

光伏高渗透率配电网中三电平电能路由器 无功支撑技术研究

纪涛^{1*}, 强丹丹², 李伟伟³

(1. 国网浙江省电力有限公司德清县供电公司, 浙江 湖州 313200; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 无锡学院, 江苏 无锡 214105)

摘要: 光伏渗透率越高, 配电网电压就越难以保持稳定, 且会影响客户侧电能质量。文章针对光伏高渗透率配电网中的三电平电能路由器进行研究, 该电能路由器由前端整流器、直流母线、后端逆变器³部分组成, DC-DC 直流变换器可直接连到直流母线上。详细介绍了网侧变换器的拓扑结构与控制策略, 针对设备的无功支撑能力进行了一系列仿真验证, 证实该设备能够向配电网提供无功补偿以稳定电压波动。

关键词: 无功支撑; 三电平拓扑; 配电网; 电能路由器

中图分类号: TM464

Research on Reactive Power Support Technology of Three-Level Power Router in Distribution Grid with High Penetration of Photovoltaics

Ji Tao^{1*}, Qiang Dandan², Li Weiwei³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Deqing County Power Supply Company, Zhejiang Huzhou 313200, China;
2. Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Nanjing 210044, China;
3. Wuxi University, Jiangsu Wuxi 214105, China)

Abstract: As the penetration rate of photovoltaics increases, maintaining stable distribution grid voltages becomes more challenging, and it can also affect the power quality on the user side. This paper focuses on the study of a three-level power router in distribution grids with high photovoltaic penetration. The power router consists of three main components: a front-end rectifier, a DC busbar, and a back-end inverter, with the DC-DC converter directly connected to the DC busbar. The paper provides a detailed introduction to the topological structure and control strategy of the grid-side converter, and a series of simulation validations have been conducted to assess the device's reactive power support capability. The results confirm that the device can provide reactive power compensation to stabilize voltage fluctuations in the distribution grid.

Keywords: reactive power support; three-level topology; distribution network; power router

0 引言

随着大规模、高渗透率的光伏设备接入电网, 一系列配电、用电问题也接踵而至。太阳能资源本身具有不可控性, 这会给电网带来诸如电压波动、潮流倒送等问题, 威胁配电网的安全性与稳定性。

在如图 1 所示的传统住宅配电网系统中, 居民的家用负载直接与电网相连, 而光伏设备则是通过变换器连接到电网, 负载电压完全由电网调节, 很容易受到电网电压波动的影响, 负载产生的谐波也会被直接注入电网引起电网谐波畸变。文献 [1] 中提出了一种混合构架来为关键负载供电, 然而, 它没

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-04-16

有考虑到这种设备的大规模投入所带来的负面影响。随着安装越来越多的并网设备, 客户侧的电流谐波也会被注入电网, 使得输电电压更加不稳定。文献 [2] 和文献 [3] 介绍了一种位于配电网边缘的自组织电力电子智能设备, 文献 [4] 提出了一种新型多智能体框架, 可将各种形式的资源和电力电子系统连接到分布式能源中, 对配电网进行优化和控制。本文提出了一种新型三电平电能路由器, 如图 2 所示, 可在电网与客户之间提供能量缓冲, 避免电网与负载直接相连。这种配电模式不仅可以稳定电网侧的电压, 减少谐波污染, 还能提高负载侧的电能质量。

