

基于单极 MMC 拓扑的光伏并网系统仿真分析

彭华夏, 阳鹏飞, 肖会芹

(湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

摘要: 针对传统的二电平、三电平变换器不能满足高电压、大容量光伏并网发电系统的要求, 以及一般 MMC(模块化多电平换流器)不具备子模块保护能力的问题, 提出一种具有子模块保护能力的单极 MMC 光伏并网系统。介绍了基于 MPPT(最大功率点跟踪)技术的双闭环控制策略、光伏并网原理以及 MMC 换流器拓扑结构的特点、工作原理、调制方式。采用 CPS-SPWM(载波移相正弦脉宽调制)方式来调制 MMC, 利用 PSCAD/EMTDC 电力系统电磁暂态仿真软件搭建 9 电平的 MMC 光伏并网模型。仿真结果表明, 设计的 MMC 具有保护子模块的能力, CPS-SPWM 调制方式谐波少、开关频率低, 光伏阵列通过 MMC 平稳并网。

关键词: 模块化多电平换流器; 光伏并网; 最大功率点跟踪; PSCAD/EMTDC

文章编号: 1007-1881(2019)11-0016-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.201911003

中图分类号: TM615+.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation Analysis of Photovoltaic Grid-Connected System Based on MMC Topology

PENG Huaxia, YANG Pengfei, XIAO Huiqin

(Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: The traditional two and three-level converter cannot meet the requirements of high-voltage and large-capacity photovoltaic grid-connected generation system, and the general MMC (modular multi-level converter) has no sub-module protection capacity. The paper proposes a monopole MMC photovoltaic grid-connection system with sub-module protection capacity. Double closed-loop control strategy and photovoltaic grid-connection principle based on MPPT (maximum power point tracking), and topology characteristics, operation principle and regulation mode of MMC are introduced. The CPS-SPWM (carrier phase-shifted unipolar sinusoidal pulse width modulation) is adopted to modulate MMC, and the 9-level MMC photovoltaic grid-connected model is built by using PSCAD/EMTDC. The results show that MMC has protection ability of sub-module. CPS-SPWM modulation has the characteristics of fewer harmonics and low switching frequency. The PV array is smoothly connected to the grid through MMC.

Keywords: modular multilevel converter; photovoltaic integration; maximum power point tracking; PSCAD/EMTDC

0 引言

近年来, 环境污染和能源枯竭问题表现得越来越严重, 太阳能作为取代化石能源的理想能源之一, 已经受到世界各国的重视。目前, 光伏发电技术已经趋于成熟, 同时, 光伏产业发展速度

迅猛, 光伏发电在电力系统中的装机容量占比越来越重, 因此对光伏并网发电系统提出了更高的要求, 例如增强光伏并网逆变器容量、提高光伏阵列发电效率等^[1]。

传统的 VSC 逆变器一般采用二电平结构, 只适用于小容量、低电压的应用场合, 无法满足高电压、大容量的要求。针对这种情况, 许多研究人员都在从事 MMC(模块化多电平换流器)的研究, 文献[2-3]针对 MMC 展开了一系列研究, 但

是都没有应用在光伏并网系统；文献[4]研究了基于MMC的光伏并网，但是所用MMC都不具备子模块保护的能力，并且仿真模型都是在MATLAB/Simulink上搭建的，带有一定的局限性。大型光伏并网发电系统中，光伏阵列的数量非常多，需要采取最大功率追踪技术提高光伏阵列的太阳能利用率，让其尽可能工作在最大功率状态，大幅度提高光伏系统的发电效率，文献[5]研究了基于扰动观察法的MPPT(最大功率点跟踪)光伏并网，但是扰动观察法容易造成能量损失，导致系统效率降低。文献[6]将光伏电源整合到每一个子模块中，但是加重了系统的复杂以及不稳定性，对现有的光伏系统需要进行较大的改造，缺乏经济适用性。文献[7-10]研究的都是双极式光伏并网系统，在光伏阵列和逆变器之间需要DC/DC变换器来实现最大功率点追踪。文献[11]还需要加入LCL滤波器，增加了经济成本。

