

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181611

阶调式模块化多电平变换器的研究及应用

于飞, 朱瑞峰, 刘喜梅

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 随着模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 桥臂中串联的子模块个数增多, 硬件成本升高, 制约了其在光伏并网发电系统的发展。针对这一问题, 通过分析阶调式多电平逆变器的工作原理和控制策略, 提出了阶调式模块化多电平变换器 (Gradationally Controlled Modular Multilevel Converter, GC-MMC), 并将其应用于光伏并网发电系统中。此外, 为了解决电容电压平衡控制问题, 提出了一种适用于 GC-MMC 的电容电压平衡控制算法。最后在 Matlab/Simulink 环境下搭建了基于 GC-MMC 的光伏并网发电仿真系统, 并分别与基于 VSC 和 MMC 的光伏并网发电系统进行比较。仿真结果表明, 在相同条件下, GC-MMC 输出电平数比 MMC 更多, 并且基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统无需滤波环节, 有效降低了系统硬件成本。

关键词: 模块化多电平变换器; 阶调式多电平逆变器; 阶调式模块化多电平变换器; 电容电压平衡控制算法; 光伏并网发电系统

Research on gradationally controlled modular multilevel converter and its application

YU Fei, ZHU Ruifeng, LIU Ximei

(College of Automation & Electric Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: As the number of sub-modules (SM) connected in series in one arm increases, the hardware cost of Modular Multilevel Converter (MMC) rises. It limits the development of MMC applied in the grid-connected PV system. To solve this problem, a Gradationally Controlled Modular Multilevel Converter (GC-MMC) is proposed and applied to the grid-connected PV system through analyzing the working principle and control strategy of gradationally controlled multi-level inverters. Aiming at the problem about controlling the voltage of capacitors, a capacitor voltage balancing controlled algorithm for GC-MMC is proposed. A grid-connected PV system based on GC-MMC is built with Matlab/Simulink. Compared with systems based on VSC and MMC, the simulation results show that the number of levels output by GC-MMC is higher than that of MMC. The filter is not needed by the grid-connected PV system based on GC-MMC, which reduces the hardware cost effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61803219).

Key words: MMC; gradationally controlled multi-level inverter; GC-MMC; capacitor voltage balancing controlled algorithm; grid-connected PV system

0 引言

近年来,在能源紧缺与环境污染的双重压力下,光伏并网发电系统得到了快速发展,并且步伐仍在加快^[1-3]。其中光伏并网逆变器作为核心设备是影响光伏并网发电系统可靠性、发电效率以及输入电网电能质量的关键环节^[4-5]。目前光伏并网逆变器的设计大多采用两电平或三电平的电压源变换器(Voltage

Source Converter, VSC)^[6],而更多电平的变换器如模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC)虽然在谐波治理方面具有较高的性能优势^[7-8],但硬件成本和设计的复杂程度较高^[9-11],对控制器的计算处理能力、动态追踪特性以及对电容电压平衡控制算法的性能提出了较高的要求^[12-14],使得其在光伏并网发电系统中应用的性价比不高,制约其发展。

本文通过对阶调式逆变器的研究发现,其所采用的阶调控制策略可以有效降低子模块开关损耗,

提高其工作效率和波形质量。其中，文献[15]介绍了应用于三相电力系统的级联 H 桥 STATCOM 及其控制方法。通过控制相单元中每个 H 桥单元产生不同的输出电压 V_c 、 $2V_c$ 、 $4V_c$ ，使每个相单元可以产生 15 阶电平输出电压。同时提出了一种电压平衡算法用于平衡各 H 桥单元中电容器的电压。文献[16]提出了一种新型电压暂降补偿器，即一种阶调式多电平逆变器。该逆变器各子模块串联，彼此以不同的电压源充电，逆变输出电压为各个子模块输出电压的总和。文献[17]根据阶调控制策略提出了一种单相混合 H 桥级联逆变器。它由三个 H 桥单元串联组成，每个 H 桥单元的直流电压满足 1: 2: 4 的比例关系。文献[18]开发了一种即使在低开频率下也能输出高精度正弦波波形的阶调式多电平逆变器，并成功地将其投入实际应用。文献[19]介绍了使用阶调式多电平逆变器的 STATCOM。该系统由输出电压分别为 V_c 、 $2V_c$ 、 $4V_c$ 的三个逆变器单元组成。其中输出电压为 $2V_c$ 、 $4V_c$ 的逆变器单元通过低开频率操作提供无功功率，输出电压为 V_c 的另一个逆变器单元通过 PWM 操作形成电流波形。

