

[多电平变换器]

基于多电平变换器的电力传动系统谐波抑制技术研究

文/张涛
三门峡职业技术学院

在现代电力传动系统中，谐波问题已成为影响系统性能的重要因素，可能导致能量损耗、设备损坏和系统效率降低。多电平变换器是一种新兴的电力电子技术，通过其独特的拓扑结构和控制策略，能够有效抑制谐波，提高电力传动系统的稳定性与可靠性。探讨多电平变换器在电力传动系统中的谐波抑制技术，主要包括多电平变换器的基本概述、谐波问题的分析、基于多电平变换器的谐波抑制技术的各个方面（包括拓扑设计、谐波分析与建模、实时监测与诊断和控制策略优化）以及相关技术的应用测试。

在当前电力电子技术迅速发展的背景下，电力传动系统的谐波问题日益引起广泛关注。随着高功率电力电子设备和可再生能源接入的增加，谐波对电力传动系统的影响愈加显著，导致系统效率降低、设备过热、寿命缩短及电能质量下降，进而影响整个电力系统的稳定性与安全性。谐波的产生主要源于非线性负载、变频器及整流设备等，其频率成分的多样性和波形的畸变使得传统的谐波抑制方法面临诸多挑战。因此，研究新型谐波抑制技术具有重要的理论意义和实际价值。

多电平变换器概述

多电平变换器是电力电子技术的重要组成部分，其主要优点体现在能够根据增加输出电压级数，实现更高的电压分辨率与更低的谐波失真，使得电力转换过程更加平滑且高效。多电平变换器的基本构造通常包括多个电平单元，这些单元通过级联、并联等多种拓扑方式进行组合，从而形成多层次的输出电压级别，常见的拓扑包括二极管 clamped 多电平变换器、飞跨式多电平变换器以及模仿式多电平变换器等。在实际应用中，这些变换

器通过合理的控制策略能够在不同的负载条件下实现对谐波的有效抑制，确保系统运行的稳定性和电能质量的提升，特别是在变频调速、可再生能源接入以及电动汽车充电等领域，表现出极大的应用潜力。多电平变换器的控制策略通常涉及到空间矢量调制、脉宽调制（PWM）技术以及相位移调制等，能够有效优化输出电压的波形并降低总谐波失真（THD）。这些策略通过精确调控开关器件的导通与关断时序，使得输出波形趋近于理想正弦波，从而大幅度降低谐波的产生^[1]。

电力传动系统谐波问题分析

电力传动系统中谐波问题的产生主要源于非线性负载和电力电子变换器的广泛应用，谐波不仅对电力系统的能量质量造成显著影响，还导致电气设备的过热、振动和损耗，进而缩短设备的使用寿命和降低系统的整体效率。谐波的频率通常为基频的整数倍，其引入的谐波电流和电压会在电力网络中产生互相干扰，使得电能质量指标如电压总谐波失真（THD）大幅度上升，从而导致供电设备的性能下降。对于电动机和变压器等设备，谐波的存在会

引起附加损耗并降低其运行效率，同时还会导致谐波产生的涡流损耗，从而对电气设备的运行产生不良影响，造成设备的老化和失效。在电力传动系统中，谐波对电力电子变换器的影响同样显著，尤其是在应用变频器和其他电力电子设备时，谐波会引起电流波形的失真，影响系统的响应速度和控制准确度，降低系统的动态性能。针对谐波问题，需要进行有效的分析与建模，谐波分析工具如快速傅里叶变换（FFT）等被广泛应用，以便准确识别谐波成分并评估其对电力系统的影响程度。同时结合仿真软件进行建模与仿真，以深入了解谐波在不同工况下的行为^[2]。

基于多电平变换器的电力传动系统谐波抑制技术

1. 多电平变换器拓扑设计

在电力传动系统中，多电平变换器拓扑设计的原则旨在通过增加输出电压的级数，降低谐波失真，提高电能质量。在多电平变换器中，常见的拓扑结构包括二极管钳位型、飞跨型和模仿型等，这些拓扑各有其特点和应用场合。以二极管钳位型多电平变换器为例，该结构通过多个电压源并联，利用二极管的钳位作用有效控制输出电压的分配，能够实现较低的输出谐波和较高的输出电压水平，适合于大功率应用。飞跨型多电平变换器则通过级联不同电平的功率模块，实现更高的输出电压和更优的波形，特别适合用于需要大范围电压调整的场合。模仿型多电平变换器采用的相位移技术，通过相位差来生成多个电压级，使得输出电压更加平滑，谐波成分显著降低。在设计过程中，关键参数如电压水平、谐波成分和输出功率需在考虑到系统效率、成本和可靠性的基础上进行综合评估。具体情况见表1。