为了解决大型光伏并网发电系统存在的上述问题，本文提出了一种具备子模块保护能力的单极MMC光伏并网系统，对系统每个组成部分进行了详细的介绍和分析，重点介绍了MMC的原理和拓扑结构，把本文设计的MMC子模块与一般半桥型子模块对比，说明其优点。该系统不仅可以提高光伏阵列的太阳能利用率，而且满足高电压、大容量的要求，系统控制简单而且易实现，还能减小对电网的谐波污染。最后，通过PSCAD/EMTDC仿真软件搭建仿真模型，验证了该系统的有效性。

1 具备子模块保护能力的MMC拓扑结构及原理

MMC通用结构如图1所示。本文设计的MMC三相拓扑结构跟传统MMC一样，都是由3个相单元构成，每个相单元包含上、下2个桥臂，三相总共是6个桥臂，每个桥臂包含 N 个SM(子模块)和1个换流电抗 L 。目前常见的子模块有半桥型子模块、全桥型子模块和双箝位型子模块。其中全桥型子模块和双箝位型子模块都具备直流故障穿越的能力，但是成本太贵，不划算。半桥型子模块是目前应用最广泛的一种MMC拓扑，但是半桥型子模块不具备直流故障清除能力，基本上都是需要额外加装交流断路器来保护线

路。所以本文设计了具备子模块保护能力的MMC拓扑结构。

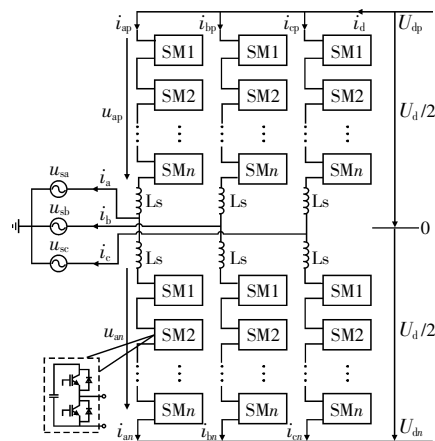


图1 MMC通用结构

半桥型子模块拓扑结构如图2所示，与传统的半桥型SM不同的是：本文提出的SM在每个半桥型子模块中的电容旁并联了一个由IGBT(绝缘栅双极晶体管)和大电阻 R 组成的旁路，在AB端口处并联了一个高速开关 K_1 和一个晶闸管 K_2 。当子模块发生故障时， K_1 闭合用于保护子模块， K_2 用于保护 D_2 。当电容电压过大或者MMC闭锁时，IGBT导通，使大电阻 R 用于电容的缓慢放电。

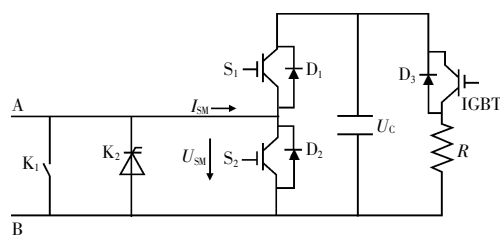


图2 半桥型子模块拓扑结构

1.1 子模块运行原理

正常工作状态下，MMC子模块的工作原理与MMC子模块一样，包括2个IGBT和1个直流储能大电容。图2中设 I_{SM} 流入子模块方向为正，根据电流 I_{SM} 的方向以及上下开关 S_1 和 S_2 的状态，子模块的端口输出电压在 U_c 和0之间变换。MMC子模块工作状态由表1可见，其中“1”代表开关导通，“0”代表开关关断。

1.2 MMC的基本原理

正常工作状态下，换流电路并不会起作用，

表 1 MMC 子模块工作状态

模式	S_1	S_2	I_{SM}	U_{SM}	电容状态
1	1	0	>0	U_C	充电
2	1	0	<0	U_C	放电
3	0	1	>0	0	旁路
4	0	1	>0	0	旁路