文献 [5] 提出了一种可用于快速无功支撑的阻容性逆变器及其并联功率分配方法, 通过将阻容性

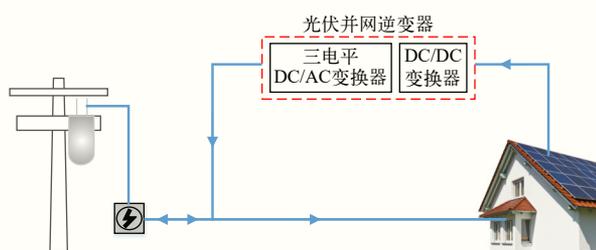


图1 传统住宅配电网系统示意图

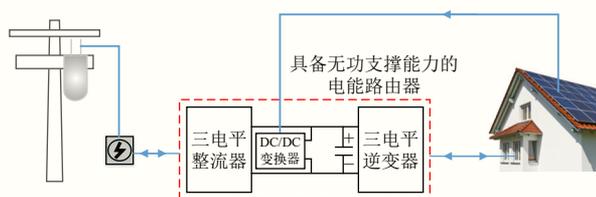


图2 新型住宅配电网示意图

虚拟复阻抗引入到逆变器输出电流反馈中，来抑制负荷突变时电网电压产生的波动。文献 [6] 以光伏并网逆变器的数学模型为基础，研究无功支撑的控制策略，有效消除了有功功率振荡并将电网电流限制在安全范围之内。文献 [7] 提出一种直流电压补偿控制策略，该策略根据电压源型逆变器 (VSC) 的无功功率需求对直流电压进行调节，充分发挥了 VSC 参与交流系统无功支撑的能力，同时保证良好的电能质量。然而从农村配电网建设的实际情况看来，无功支撑技术依旧有很大的发展空间。由于农村配电线路不宜过长，因此主要采用集中补偿的方式来提供无功支撑。尽管该方法维护简单且利用率高，但是电网内无功功率的流动会造成线路电压损失，增加电能损耗^[8]。本文所提出的三电平电能路由器能够向电网终端提供无功功率，降低线路损耗，提高功率因数，且该设备成本较低，可以在每个客

户侧与电网之间都安装此设备，具有较大的灵活性。此外，若因为突发状况导致电网电压波动较大时，输送的无功功率还能抑制电压的波动，保持客户侧电压的稳定。

面向光伏高渗透率配电网的三电平电能路由器有许多优点，总结如下：

- 1) 采用背靠背的拓扑结构，即使输入侧电网电压在一定范围内波动也不会影响客户侧电压反馈控制的效果。
- 2) 电能路由器的网侧变换器可以控制输入电流为正弦形状，稳定输入功率因数为单位输入功率因数，降低配电线路损耗，减小配电系统部件热耗散量。
- 3) 与传统的无功补偿方式相比，本文提出的设备能够向电网终端提供无功支撑，降低线路损耗，提高客户侧电压质量。
- 4) 在新型电力系统正朝着“高比例新能源”和“高比例电力电子”的双高特征发展的大背景下，针对三电平电能路由器提出高效的无功支撑策略，充分利用可再生能源。

1 三电平电能路由器拓扑结构与控制策略

面向光伏高渗透率配电网的三电平电能路由器的拓扑结构如图 3 所示，该结构图包括 3 个部分：前端配电网侧变换器主要用于抑制网侧电流谐波，提高输入功率因数并保持直流母线电压恒定；DC-DC 变换器直接连到直流母线上，用于稳定电压；后端客户侧 PWM 变换器主要为负载提供电源。