为解决 MMC 在光伏并网发电系统中应用的成本问题，本文结合阶调控制策略，提出了阶调式模块化多电平变换器(Gradationly Controlled Modular Multilevel Converter, GC-MMC)，并构建基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统仿真模型，对其工作原理和相关控制策略进行分析。与传统光伏并网逆变器采用的两电平、三电平 VSC 相比，GC-MMC 不但继承了 MMC 的优点，增加了逆变侧输出电压电平数，降低输出电压谐波含量，节省滤波成本，而且比 MMC 更为有效地提高了子模块的工作效率，在实现输出相同电平数电压的情况下，减少了桥臂串联子模块数，大大降低了硬件生产成本，同时对控制器的计算处理能力和动态追踪特性的要求有所降低。

1 传统光伏并网发电系统

图 1 是传统光伏并网发电系统的示意框图，它是由光伏阵列、Boost 电路、光伏并网逆变器、滤波器、变压器、交流电网组成。其中，光伏并网发电系统的 DC/DC 变换器采用最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制^[20]，光伏并网逆变器采用恒定直流电压控制。光伏阵列通过 Boost 电路采用 MPPT 控制以最大功率输出直流电压，再经并网逆变器(通常使用两电平或三电平 VSC)逆变输出期望的交流电压，滤波后经变压器升压，并入交流电网。

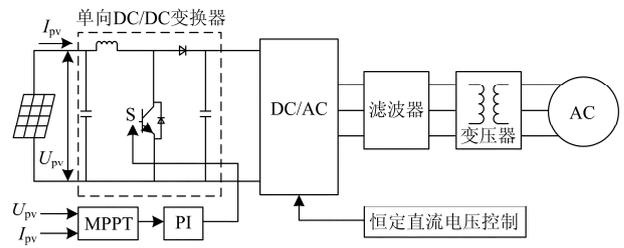


图 1 传统光伏并网发电系统

Fig. 1 Conventional grid-connected PV system

2 GC-MMC 工作原理和控制策略

GC-MMC 与传统 MMC 相比，电路拓扑相似，区别在于：(1) 子模块数量及拓扑结构不同；(2) 调制策略不同；(3) 子模块电容电压平衡控制算法不同。

2.1 传统 MMC 工作原理

图 2 是单相 MMC 的电路拓扑，它由上、下两个桥臂组成，每个桥臂由 N 个半桥子模块(Half Bridge Sub-module, HBSM)串联构成。

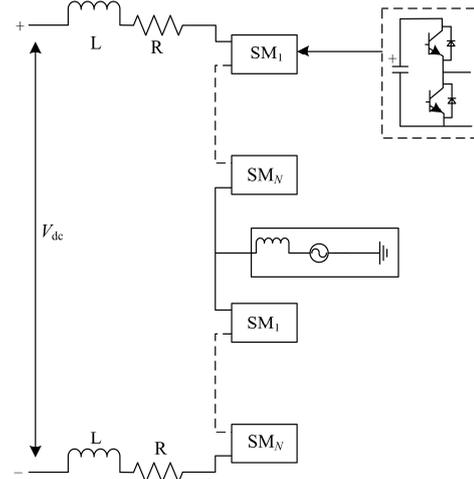


图 2 单相 MMC 电路拓扑

Fig. 2 Circuit of single-phase MMC

由于调制策略的控制，MMC 上、下桥臂输出电压之和恒定，其值等于直流侧电压 V_{dc} ，同时通过控制上、下桥臂投入的 SM 数量来实现交流侧输出电压的调节。MMC 的调制策略有很多^[21-22]，本文采用最近电平逼近调制策略(Nearest Level Modulation, NLM)，在不考虑冗余的情况下，若 MMC 上、下桥臂分别有 N 个子模块，交流侧可以输出 $N+1$ 阶电平的交流电压。

2.2 GC-MMC 工作原理

本文以单相 GC-MMC 为例进行说明，具体电路拓扑如图 3 所示。GC-MMC 中每个桥臂由 4 个全桥子模块(SM_1 、 SM_2 、 SM_3 、 SM_4)串联组成，每个

全桥子模块又由 4 个 IGBT 和 1 个电容组成。桥臂中的子模块电容值各不相同, 且具有二进制比例关系, 即 $C_1:C_2:C_3:C_4=8:4:2:1$ 。

GC-MMC 正常工作时, 在电容电压平衡控制算法的作用下, 各子模块电容电压动态稳定, 分别记为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 , 且具有二进制比例关系(与子模块电容值成反比例关系), $V_1:V_2:V_3:V_4=1:2:4:8$ 。假设此时子模块 SM_1 的电容电压为 e , 则 SM_2 、 SM_3 、 SM_4 的电容电压分别为 $2e$ 、 $4e$ 、 $8e$ 。与众多传统 MMC 调制策略不同, GC-MMC 选用阶调控制策略。桥臂输出电压 V 由 4 个子模块输出电压叠加组合而成, 具体如式(1)所示。

$$V = x \cdot V_1 + y \cdot V_2 + z \cdot V_3 + t \cdot V_4 \quad (1)$$

式中, V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为子模块 SM_1 、 SM_2 、 SM_3 、 SM_4 输出电压的绝对值, 即各自子模块电容电压值。由于每个子模块只可能输出正电压、负电压和零电压, 所以系数 x 、 y 、 z 、 t 的取值为 1、-1、0。

