电

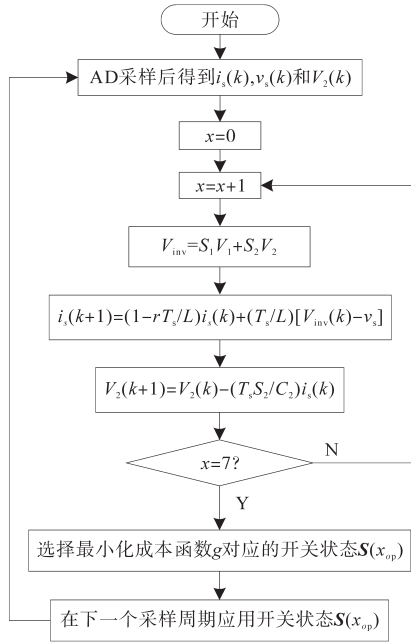


图3 U-Cell拓扑逆变器的MPC算法流程图

Fig.3 MPC algorithm flowchart of the U-Cell topology inverter

阻。图4为电感参数和电阻参数发生扰动时对应的电流预测误差变化曲线。图4中,纵坐标为 $|\Delta i|/i(k)$,无参数扰动对应 $r_{act}=r$ 和 $L_{act}=L$,此时预测误差趋于0,但是当 $r_{act} \neq r$ 且 $L_{act} \neq L$ 时,电感参数误差对预测的影响大于电阻参数误差,尤其高估值达到1倍时,预测误差趋于严重。但是实际逆变器并网应用中,并网电感参数及其电阻参数是可测量得到的,工程上测量误差通常小于5%,故预测误差分布位于图中粗实线框内,误差量级较小,对控制性能影响不大。

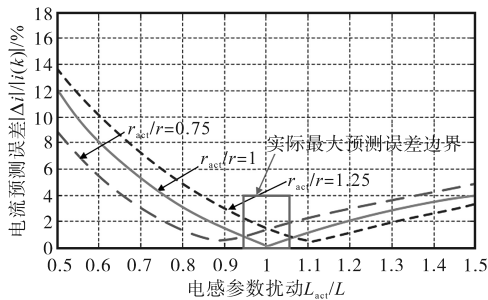


图4 参数扰动时的预测误差趋势

Fig.4 Prediction error trend when parameter perturbation

3 实验验证

为了验证所设计的应用于七电平U-Cell拓扑并网逆变器的MPC策略,搭建如图5所示的实验平台,进行实验研究。为了实现更高的开关频率,功率开关器件选择使用基于SiC的MOSFET;控制算法基于实时控制系统dSPACE 1103实现,

采样周期为20 μs。实验系统其他主要参数为:直流电压 $V_1=300$ V,电容容值 $C_{dc}=1\ 000$ μF,线路电感 $L=2.5$ mH,线路电阻 $r=0.1$ Ω,电网电压有效值 $V_{rms}=220$ V,电网频率 $f_s=50$ Hz。控制器的参数主要包含有离散预测模型中的电感参数 L 和线路电阻参数 r ,这在实际中是测量得到的,偏差较小,直接将测量值设置到控制器即可,其次就是权重系数 k_1 和 k_2 的选择。 k_1 和 k_2 的选择取决于当前对多个控制目标的重要性的区分以及避免耦合效应,考虑到并网电流控制和电容电压控制在所应用对象七电平U-Cell拓扑并网逆变器中的重要性一致,且控制独立解耦,则可设置为两个权重系数值相等,即 $k_1=k_2=0.5$ 。