1.1 拓扑结构

前端 PWM 变换器的拓扑结构如图 3 的左侧所

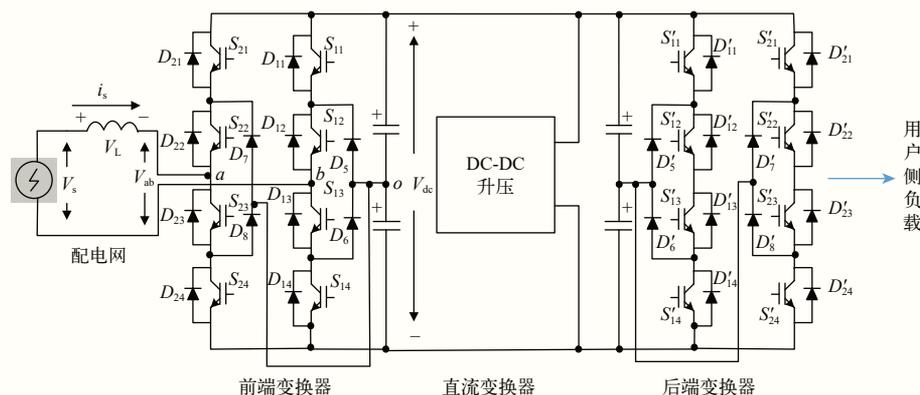


图3 三电平电能路由器拓扑结构图

示，该整流器由2个对称桥臂构成，每一个桥臂使用4个功率开关器件（此处使用的是IGBT），共8个开关管，其中桥臂两端与配电网直流母线直接相连的2个开关管称为主开关管，中间的两个开关管称为辅助开关管。两组桥臂各带2个箝位二极管，为防止前端变换器直流侧电容因为开关管通断操作而发生直通^[9]。此外，直流侧串联的2个相同电容不仅可以支撑直流电压，还可以起到滤波与均压的作用。交流侧连接配电网终端，其中包含一个滤波电感 L 。后端变换器的拓扑结构与前端变换器类似，在此不再赘述。DC-DC变换器是一个简单的Buck-Boost电路，用于维持直流母线电压稳定。

前端整流器正常工作时，每个桥臂上的4个开关管分别有3种组合，可以据此定义桥臂的3个工作状态，即：1态、0态、-1态。为了简化分析，可进一步将每一桥臂等效简化为一个开关函数，定义开关函数如下：

$$S_a = \begin{cases} 1, S_{21}、S_{22} \text{导通}, \\ 0, S_{22}、S_{23} \text{导通}, \\ -1, S_{23}、S_{24} \text{导通}. \end{cases} \quad (1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1, S_{11}、S_{12} \text{导通}, \\ 0, S_{12}、S_{13} \text{导通}, \\ -1, S_{13}、S_{14} \text{导通}. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)(2)可知， S_a 和 S_b 均具有3种状态。当配电网稳定运行时，前端变换器直流侧的两只电容的电压相等。以 a 桥臂为例，当开关函数 $S_a = 1$ 时，若输入电流 i_s 为正值，电流从 a 点经 D_{22} 与 D_{21} 流到输出端；若电流 i_s 为负值，电流从输出端经 S_{21} 与 S_{22} 流到点 a 。当开关函数 $S_a = 0$ 时，若输入电流 i_s 为正值，电流从 a 点经 S_{23} 与 D_8 流到输出端的 o 点；若电流 i_s 为负值，电流从输出端的 o 点经 D_7 与 S_{22} 流到点 a 。当开关函数 $S_a = -1$ 时，若输入电流 i_s 为正值，电流从 a 点经 S_{23} 与 S_{24} 流到输出端；若电流 i_s 为负值，电流从输出端经 D_{24} 与 D_{23} 流到点 a 。 b 桥臂工作状态的分析与 a 桥臂类似，此处不再赘述。由以上分析可知， a 桥臂中点输出电压可以由开关函数和其直流侧输出电压表示：

$$V_{ao} = \frac{S_a}{2} V_{dc} \quad (3)$$

式中： V_{ao} 为 a 桥臂中点输出电压； S_a 为 a 桥臂开关函数； V_{dc} 为直流侧输出电压。

同理 b 桥臂中点输出电压为：

$$V_{bo} = \frac{S_b}{2} V_{dc} \quad (4)$$

式中： V_{bo} 为 b 桥臂中点输出电压； S_b 为 b 桥臂开关函数； V_{dc} 为直流侧输出电压。

用(3)减去(4)可以得到前端整流器输入端电压为：

$$V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = \frac{S_a - S_b}{2} V_{dc} \quad (5)$$

式中： V_{ab} 为前端整流器输入端线电压。

1.2 控制策略

该三电平电能路由器正常工作时，前端PWM变换器工作在整流状态，即配电网向负载输送功率。从输入侧角度看，可以得到其等效电路图，见图4，其对应的相量图见图5。

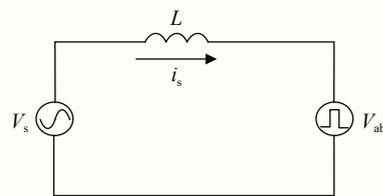


图4 前端PWM整流器输入侧等效电路图

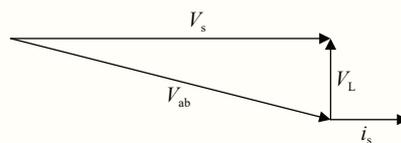


图5 前端PWM整流器输入侧电路相量图

由图5可知，前端PWM变换器工作在整流状态，输入电流 i_s 与电网电压 V_s 相位相同。此时，整流器能够保证输入电流谐波较小，且PWM控制技术能使输入电流接近正弦波，保证单位功率因数。这有助于降低配电网线路损耗，防止配电网系统组件过热。此外，通过在电网边缘注入无功功率可以调整前端变换器的功率因数，稳定直流母线上的电压，提高客户侧电能质量。