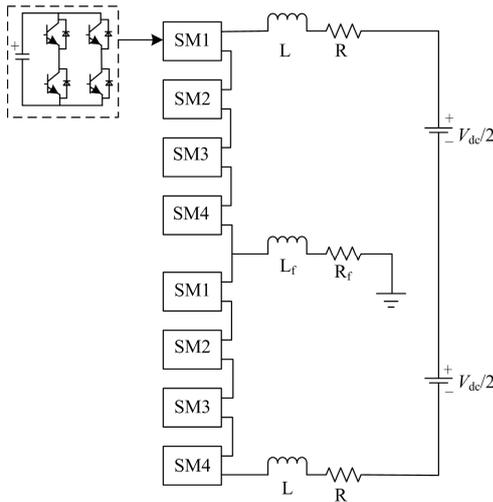


图 3 单相 GC-MMC 电路拓扑

Fig. 3 Circuit of single-phase GC-MMC

根据式(1), 理论上单个桥臂可以输出 31 阶电平(符号 e 表示一个电平的电压值, 其值等于子模块 SM_1 的电容电压)的交流电压, 分别为 $-15e$, $-14e, \dots, -2e, -1e, 0, 1e, 2e, \dots, 15e$ 。GC-MMC 实际运行过程中, 桥臂最多仅需输出 15 阶电平交流电压, 分别为 $0, 1e, 2e, \dots, 15e$ 。与传统 MMC 相似, 上、下桥臂输出电压的等效电平数之和为 N 。通过对上、下桥臂输出电压等效电平数的分配进行控制, 可以实现对交流侧输出电压的调节。本文取 $N=14$ 。此时, 如果上、下桥臂输出电压等效电平数均为 7 个, 则交流侧输出电压为零。当下桥臂输出电压等效电平数逐渐增加, 上桥臂输出电压等效电平数相

应减少时, 交流侧输出电压升高。同理, 下桥臂输出电压等效电平数逐渐减少, 上桥臂输出电压等效电平数相应增加时, 交流侧输出电压下降, 具体工作过程中上、下桥臂输出电压等效电平数分配的部分情况如表 1 所示。其中, U_{dc} 表示直流侧电压大小, E 表示逆变侧输出电压中一个等效电平的电压值, $E=U_{dc}/14$ 。

表 1 上、下桥臂等效电平数的分配

Table 1 Distribution of equivalent levels between upper arms and lower arms

GC-MMC 相关参数	参考值						
逆变侧输出电压	$-3E$	$-2E$	$-1E$	0	$1E$	$2E$	$3E$
上桥臂等效电平数	10	9	8	7	6	5	4
下桥臂等效电平数	4	5	6	7	8	9	10
等效电平数之和	14	14	14	14	14	14	14
直流侧电压大小	U_{dc}						

2.3 子模块电容电压平衡控制算法

由于桥臂中各子模块电容值不同, 系统稳定后各子模块电容电压值也不同, 且具有二进制比例关系, 所以传统子模块电容电压平衡控制算法难以使 GC-MMC 子模块电容电压稳定。本文提出了一种新的适用于 GC-MMC 的电容电压平衡控制算法。首先, 该算法将桥臂中各子模块电容电压归算到同一数量级, 比较各电容电压相对大小, 并对相对电压值排序。归算方法如式(2)所示。由于电容电压平衡控制算法的作用, 理论上 $V_1:V_2:V_3:V_4=1:2:4:8$ 。因此, 经归算后, $a:b:c:d=1:1:1:1$ 。

$$\begin{cases} a = 8 \times V_1 \\ b = 4 \times V_2 \\ c = 2 \times V_3 \\ d = V_4 \end{cases} \quad (2)$$

然后, 该算法利用桥臂中 4 个全桥子模块串联的拓扑结构, 在满足式(1)的情况下, 通过控制各子模块的投切状态, 让相对电压(经式(2)归算后的电压)低的子模块优先充电, 同时控制相对电压高的子模块放电或切除, 从而达到各子模块电容电压的平衡。

具体来说, 该算法穷举出式(1)中桥臂输出电压 V 的各项系数取值情况, 部分取值情况如表 2 所示。若 V 取某些值时, 其对应的各项系数取值情况唯一, 则将各项系数直接转换为对应子模块的控制信号, 对各子模块进行控制。例如表 2 中 V 取 14 和 15 时, 各项系数取值情况唯一。