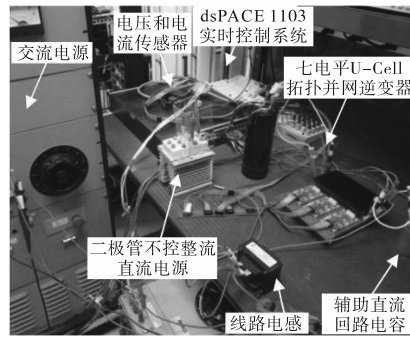


图5 实验平台

Fig.5 Experiment platform

图6所示为七电平U-Cell拓扑逆变器在并网运行时的稳态波形。

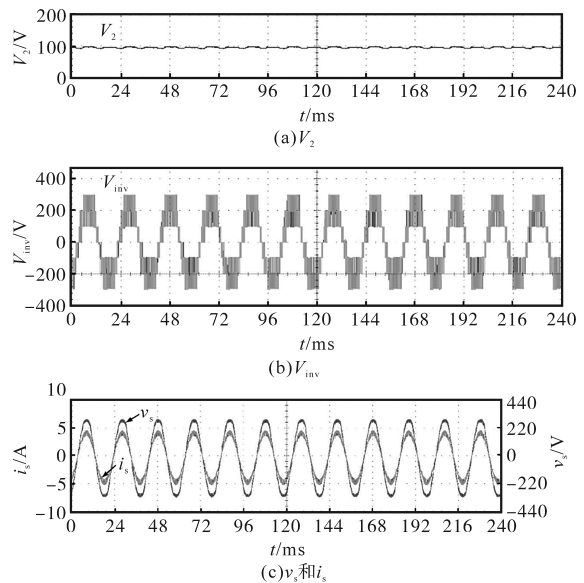


图6 U-Cell拓扑逆变器并网稳态波形

Fig.6 Steady-state waves when the U-Cell topology inverter grid-connected

如图6所示,U-Cell拓扑并网逆变器工作在单位功率因数。同时,并网电流跟踪上参考值4 A,电

电容电压控制在 $V_1/3$, 即 100 V, 逆变器输出七电平电压 0 V, ± 100 V, ± 200 V 和 ± 300 V。

图7给出了电网电压变化时的七电平U-Cell拓扑逆变器并网运行波形。从图7中可看出, 电网电压降低了20%的同时并网电流 i_s 和电容电压 V_2 依然得到较好的控制, 验证了所设计的MPC控制器对电网电压波动具有鲁棒性。

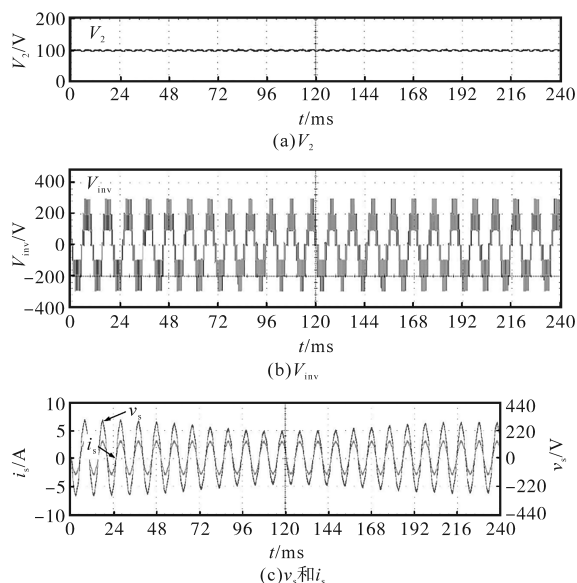


图7 电网电压变化时的U-Cell拓扑逆变器实验波形

Fig.7 Experimental waves of the U-Cell topology inverter when grid voltage changed

图8为当直流电压发生变化时的七电平U-Cell拓扑逆变器并网运行波形。

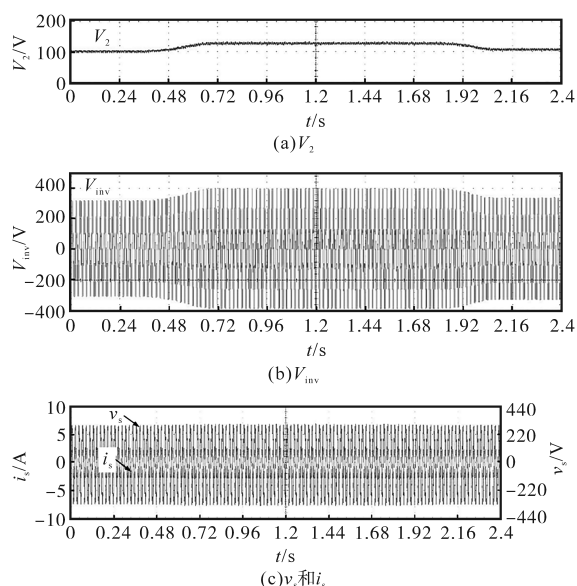


图8 直流电压变化时的U-Cell拓扑逆变器实验波形

Fig.8 Experimental waves of the U-Cell topology inverter when DC voltage changed

从图8中可看出, 对应直流电压升高或降低, 电容电压均能进行适应性调整, 验证了控制器对直流电容电压 V_2 的控制能力, 同时并网电流并没有受到影响, 验证了MPC多控制目标之间的解耦性。