前端变换器的直流侧输出端等效电路框图推导与输入端类似。结合输入端与输出端的等效电路图以及电流环与电压环闭环控制原理，能够推导出前端整流器的控制策略框图，见图6。

由图6可知，控制框图由电压外环与电流内环组成。输入电流 i_s 经过 $\alpha\beta/dq$ 变换得到 i_{sd} 与 i_{sq} 。将参考电压 V_{dc-ref} 与实际测得电压 $V_{dc-link}$ 相比较，通过

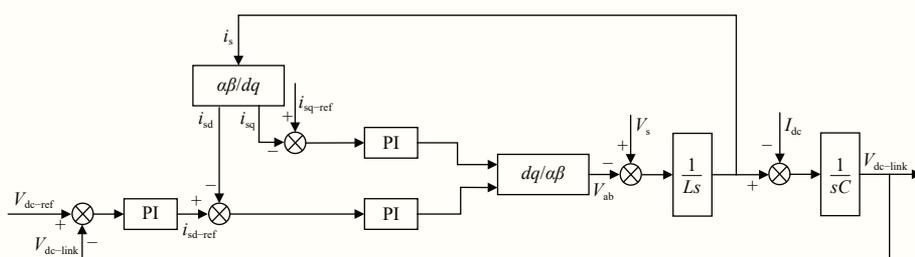


图6 前端PWM整流器控制策略框图

PID 控制器对差值进行处理得到 i_{sd} 的参考值 i_{sd-ref} ，再通过 PID 控制器分别对 i_{sd-ref} 与 i_{sd} 的差值和 i_{sq-ref} 与 i_{sq} 的差值进行处理，然后进行 $dq/\alpha\beta$ 反变换，接着叠加前馈电压 V_s 进行电压前馈控制等实现矢量电压电流双闭环控制^[10]。此处可以通过对 i_{sq-ref} 设定不同的数值实现不同程度的无功支撑，具体数据须结合实际光伏高渗透率配电网的参数进行设计。

2 网侧无功支撑技术验证

本部分将通过一系列数字离线仿真实验，验证网侧整流器能在配电网中正常运行，且在不影响输电电压的情况下向配电网提供无功支撑，鉴于三电平相对于两电平变换器在谐波削减方面的优势已在许多研究中得到检验，且本文重点关注的是无功补偿能力，所以此处不再对输出谐波进行仿真验证。

仿真模型在 Matlab2021b 版本的 Simulink 中搭建，将变流器接入 IEEE5 节点的电力系统中进行系统仿真，加入 30 kW 的无源负载作为负荷。其中网侧变流器的滤波电感为 1.8 mH，滤波电容为 3.3 mF，额定直流电压为 750 V。初始条件下，无功电流为 0 A。