若 V 取另外一些值时, 其对应的各项系数取值情况不唯一, 则根据一些规则确定个别项系数取值, 并以此为区别于其他取值情况的特征, 选出唯一的

取值情况, 将该情况下各项系数转换为控制信号, 控制对应子模块开关状态。例如表 2 中 V 取 1、2 和 3 时。

表 2 部分输出电压 V 的系数取值情况

V	x	y	z	t	$V=x \cdot V_1+y \cdot V_2+z \cdot V_3+t \cdot V_4$
1	1	0	0	0	V_1
	-1	1	0	0	V_2-V_1
	-1	-1	1	0	$V_3-V_2-V_1$
	-1	-1	-1	1	$V_4-V_3-V_2-V_1$
2	0	1	0	0	V_2
	0	-1	1	0	V_3-V_2
	0	-1	-1	1	$V_4-V_3-V_2$
	-1	0	1	0	V_3-V_1
3	1	1	0	0	V_1+V_2
	1	-1	1	0	$V_3-V_2+V_1$
	-1	0	-1	1	$V_4-V_3-V_1$
	1	-1	-1	1	$V_4-V_3-V_2+V_1$
14	0	1	1	1	$V_4+V_3+V_2$
15	1	1	1	1	$V_4+V_3+V_2+V_1$

为方便说明这些规则, 不妨假设: (i) 桥臂电流 I 正向时, $I=1$; 反向时, $I=0$ 。(ii) 当桥臂电流正向 ($I=1$) 时, 表 2 中“1”表示子模块正投入且其电容充电,“-1”表示子模块负投入且其电容放电,“0”表示子模块切除, 其电容既不充电也不放电; 当桥臂电流反向 ($I=0$) 时,“1”表示子模块正投入且其电容放电,“-1”表示子模块负投入且其电容充电,“0”表示子模块切除, 其电容既不充电也不放电。

当系数取值情况不唯一时, 可参考以下规则合理确定系数取值情况:

规则 1: 原则上应尽可能使子模块电容在调制波的半个周期里, 保持电压小时充电, 电压大时放电。因此, 当 $I=1$ 时, 尽可能使相对电压小的模块对应项系数置 1, 该模块电容充电, 相对电压大的模块对应项系数置-1, 该模块电容放电; 当 $I=0$ 时, 尽可能使相对电压小的模块对应项系数置-1, 该模块电容充电, 相对电压大的模块对应项系数置 1, 该模块电容放电。

规则 2: 若桥臂输出电压 V 大于等于 SM_4 的电容电压理论值, 则 SM_4 对应项系数一定置 1, 其余 3 个子模块可视为桥臂由 3 个子模块组成的情况, 根据规则 1 确定其取值情况。例如当 V 取值 14 和 15 时, SM_4 对应项系数为 1。

规则 3: 若桥臂输出电压 V 小于 SM_4 的电容电压理论值, 考虑以下两种情况: 当 $I=1$ 时, 若 SM_4 的电容相对电压值最低, 则该模块对应项系数置 1, 否则对应项系数置 0, 该子模块切除, 其余 3 个子模块可参考规则 1 确定。当 $I=0$ 时, 若 SM_4 的电容

相对电压值最高, 则该模块对应项系数置 1, 否则对应项系数置 0, 该子模块切除, 其余 3 个子模块可参考规则 1 确定。具体可参考 V 取值为 1 到 3 的情况。

3 仿真结果

为了验证 GC-MMC 的正确性及其控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的光伏并网发电仿真系统。其中, 光伏发电部分由光伏阵列和 DC/DC 变换器组成, 光伏阵列采用 Matlab 中的 SunPower SPR-305E-WHT-D 模块, 光照强度和温度曲线如图 4 所示。使用 GC-MMC 作为光伏并网逆变器, 其余部分重要仿真参数如表 3 所示。

表 3 部分仿真参数

序号	模块参数	数值
1	直流侧额定电压 U_{dc}	500 V
2	交流侧线电压有效值	260 V
3	光伏模块最大功率	305 W
4	光伏最大功率点电压	54.7 V
5	光伏串联模块数	5
6	光伏并联模块数	66
7	三相变压器变比	260 V/25 kV
8	交流电网额定电压	25 kV