以 A 相为例对 MMC 的基本原理进行阐述。为便于计算,暂时不考虑电抗 L 的作用, u_{ap} 和 u_{an} 分别为 A 相上、下桥臂直流侧电压, 直流侧的正负母线相对于参考点 O 的电压分别为 $U_{dc}/2$ 和 $-U_{dc}/2$, u_{sa} 为 A 相交流输出侧的电压, 得到:

$$\begin{cases} u_{an} = U_{dc}/2 + u_{sa} \\ u_{ap} = U_{dc}/2 - u_{sa} \end{cases} \quad (1)$$

因为子模块的投入数量决定了桥臂电压, 所以通过调整子模块的投入来控制三相交流电压。为了维持直流电压的稳定, 一般要求 3 个相单元投入的子模块数量是相等且不变的, 由此可得:

$$U_{dc} = u_{ap} + u_{an} \quad (2)$$

假设 A 相上桥臂所有子模块都关闭时, 要求下桥臂的子模块全部投入, 总之单相子模块的投入数量恒定, 所以一般来说, 每个相单元投入开通状态的子模块为 N 。由于 3 个相单元的对称性, 总的直流电流被 3 个相单元平均分配, 即每个相单元的直流电流为 $I_{dc}/3$, 又因为上、下桥臂电抗器 L 相等, 上、下桥臂电流为:

$$\begin{cases} i_{ap} = I_{dc}/3 + i_a/2 \\ i_{an} = I_{dc}/3 - i_a/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{ap} 为上桥臂的桥臂电流; i_{an} 为下桥臂的桥臂电流; i_a 为输出电流。

2 单极 MMC 光伏并网系统光伏阵列结构及控制

2.1 基于 MMC 的单极光伏并网系统拓扑结构

图 3 给出了由 PSCAD 软件搭建的光伏并网主电路, 该系统由光伏阵列、直流母线、MMC 逆变器、负载组成。

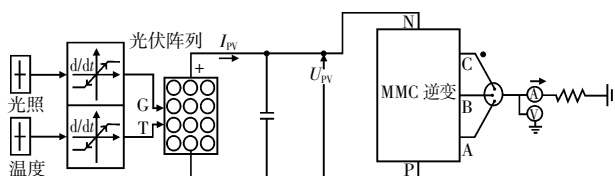


图 3 模块化多电平逆变器并网拓扑

2.2 光伏电池的数学模型

光伏组件等效电路如图 4 所示。

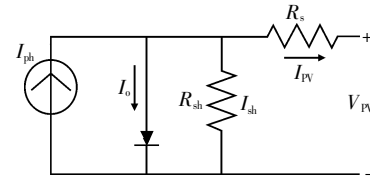


图 4 光伏组件等效电路

$$\begin{cases} I_{PV} = I_{ph} - I_o - I_{sh} \\ I_{sh} = (V_{PV} + I_{PV}R_s)/R_{sh} \\ I_{ph} = I_{sc} \frac{G}{G_{ref}} [1 + a_T(T - T_{ref})] \\ I_o = I_{RS} [\exp(\frac{V_{OC}}{AV_T}) - 1] \\ I_{RS} = I_{OR} (\frac{T}{T_{ref}})^3 \exp[qE_g(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})/kA] \end{cases} \quad (4)$$

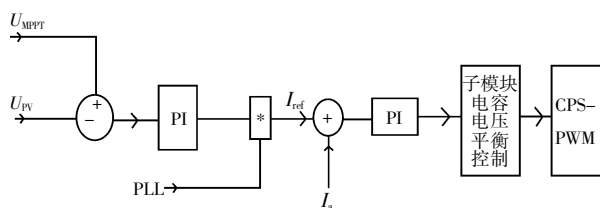
式中: G_{ref} 为参考照度; T_{ref} 为参考温度; a_T 为温度系数; I_{sc} 为标准测试条件 $T_{ref}=25^\circ\text{C}$, 光照强度 $G_{ref}=1\ 000\ \text{W/m}^2$ 下的短路电流; V_{oc} 为标准测试条件下的开路电压; R_s 为固定电阻; G, T 为实际值; A 为材料常系数; V_T 为实际电池温度; I_{OR} 为饱和电流; E_g 为光伏电池的带隙能量。