由图 7~9 可知，该三电平电能路由器在光伏高渗透率配电网侧能够正常运行。通过分析图 7 可以得知电能路由器的输入电压与输入电流相位相同，

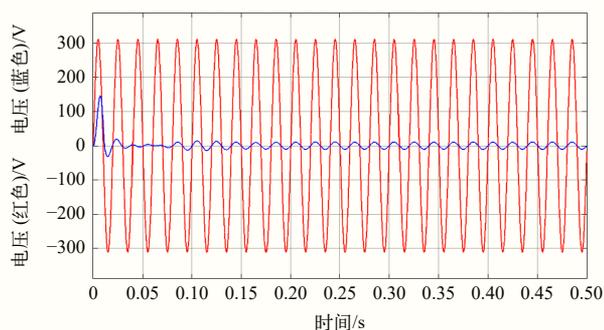


图7 正常运行时配电网侧输入端电压（红色）与电流（蓝色）

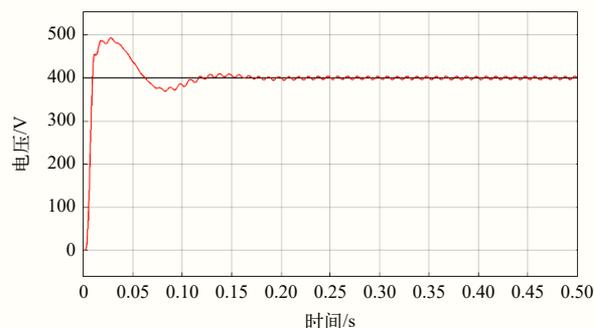
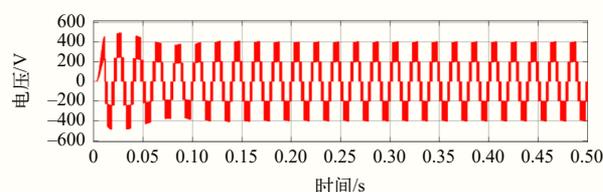
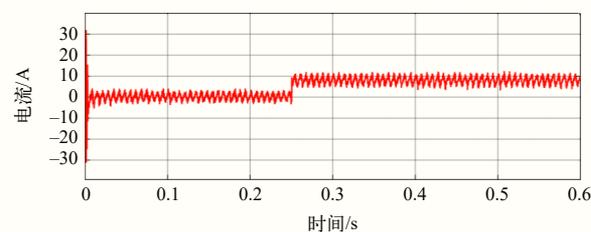


图8 正常运行时配电网侧输出端电压（红色）

图9 正常运行时配电网侧输入端电压 V_{ab}

功率因数为 1，说明该设备能够在配电网侧实现单位功率因数，保证输入电流为正弦波，提高客户侧电能质量。图 8 说明整流器输出端电压有较好的跟踪性与稳定性，有助于维持直流母线电压稳定。

已知三电平电能路由器能够在光伏高渗透率配电网中正常运行且性能良好，因此须对其无功支撑技术做进一步研究。设定在 0.25 s 注入大小为 8 A 的无功电流，该举措相当于往配电网终端注入一定量的无功功率以达到无功支撑的目的。由图 10 可知无功电流在 0.25 s 处产生了一个阶跃跳变，其幅值由 0 A 变为 8 A。图 11 记录的是有功参考电流 i_d^* 的

图10 无功电流 i_q 的值

值，其之所以在 0.25 s 处有电压下降 1~2 V 的趋势是因为 i_d^* 在双闭环控制中还受到电压外环闭环控制的影响，网侧整流器输出端电压因为无功功率的加入会产生微小波动，这间接地影响到了 i_d^* 的值。分析图 12 可知无功电流的加入对系统有功电流几乎没有影响，这证明了该无功支撑技术的可行性，说明面向光伏高渗透率配电网的三电平电能路由器在向配电网终端注入无功功率的同时不会影响客户侧负载电压。

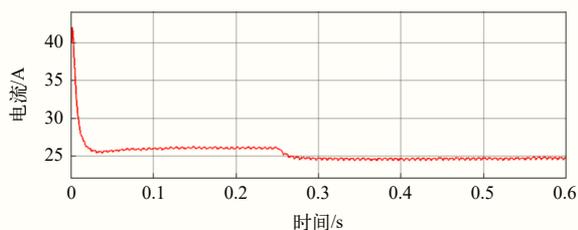


图11 有功参考电流 i_d^* 的值

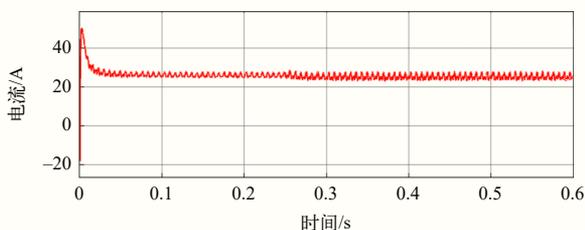


图12 有功电流 i_d 的值

由图 13 可知，当三电平电能路由器在 0.25 s 向配电网提供无功支撑后，网侧输入端电压与电流的波形在 0.25 s 前后几乎没有波动，这说明无功支撑技术不会对配电网本身造成负面影响，这从另一角度验证了该技术的可行性。