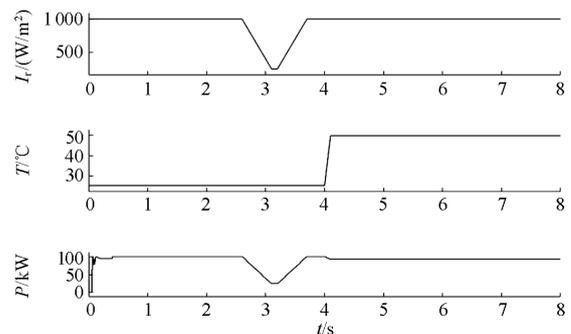


图 4 光照强度、温度变化和最大功率变化曲线

Fig. 4 Illumination intensity, temperature and maximum power

3.1 基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统

该光伏并网发电系统运行时, 光伏发电部分以最大功率输出, 当光照强度和温度发生变化时, 光伏发电部分能够很好地跟踪最大功率点, 具体如图 4 所示。其中, 输出的直流电压稳定于 500 V, 波形如图 5 所示。

图 6 为 GC-MMC 上、下桥臂输出电压波形, 从图中可以看出, 上、下桥臂输出电压反相, 均为 15 电平阶梯波, 上、下桥臂输出电压相加, 值不变且等于直流侧电压, 使直流电压稳定, 符合 NLM 要求。此时单个桥臂仅由 4 个子模块串联组成, 为了

输出相同电平数的电压, 传统 MMC 每个桥臂需要串联 14 个子模块, 因此 GC-MMC 有效地提高了子模块的工作效率, 减少了桥臂串联子模块数, 大大降低了硬件生产成本。图 7 是串联在 GC-MMC 一个桥臂中的 4 个子模块的电容电压波形。由图 7 可知, 4 个子模块电容电压迅速稳定且具有二进制比例关系, 证明 GC-MMC 的电容电压平衡控制算法有效。

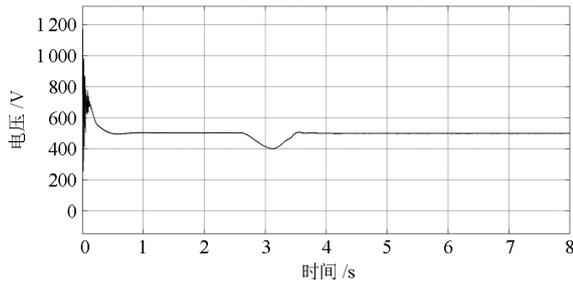


图 5 直流侧电压

Fig. 5 Voltage at the DC side

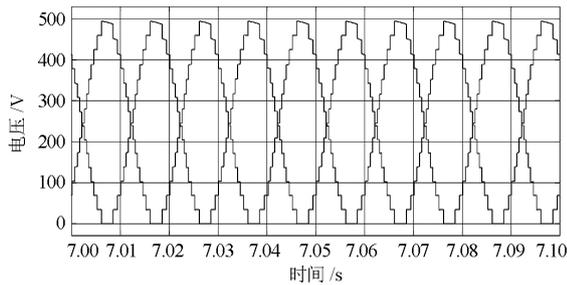


图 6 上、下桥臂输出电压

Fig. 6 Output voltage at the upper and lower arms

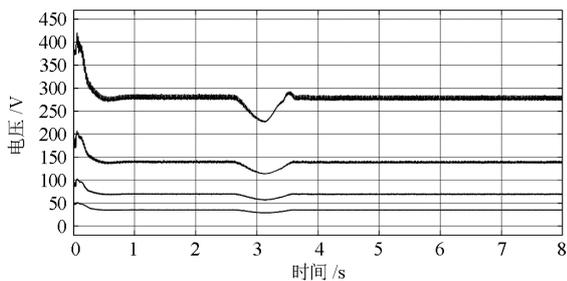


图 7 子模块电容电压

Fig. 7 Capacitor voltage of SMs

图 8 为 GC-MMC 交流输出电压 AB 相的线电压波形, 输出电压波形正确, 基本接近正弦波, 证明 GC-MMC 的理论正确, 运行正常。为进一步分析输出电压波形质量, 对输出电压进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)分析, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 交流输出电压的谐波总失真(Total Harmonic Distortion, THD)值为 1.39%, 谐波含量少, 无需滤波。

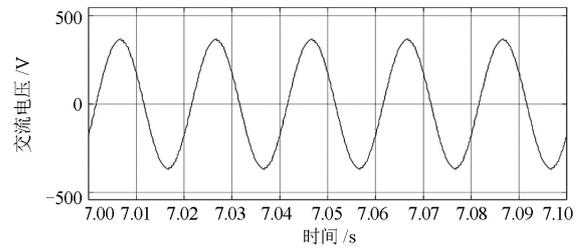


图 8 交流侧输出电压

Fig. 8 Output voltage at the AC side

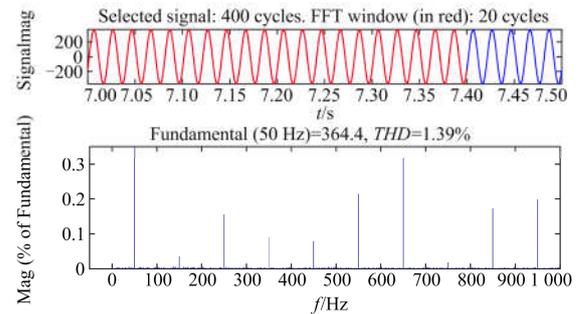


图 9 交流侧输出电压 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis about the output voltage at AC side