2.3 MMC 直流电压控制

由公式(4)得出: 光伏阵列的输出功率 P 以及输出电流 I_{PV} 的大小由输出电压 V_{PV} 所决定。随着光照强度和温度的变化, 光伏输出电压大小也随机波动。为了使光伏阵列的输出信号达到最优, 对其进行最大功率点跟踪控制, 使其时刻输出最大功率点处的电压。为了实现光伏阵列最大功率点的追踪控制, 本文采用电导增量法 MPPT 控制技术^[2]取得 MMC 直流电压控制的所需参考电压 U_{mppt} , 将 U_{mppt} 与 U_{PV} 做差之后, 经过 PI 控制得到电流内环的参考电流信号, 电流内环的控制主要是使得 MMC 输出电流 I_a 尽量与 I_{ref} 保持一致, 这样就省去了 DC/DC 控制环节, MMC 直流电压控制策略如图 5 所示。

2.4 MMC 子模块电容电压平衡控制

子模块电容电压不均衡会造成桥臂电流畸变, 因此为确保 MMC 各个子模块电容电压均衡, 本文额外增加了电容电压均衡控制。以 MMC 的 A 相上桥臂子模块电容电压平衡控制为例, 控制



注：CPS-PWM 为载波移相脉冲宽度调制。

图5 MMC 直流电压控制策略

拓扑如图6所示。 $U_{c\text{ref}}$ 为子模块电容的参考电压； $U_{c\text{j}}$ 为电容实际电压； I_{ap} 为桥臂电流； U_{ref} 为电流内环控制输出的信号； U_{aref} 为最终生成的调制波。

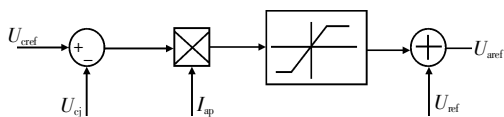


图6 电压均衡控制

3 MMC 调制方式

本文采用的调制方式为 CPS-PWM^[13]，调制原理如图7所示。

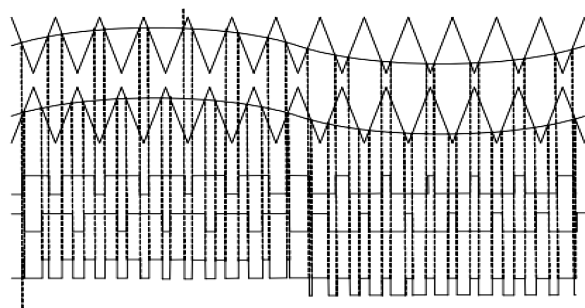


图7 载波移相调制原理

以 A 相为例来说明，调制流程为：上下桥臂各自有 N 个子模块，有 N 个相位差依次为 $2\pi/N$ 的载波按顺序分配给上桥臂(或下桥臂)的 N 个子模块，然后子模块的 N 个载波依次与同一个调制波比较，当调制波幅值大于载波幅值时子模块投入运行，于是 N 个载波即可得到 N 组 PWM 调制波信号，分别驱动 N 个子模块单元，且上、下桥臂的调制波反向，为了维持电压的稳定，任意时刻投入的子模块个数互补且等于 N ，ABC 三相的每相调制波之间相差 120° 。最后上桥臂(或下桥臂)的输出电压波形 U_{pj} (或 U_{nj})由各个子模块的输出电压叠加得到。

因为 MMC 三相单元的对称性，由文献[14]得知 MMC 各相上、下桥臂输出电压为：

$$\begin{cases} u_{\text{pj}} = -u_{\text{jo}} + U_{\text{dc}}/2 \\ u_{\text{nj}} = u_{\text{jo}} + U_{\text{dc}}/2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中： u_{jo} 为交流侧输出电压； U_{aref} 为 CPS-PWM 所需调制波；载波采用的频率为高频率 f_c ，最大幅值为 U_{dc} ，最小幅值为 0，相位角依次移相 $2\pi/N$ (N 为每个桥臂的子模块数)的三角波形，调制波与依次移相的三角载波比较，得到各个子模块的触发信号。