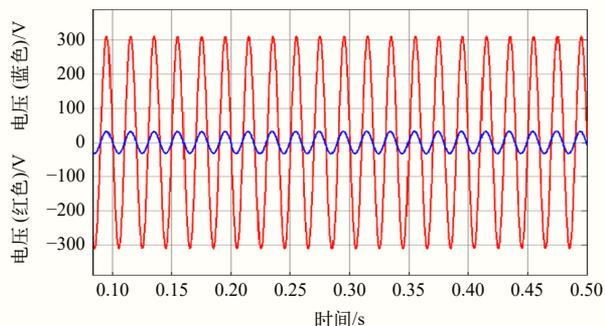


图13 注入无功功率后，网侧输入电压（红色）、输入电流（蓝色）

3 结束语

本文对光伏高渗透率配电网的三电平电能路由

器网侧无功支撑技术进行研究。该三电平电能路由器在电网与客户之间提供了缓冲，避免负载直接与配电网相连，不仅可以稳定电网侧的电压，减少谐波污染，还能提高客户侧的电能质量。本文提出的电能路由器采用背靠背的拓扑结构，即使输入侧配电网电压在一定范围内波动，也不会影响客户侧电压反馈控制的效果。通过一系列仿真验证可知，网侧整流器能够使输入电流维持正弦波，且与配电网电压相位一致，提高整个系统的输入功率因数，降低配电网线路损耗。此外，通过在某一特定时刻向配电网输送无功功率，观察无功支撑接入前后系统各项数据的变化，可以得知电能路由器向配电网提供无功支撑后，系统依旧可以正常运行，有功电流以及网侧输入端电压与电流几乎不会受到影响，进一步证明了该技术的有效性与可行性。

参考文献

- [1] CHIANG H C, MA T T, CHENG Y H, et al. Design and implementation of a hybrid regenerative power system combining grid-tie and uninterruptible power supply functions[J]. *IET Renew. Power Gener.*, 2010,4(1): 85-99.
- [2] CHOU H M, XIE L, ENJETI P, et al. Power electronics intelligence at the network edge (PINE)[C]. *IEEE Energy Convers. Congr. Exposit. (ECCE)*, 2017(10): 5214-5221.
- [3] RAMOS-RUIZ J A, ENJETI P, XIE L, et al. Power electronics intelligence at the grid edge—enables energy budgeting[C]. *IEEE Electron. Power. Grid (eGrid)*, 2018(11): 1-6.
- [4] MICHAEL STARKE, BAILU XIAO, PANKAJ Kumar Bhowmik, et al. Agent-Based Distributed Energy Resources for Supporting Intelligence at the Grid Edge[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2022,3(1): 69-78.
- [5] 陈燕东, 罗安, 陈智勇, 等. 一种快速无功支撑的阻容性逆变器并联控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34 (30): 5296-5305.
- [6] 王虎. 光伏并网发电及无功支撑控制策略研究[D]. 燕山大学, 2017.
- [7] 王常安, 刘俊勇. 提高 VSC 无功功率支撑能力的直流电压补偿控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35 (2): 63-74.
- [8] 凌正茂. 电网无功补偿的功率损耗及电压降分布式仿真分析[J]. *电子世界*, 2018 (22): 63-64.
- [9] 黄嘉鹏. 单相三电平 PWM 整流器控制策略研究[D]. 西南交通大学, 2012.
- [10] 陈倩, 杨艳, 武浩. 单相三电平 NPC 整流器新型控制策略的研究[J]. *电子设计工程*, 2019, 27 (24): 84-89.

作者简介

纪涛 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要工作方向: 电力系统及其自动化, E-mail: tao.ji@foxmail.com。

(责任编辑:袁航)