3.2 传统的基于 VSC 的光伏并网发电系统

为了证明 GC-MMC 在光伏发电等应用中的优越性, 本文对比基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统, 搭建了一个传统光伏并网发电系统进行仿真实验。该系统中除了使用三电平 VSC 作为并网逆变器以及增加了交流滤波环节外, 其余部分不变, 具体如图 1 所示。交流滤波环节具体结构如图 10 所示, 其中各器件主要参数如表 4 所示。

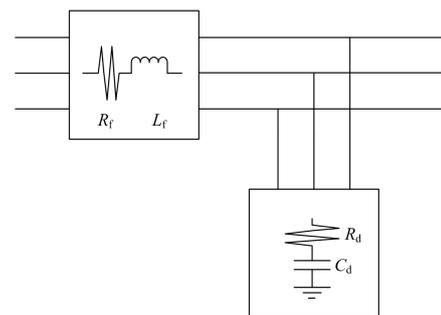


图 10 三相交流滤波器

Fig. 10 Three-phase AC filter

表 4 三相交流滤波器参数

Table 4 Parameter of three-phase AC filter

序号	模块参数	数值
1	滤波器电阻 R_f/Ω	0.001 9
2	滤波器电感 L_f/mH	0.25
3	滤波器电阻 R_d/Ω	576
4	滤波器电容 $C_d/\mu F$	552.9

图 11、图 12 分别是滤波前、后交流侧输出电压 AB 相线电压波形。滤波前，输出电压为三电平阶梯波，谐波含量高，经滤波后，输出电压波形基本接近正弦波。为了进一步分析滤波前后输出电压波形质量，对其进行 FFT 分析，结果如图 13、图 14 所示。滤波前，输出电压 THD 值为 41.21%，滤波后输出电压 THD 值为 2.1%。通过对比图 8、图 9 可以看出，GC-MMC 的交流输出电压谐波含量最少，且无需添加滤波装置，节约了滤波成本，而这是传统两电平和三电平 DC/AC 变换器无法做到的。

3.3 基于 MMC 的光伏并网发电系统

为了验证相同工况条件下，GC-MMC 输出电压电平数比 MMC 更多，本文基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统，采用传统 MMC 作为光伏并网逆变