4 仿真实证

利用 PSCAD/EMTDC 电力系统电磁暂态仿真软件^[15]搭建 9 电平的 MMC 光伏并网模型，仿真时间为 0.5 s，光伏阵列由 250 个模块串并联，每个模块串联 222 个光伏模块，每个光伏模块由 36 个光伏电池单元串联，光照强度为 1000 W/m^2 ，环境温度为 25°C ，MMC 各相桥臂电感为 20 mH ，子模块电容为 $1600 \mu\text{F}$ ，载波频率为 500 Hz ，交流负载每相为 10Ω ，直流母线参考电压为 6.3 kV ，平衡电容为 $6000 \mu\text{F}$ ，有功功率为 1.23 MW ，无功功率为 0 Mvar ，功率波形见图8。

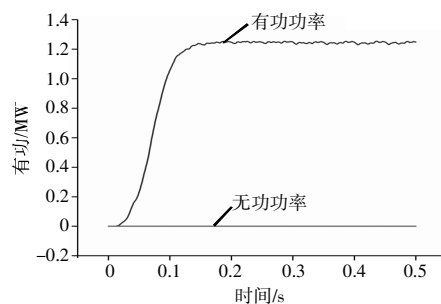


图8 有功功率与无功功率

经过直流电压控制，光伏阵列的输出直流电压 U_{pv} 一直维持在 6.3 kV 左右，仿真结果见图9。

光伏阵列电源经过 MMC 逆变后输出的三相交流电压波形见图10。三相输出电流波形见图11。

以 A 相输出电流为例，经过单极 MMC 逆变并网输出的 A 相输出电流总谐波畸变率 THD 见图12。

仿真结果表明，本文所提出的 MMC 拓扑结构是正确的，输出电流总谐波畸变率最高为

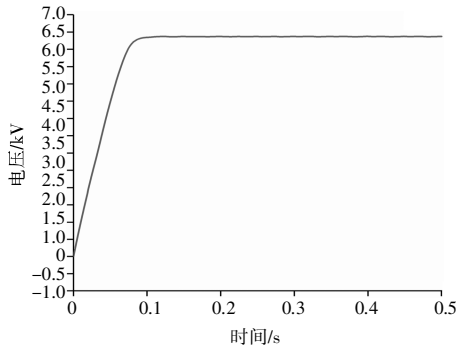


图 9 直流母线电压

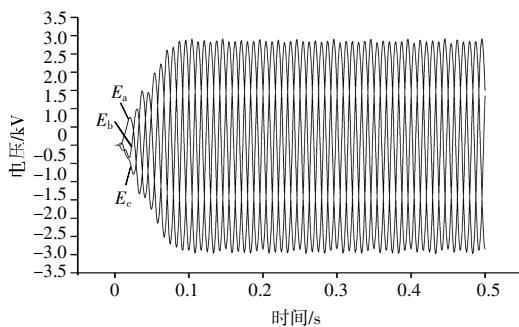


图 10 三相交流电压

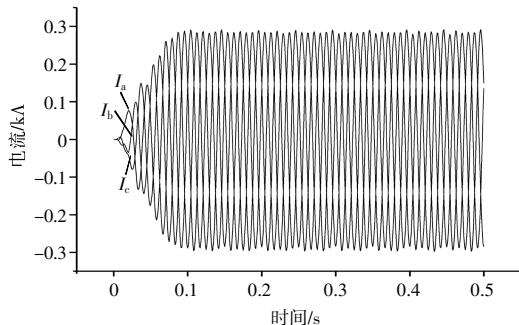


图 11 三相交流电流

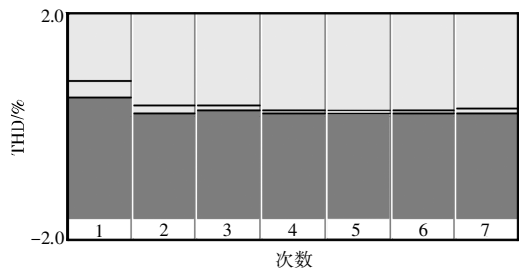


图 12 A 相电流 THD 分析

0.36%, 完全符合 IEEE 1547 中要求的并网电流电能质量, 光伏阵列电源可以通过本文提出的 MMC 拓扑结构实现并网。

5 结语

本文提出的单极 MMC 光伏并网系统适用于大电容、高电压的场合, 与基于二电平、三电平逆变器光伏并网系统相比, 本文提出的单极 MMC 光伏并网系统省去了 DC/DC 变换电路环节, 也不需要 LCL 滤波电路。该系统整体结构清晰, 易控制, 理论上子模块可以无限叠加, 对原有光伏并网系统的改造具有参考价值。MMC 逆变器采用 CPS-PWM 控制方式, 具有谐波小, 开关频率低的优点。基于具备子模块保护能力的单极 MMC 光伏并网系统在 PSCAD/EMTD 软件中的仿真结果正确, 为进一步研究光伏并网以及 MMC 的相关保护提供了基础。

参考文献:

- [1] 吉宇, 王生强, 程亮, 等. 基于 MMC 的光伏并网发电系统控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 146-153.
- [2] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3392.
- [3] 鲁晓军, 向往, 林卫星, 等. 混合型模块化多电平换流器解析建模与功率运行区间分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 76-84.
- [4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- [5] 薛阳, 汪莎. 基于扰动观察法的模糊控制应用于光伏发电最大功率跟踪[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1622-1626.
