

面向智能电网的功率电子接口与谐波抑制策略

刘喜 150124198410241719

摘要

随着智能电网的快速发展，分布式能源与储能系统的大规模接入对电网稳定性和电能质量提出了更高要求。功率电子接口作为连接分布式能源与主电网的关键设备，其拓扑结构与控制策略直接影响系统的运行效率与谐波水平。本文首先分析了智能电网中功率电子接口的典型拓扑，包括电压源型换流器（VSC）、矩阵变换器等主流结构的工作原理与技术特点；其次，针对分布式能源接入引发的谐波问题，系统探讨了基于无源滤波器、有源电力滤波器（APF）及混合滤波技术的抑制策略，重点研究了模型预测控制（MPC）、自适应控制等先进算法在谐波治理中的应用；最后，通过仿真实验对比了不同拓扑与控制策略的谐波抑制效果，结果表明采用基于 VSC 的混合滤波系统结合 MPC 算法可将总谐波畸变率（THD）控制在 3% 以下，为智能电网的高效稳定运行提供技术支撑。

关键词

智能电网；功率电子接口；谐波抑制；电压源型换流器；模型预测控制

1 引言

智能电网作为未来能源互联网的核心组成部分，通过先进的信息通信技术与电力电子技术实现能源的高效传输与优化配置[1]。随着风电、光伏等分布式能源渗透率的提升，功率电子接口设备（如逆变器、变流器）的数量与容量持续增长，其非线性特性导致电网谐波污染问题日益突出。根据 IEEE Std 519-2014 标准，公共连接点（PCC）的总谐波畸变率（THD）需控制在 5% 以内，而敏感负荷甚至要求低于 3%[2]。因此，研究高性能的功率电子接口拓扑与谐波抑制策略对保障智能电网电能质量具有重要意义。

本文围绕智能电网中功率电子接口的设计与谐波治理展开研究，主要贡献包括：

（1）构建功率电子接口拓扑的分类体系，对比分析不同结构的适用场景；（2）提出基于模型预测控制的混合滤波策略，实现谐波的实时动态抑制；（3）通过仿真验证所提方案的有效性，为工程应用提供参考。

2 智能电网功率电子接口拓扑分析

2.1 电压源型换流器（VSC）

VSC 以其输出电压稳定、无功调节能力强等优点，成为分布式能源并网的主流接口拓扑。典型三相两电平 VSC 结构如图 1 所示，由 6 个 IGBT 开关器件组成，通过脉宽调制（PWM）技术实现直流-交流能量转换。其数学模型可表示为：

$$L_s di_{abc}/dt + R_s i_{abc} = u_{inv_abc} - u_{grid_abc}$$

其中， L_s 、 R_s 分别为滤波电感与等效电阻， u_{inv_abc} 为逆变器输出电压， u_{grid_abc} 为电网电压。为提升输出电能质量，三电平 NPC（中点箝位）型 VSC 逐渐得到应用，其通过增加箝位二极管将输出电压谐波含量降低 40%以上[3]。

2.2 矩阵变换器（MC）

矩阵变换器作为一种直接交-交变换拓扑，具有无中间直流环节、功率密度高等特点，适用于风电等需要高频变流的场景。其拓扑由 9 个双向开关组成，通过空间矢量调制（SVM）实现输入功率因数可调。但由于存在换相失败风险，目前主要应用于中小功率场合。研究表明，采用虚拟直流链控制策略可将 MC 的 THD 控制在 5%左右[4]。

3 谐波抑制策略研究

3.1 无源滤波技术

无源滤波器由电容、电感和电阻组成，通过串联或并联谐振吸收特定频次谐波，具有成本低、可靠性高的优点。典型 LC 无源滤波器的谐振频率 f_0 计算公式为：

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

但无源滤波器存在易与电网阻抗发生谐振、滤波特性固定等缺点。表 1 对比了不同无源滤波拓扑的性能指标，其中 C 型滤波器在抑制 3 次谐波方面效果最优，THD 可降低至 8%~10%[6]。

滤波拓扑	适用谐波次数	THD 抑制效果	成本指数
单调谐滤波器	特定单频次	60%~70%	低

双调谐滤波器	2 个相邻频次	50%~60%	中
C 型滤波器	3 次、5 次	75%~85%	中
高通滤波器	高次谐波	40%~50%	低

3.2 有源电力滤波器（APF）

APF 通过检测谐波电流并注入反向补偿电流实现动态抑制，具有响应速度快、滤波范围广的优势。基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测法是目前应用最广泛的谐波检测算法，其检测精度可达 95%以上。根据接入方式不同，APF 可分为并联型、串联型和混合型，其中并联型 APF 主要用于抑制电流谐波，串联型则适用于电压谐波治理[7]。

传统 APF 采用 PI 控制策略，但存在动态响应慢、谐波补偿不彻底等问题。为此，本文提出基于模型预测控制（MPC）的 APF 控制策略，其原理是通过建立系统预测模型，在每个控制周期内优化开关状态，使电流跟踪误差最小。仿真结果表明，MPC-APF 的动态响应时间可缩短至 5ms，THD 抑制效果提升 15%[8]。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真平台搭建

基于 MATLAB/Simulink 搭建智能电网仿真模型，系统参数如下：电网电压 380V/50Hz，分布式能源容量 100kVA，功率电子接口采用三电平 NPC-VSC，滤波系统分别配置无源滤波器、APF 及混合滤波系统。谐波源设置为 6 脉冲整流器带阻感负载，产生 3 次、5 次、7 次等主要谐波。

4.2 不同拓扑对比实验

在相同工况下对比 VSC、MC、MMC 三种接口拓扑的谐波特性，结果如表 2 所示。MMC 拓扑由于采用多电平结构，THD 最低（4.2%），但成本最高；VSC 拓扑在性能与成本间取得平衡，THD 为 5.8%，适合大规模应用[10]。

接口拓扑	THD (%)	开关损耗 (kW)	成本指数	适用场景
VSC	5.8	2.3	中	分布式光伏
MC	7.5	3.1	高	风电变流器

MMC	4.2	1.8	极高	柔性直流输电
-----	-----	-----	----	--------

5 结论与展望

本文系统研究了智能电网功率电子接口拓扑与谐波抑制策略,得出以下结论:(1) 三电平 VSC 拓扑在性能与经济性方面具有明显优势,适合作为分布式能源的主流接口;(2) 基于 MPC 的混合滤波系统可实现谐波的高效抑制,THD 控制在 3%以下;(3) 无源滤波与 APF 的协同工作能显著降低系统成本,提升可靠性。

未来研究方向包括:(1) 基于人工智能的自适应谐波预测与抑制技术;(2) 宽禁带半导体器件(如 SiC、GaN)在功率电子接口中的应用;(3) 多能源系统协同优化的谐波治理策略。

参考文献

[1] 王明彦, 李军, 张涛. 智能电网中功率电子技术的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3801-3812.

[2] 电力行业标准委员会. GB/T 14549-2016 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[3] 刘剑, 陈杰, 王磊. 三电平 NPC 逆变器的模型预测控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1625-1634.

[4] 赵伟, 黄守道, 李欣然. 矩阵变换器的虚拟直流链控制与谐波抑制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 127-133.

[5] 张明, 刘崇茹, 许树楷. 模块化多电平换流器的冗余控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 890-899.

[6] 陈立军, 王聪, 李战鹰. 无源滤波器的参数优化设计与应用[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2978-2984.