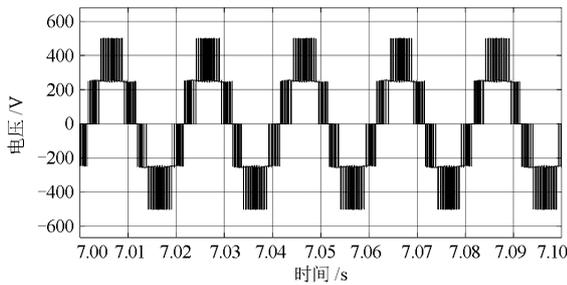


图 11 滤波前交流侧输出电压

Fig. 11 Output voltage at AC side before filtering

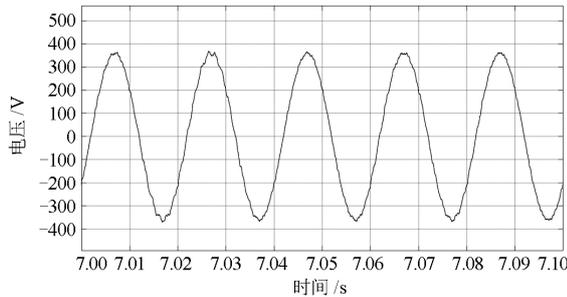


图 12 滤波后交流侧输出电压

Fig. 12 Output voltage at AC side after filtering

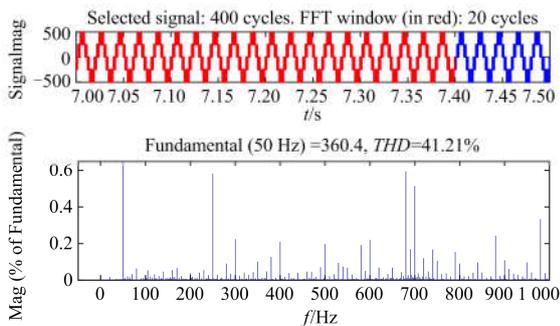


图 13 滤波前交流侧输出电压 FFT 分析

Fig. 13 FFT analysis of AC voltage before filtering

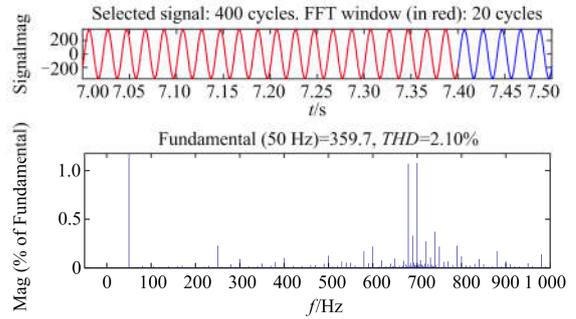


图 14 滤波后交流侧输出电压 FFT 分析

Fig. 14 FFT analysis of AC voltage after filtering

器，系统其余参数不变，进行仿真实验。其中，该传统 MMC 桥臂串联子模块数与 GC-MMC 相同，均为 4 个子模块。图 15 是 4 个子模块电容电压波形，子模块电容电压稳定在 131 V 左右，电压平衡控制算法有效。图 16、图 17 分别是交流侧输出电压的

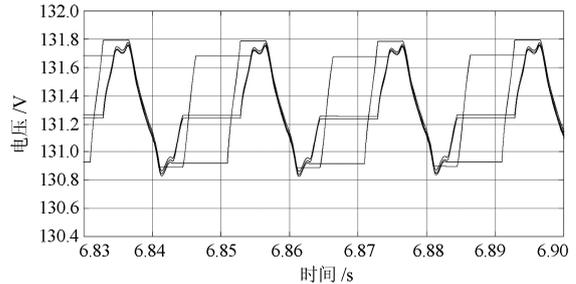


图 15 桥臂子模块电容电压波形

Fig. 15 Capacitor voltage of SMs in one arm

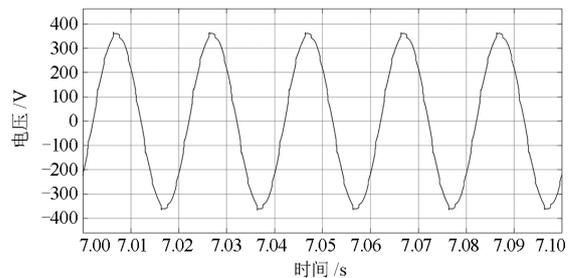


图 16 交流侧输出电压

Fig. 16 Output voltage at AC side

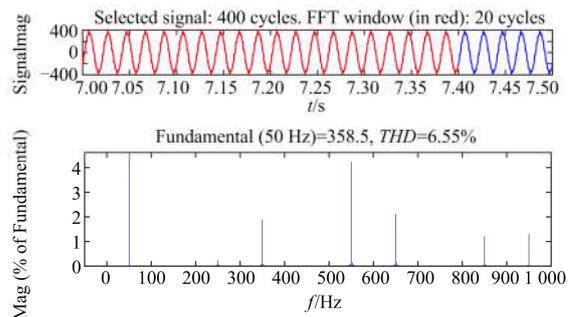


图 17 交流侧输出电压 FFT 分析

Fig. 17 FFT analysis about the output voltage at AC side

AB 相线电压波形及其 FFT 分析结果。由图 16、图 17 可知, 交流侧输出电压正确, 系统工作正常, THD 值为 6.55%。通过对比图 8、图 9、图 16 和图 17 可知, 桥臂串联相同个数子模块时, GC-MMC 可以输出更多电平数的电压, 波形质量比 MMC 好, THD 值更低。同理, 在实现输出相同电平数电压的情况下, GC-MMC 减少了桥臂串联子模块数, 大大降低了硬件生产成本。

4 结论

本文将阶调式逆变器和传统 MMC 结合, 提出了 GC-MMC, 分析其工作原理和控制策略, 并将其应用于光伏并网发电系统, 所得结论如下。

(1) 与传统 MMC 相比, 相同工况下 GC-MMC 输出电压电平数更多, 有效地提高了子模块的工作效率。同理, 在实现输出相同电平数电压的情况下, 减少了桥臂串联子模块数, 大大降低了硬件生产成本, 缩小了系统体积。

(2) 仿真结果表明, GC-MMC 工作正常, 输出波形正确、效果好, 验证了 GC-MMC 在光伏并网发电系统中运行的可行性。各子模块电容电压稳定且具有二进制比例关系, 为 GC-MMC 的正常工作奠定了基础, 同时也验证了 GC-MMC 电容电压平衡控制算法的有效性。与传统基于 VSC 的光伏并网发电系统相比, 基于 GC-MMC 的光伏并网发电系统具有提高输出电压波形质量, 降低谐波含量, 省略滤波环节, 节约硬件成本等优点。

(3) 本文的研究成果可以通过扩展多组 SM_1 、 SM_2 、 SM_3 、 SM_4 等(电容电压具有二进制比例关系)使输出电压产生更多电平数, 更好地抑制谐波、减少成本。