进一步, 进行了一项七电平U-Cell拓扑逆变器与电网之间进行无功功率交换的测试, 测试结果如图9所示。图9中, 初始 i_s 和 v_s 的相位差为 0° , 即以单位功率因数运行, 然后将两者相位差提高到 30° , 功率因数对应变为 0.85, 此时逆变器和电网之间存在无功功率交换, 但电容电压保持稳定, 同时电流幅值保持不变, 故并网控制性能得到了验证。如前所述, 传统的七电平U-Cell拓扑逆变器的方案为滞环电流控制^[15]和非线性控制^[16], 但均只能处理逆变器单位功率因数下为独立负载供电的情况, 故图9实验结果验证了新型MPC控制器对于其他传统控制策略的优越性主要体现在可以实现七电平U-Cell拓扑逆变器的变功率因数运行。

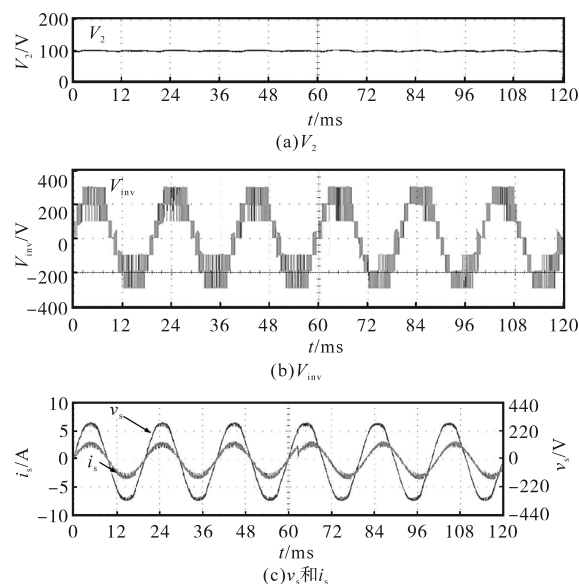


图9 输出功率因数变化时的U-Cell拓扑逆变器实验波形

Fig.9 Experimental waves of the U-Cell topology inverter when output power factor changed

最后, 为了验证应用于七电平U-Cell拓扑逆变器的MPC控制器的动态性能, 进行电流动态实验, 结果如图10所示。图10中, 参考电流幅值先从 5 A 阶跃增加至 8 A, 然后阶跃减小至 5 A, 对应实际并网电流较好地跟踪了参考值的变化, 动态调节时间小于 8 ms, 且没有超调, 同时电容电压也保持了稳定。

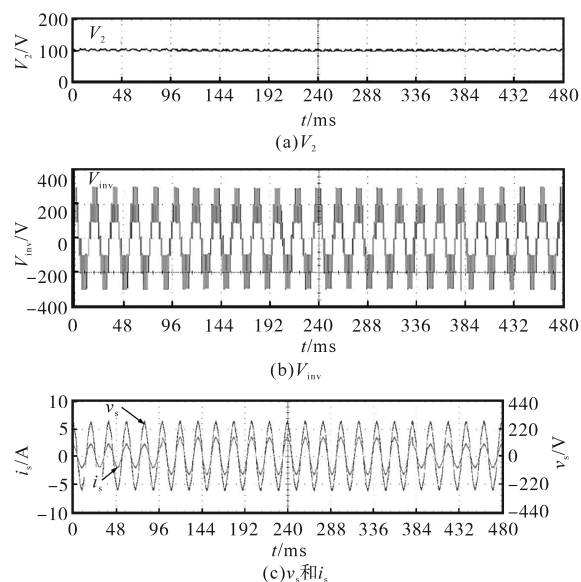


图10 参考电流变化时的U-Cell拓扑逆变器实验波形

Fig.10 Experimental waves of the U-Cell topology inverter when reference current changed

4 结论

本文围绕七电平U-Cell拓扑逆变器的并网控制问题,设计了新型MPC方案,并对其进行了测试,总结全文可知:

1)七电平U-Cell拓扑逆变器用于并网运行具有元器件少而电平数多的优点,可实现较高的输出电能质量。

2)MPC作为一种简单直观的控制策略,具有动态响应快、多控制目标解耦独立控制、可处理各种系统约束的优点,应用于七电平U-Cell拓扑逆变器可同时实现辅助直流回路电容电压和并网电流的有效控制。

3)稳态和动态实验结果表明,MPC控制器可在各种扰动的情况下将直流电容电压稳定控制,同时可实现并网电流较好的动静态控制性能。

进一步可进行的研究内容为:对MPC实现时存在的数字控制延迟进行补偿,进而加强MPC的预测准确度和控制性能。此外,还需分析其他外部扰动如短路发生时的控制器应对策略。

参考文献

[1] 宫飞翔,李德智,田世明,等.综合能源系统关键技术综述与展望[J].可再生能源,2019,37(8):1229-1235.
[2] 王蓓蓓,丛小涵,高正平,等.高比例新能源接入下电网灵活性爬坡能力市场化获取机制现状分析及思考[J].电网技术,2019,43(8):2691-2702.

[3] 易文飞,张艺伟,曾博,等.多形态激励型需求侧响应协同平衡可再生能源波动的鲁棒优化配置[J].电工技术学报,2018,33(23):5541-5554.
[4] 刘悦遐,黄萌,刘懿,等.基于任务剖面的光伏逆变器综合寿命预测[J].太阳能学报,2019,40(10):2789-2796.
[5] 潘力,李红伟,代云中,等.六开关非隔离型双降压光伏并网逆变器共模漏电流抑制研究[J].智慧电力,2019,47(2):43-48.
[6] 黄詹江勇,黄凯伦.光伏三电平逆变器高效断续空间矢量调制方法[J].电力电子技术,2019,53(2):14-17.
[7] 王冕,谈竹奎,赵远凉,等.二级式三电平逆变器不连续调制及中点电位平衡策略[J].电测与仪表,2018,55(18):131-138.
[8] 林逸铭,王昆,杨顺,等.基于数字控制的单相五电平逆变器研究[J].电气传动,2018,48(7):23-28.
[9] Franquelo L G, Rodriguez J, Leon J I, et al. The age of multi-level converters arrives[J]. IEEE Ind. Electron. Mag., 2008, 2(2):28-39.
[10] 沈虹,郭忠南,关红磊,等.单相四开关多电平光伏逆变器研究[J].电工技术学报,2018,33(8):1775-1782.
[11] 刘一琦,李丹华,王庆博,等.模块化多电平光伏并网逆变器的不对称容错控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(4):126-132.
[12] 张芮,李媛.考虑模块功率差异的准Z源级联多电平逆变器系统参数设计与并网控制方法[J].中国电机工程学报,2018,38(16):4836-4845.
[13] Vahedi H, Al-Haddad K. Real-time implementation of a packed U cell seven-level inverter with low switching frequency voltage regulator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8):5967-5973.
[14] 王颖杰,薛道路,焦岚轶,等.应用于STATCOM的级联U-Cell拓扑直流电压控制策略[J].电机与控制学报,2019,23(5):93-101.
[15] Ounejjar Y, Al-Haddad K, Dessaint L A. A novel six-band hysteresis control for the packed U cells seven-level converter: experimental validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3808-3816.
[16] Ounejjar Y, Al-Haddad K, Grégoire L-A. Packed U cells multilevel converter topology: theoretical study and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1294-1306.
[17] 郭楚佳,燕天,张爱民,等.离散集模型预测控制在电力电子装置中的应用[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(5):167-171.
[18] 安峰,宋文胜,杨柯欣.电力电子变压器的双有源全桥DC-DC变换器模型预测控制及其功率均衡方法[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3921-3929.
[19] 周雅夫,张霖,王翰涛,等.车用永磁同步电机FCS-MPC方法研究[J].电力电子技术,2019,53(1):42-45.
[20] 宋文胜,蒋蔚,刘碧,等.单相级联H桥整流器简化模型预测电流控制[J].中国电机工程学报,2019,39(4):1127-1138.

收稿日期:2019-11-13

修改稿日期:2019-12-27