- [6] 荣飞, 刘诚, 黄守道. 一种新型模块化多电平光伏并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 5976-5984.
- [7] 刘云峰, 何英杰, 王超, 等. 级联 H 桥多电平逆变器空间矢量调制与三角载波调制统一理论[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 114-123.
- [8] JORDEHI A R. Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review of different approaches[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016 (65): 1127-1138.
- [9] SUBUDHI B, PRADHAN R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89-98.
- [10] RAJASEKAR S, GUPTA R. Solar photovoltaic power conversion using modular multilevel converter[C]//2012 Students Conference on Engineering and Systems. New York, USA: IEEE, 2012.

- [11] 李彦哲,保婷婷.三相 LCL 光伏并网逆变器的新型入网控制策略[J].控制工程,2018,25(8):1511-1515
- [12] DE BRITO M A G,GALOTTO L,SAMPAIO L P,et al.Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications[J].IEEE,2013,60(1):1156-1167.
- [13] 李笑倩,宋强,刘文华,等.采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2012,32(9):49-55.
- [14] 蔡新红,赵成勇,庞辉,等.基于 MMC 离散数学模型的 MMC-HVDC 系统直流电压控制[J].电网技术,2013,37(9):2403-2409.
- [15] 王玉婷,李鹏.基于 Pscad/EMTDC 自定义建模的 MMC 电磁暂态仿真技术[J].高压电器,2017,53(10):170-177.
- [16] 曹琼,李昊阳.光伏并网引起主动配电网电压越限问题研究[J].山西电力,2018(6):15-18.
- [17] 赵伟然,汪海蛟,李光辉,等.分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J].电力工程技术,2017,36(6):20-26.
- [18] 时国平,钱叶册,孙佐,等.模糊 PI 控制的扰动观察法在光伏系统中应用[J].浙江水利水电学院学报,2017,29(4):75-78.
- [19] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等.大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J].电力工程技术,2017,36(1):1-8.
- [20] 张怡.新能源风光发电预测技术的发展及应用[J].浙江水利水电学院学报,2018,30(1):68-74.
-
- 收稿日期:** 2019-09-12
- 作者简介:** 彭华夏(1974),女,教授,研究方向为电力网络自动化技术。
- (本文编辑: 童 凯)