参考文献

- [1] 王强, 谭清坤, 谭忠富. 计及去产能政策的光伏制造业国际竞争力模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 60-67.
WANG Qiang, TAN Qingkun, TAN Zhongfu. International competitiveness model research of photovoltaic manufacturing industry considering the policy of reducing excessive capacity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 60-67.
- [2] 傅金洲, 孙鸣. 基于气候条件的光伏储能一体发电系统的能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 142-149.
FU Jinzhou, SUN Ming. Energy management strategy based on weather condition for photovoltaic-energy storage integrated power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 142-149.
- [3] 魏金成, 游芳, 郭筱瑛, 等. 光伏发电系统中三相逆变器不平衡控制的分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(6): 61-65.
WEI Jincheng, YOU Fang, GUO Xiaoying, et al. Analysis of three-phase inverter for photovoltaic power system under unbalanced load condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(6): 61-65.
- [4] 高峰. 光伏并网系统的优化设计与协调控制技术展望[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 91-97.
GAO Feng. Prospects of optimal design and coordinative control technology of grid connected photovoltaic power generation systems[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 91-97.
- [5] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [6] 于小艳, 李国宁. 基于 VSC-HVDC 并网的光伏电站启动控制及优化方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 55-62.
YU Xiaoyan, LI Guoning. Research on starting control and optimization method of PV power station based on VSC-HVDC grid connection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 55-62.
- [7] 夏超英, 于佳丽. MMC 系统的渐近稳定性和电容电压均衡策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5812-5820.
XIA Chaoying, YU Jiali. The asymptotic stability and capacitor voltage balancing control strategy for MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5812-5820.
- [8] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10.
YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [9] 王坤, 刘开培, 胡志鹏, 等. 适用于含大量子模块的 MMC 快速电容电压均衡策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3854-3861.
WANG Kun, LIU Kaipei, HU Zhipeng, et al. A fast capacitor voltage balancing strategy for MMC with large number of sub-modules[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3854-3861.
- [10] 董鹏, 蔡旭, 吕敬. 大幅减小子模块电容容值的 MMC 优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5369-5380.

- DONG Peng, CAI Xu, LÜ Jing. Optimized method of MMC for greatly reducing the capacitance of the submodules[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5369-5380.
- [11] 常怡然, 蔡旭. 低成本混合型海上风场直流换流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5821-5828.
CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5821-5828.
- [12] 欧阳可凤, 孙斌, 林成, 等. 基于自抗扰控制算法的模块化多电平变流器控制策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(2): 42-46, 23.
OUYANG Kefeng, SUN Bin, LIN Cheng, et al. Research of control strategy in modular multilevel converter based on auto disturbance rejection algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(2): 42-46, 23.
- [13] 杜晓舟, 梅军, 邓凯, 等. 模块化多电平换流器电容电压均衡控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 26-31.
DU Xiaozhou, MEI Jun, DENG Kai, et al. Voltage balance control method of MMC[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 26-31.
- [14] 常非, 杨中平, 陈俊, 等. 模块化多电平换流器电容电压平衡并行排序方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3166-3171.
CHANG Fei, YANG Zhongping, CHEN Jun, et al. Parallel sorting method for capacitor voltage balancing of MMC[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3166-3171.
- [15] HATANO N, ISE T. A configuration and control method of cascade H-bridge STATCOM[C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA.
- [16] YAMADA M, IWATA A, OKADA J. A new voltage sag compensator with a gradationally controlled voltage inverter[C] // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, Dresden, Germany.
- [17] LU X, SUN K, MA Y, et al. High performance hybrid cascaded inverter for renewable energy system[C] // 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 6-11, 2011, Fort Worth, TX, USA.
- [18] MORI O, YAMADA M, IWATA A. A single phase uninterruptible power system with a gradationally controlled voltage inverter[C] // IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, November 6-10, 2006, Paris, France.
- [19] KISHIDA Y, HATANO N, IWATA A. Development of STATCOM with gradationally controlled voltage inverter[C] // 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal.
- [20] 高志强, 李松, 周雪松, 等. 线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 52-59.
GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 52-59.
- [21] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 128-130.
- [22] 黄强, 陈亮, 袁晓冬, 等. 多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用[J]. 供用电, 2018, 35(6): 24-32, 82.
HUANG Qiang, CHEN Liang, YUAN Xiaodong, et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 24-32, 82.

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-03-19

作者简介:

于飞(1961—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术、柔性直流输电系统; E-mail: yuffqd@163.com

朱瑞峰(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、柔性直流输电系统; E-mail: peter920zrf@sohu.com

刘喜梅(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术、智能控制。E-mail: liuximeiqd@163.com

(编辑 许威)