表1中的数据充分展示了各类多电平变换器拓扑的电压级数、输出电压、总谐波失真、应用场合以及最大功率等关键参数，这些因素共同影响着多电平变换器在电力传动系统中的实际应用效果^[3]。

2. 谐波分析与建模技术

在电力传动系统中，谐波分析与建模技术是评估和抑制谐波的关键，对谐波成分的精确识别与建模，可以为后续的谐波抑制策略提供科学依据。谐

表1 多电平变换器拓扑设计数据

拓扑类型	电压级数	输出电压/V	总谐波失真 (THD) (%)	应用场合	最大功率/kW	主要优点
二极管钳位型	3	300	< 5	大型电机驱动	100	成本低，结构简单
飞跨型	5	500	< 3	可再生能源接入	200	输出电压高，谐波较低
模仿型	7	700	< 1.5	电动车充电站	150	输出波形优良，控制灵活
矩阵型	9	900	< 2	分布式发电	300	高效能量管理，模块化设计
级联型	11	1 100	< 1	工业自动化	400	适应性强，输出稳定

波的分析通常采用快速傅里叶变换（FFT）技术，以便从时域信号中提取频域特征。设定电流信号为 $i(t)$ ，则其在频域的表示为

$$I(f) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j2\pi ft} dt \tag{1}$$

由式（1）可以得到电流信号的频谱 $I(f)$ ，该频谱包含各个谐波分量的幅值和相位信息。在实际应用中，根据对计算得到的频谱进行分析，识别出主要的谐波成分 I_k ，使得谐波的总电流可以表示为

$$I_{THD} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2} \tag{2}$$

总谐波失真（THD）是评价谐波影响的重要指标，其可以被定义为基波电流 I_1 与谐波电流 I_h 之比

$$THD = \frac{I_h}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \tag{3}$$

计算THD，可以直观反映出谐波对电力传动系统的影响程度，THD的值越高，表明谐波对系统的影响越显著。为实现对谐波的实时监测，采用基于自适应滤波算法的动态谐波监测方法，对电流信号的实时采样和处理，算法可以快速调整自身参数以适应变化的谐波特性。自适应滤波器的输出可以表示为

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} w(m)x(n-m) \tag{4}$$

式中， $y(n)$ 为滤波器的输出； $w(m)$ 为滤波器的权重； $x(n-m)$ 为输入信号； M 为滤波器的阶数。

对权重的更新过程进行优化，能够实现对实时信号的快速适应，权重更新规则可表示为

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n) \quad (5)$$

式中, μ 为步长因子; $e(n)=d(n)-y(n)$ 为误差信号; $d(n)$ 为期望信号。

该算法的核心在于根据误差反馈不断调整权重, 使得自适应滤波器能够高效抑制谐波, 改善电能质量^[4]。

3. 实时监测与诊断技术

在电力传动系统中, 谐波的产生是不可避免的, 其对系统性能的影响显著, 因此引入实时监测与诊断技术对谐波抑制至关重要。基于多电平变换器的系统中, 实时监测能够根据动态信号处理手段, 及时获取谐波含量的变化情况。为此, 可以采用快速傅里叶变换 (FFT) 算法对电流信号进行频谱分析, 公式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (6)$$

式中, $X(k)$ 为频域信号; $X(n)$ 为时域信号; N 为采样点数。

式 (6) 的应用使得系统能够在频域内清晰地识别出各个谐波成分的幅值和相位, 从而为后续的谐波抑制提供必要的数据支撑。在进行谐波分析后, 可以进一步利用谐波电流分解公式进行精确的谐波成分分离

$$I_h = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) e^{-j\frac{2\pi}{T}ht} dt \quad (7)$$

式中, I_h 为第 h 次谐波的有效值; $i(t)$ 为瞬时电流信号; T 为时间周期。

应用式 (7), 可以精准计算出每一谐波的电流成分, 使得系统能够实时掌握谐波变化, 便于采取相应的抑制措施。同时, 结合滤波器的设计理论, 采用自适应滤波算法实时调整滤波器的参数, 优化系统对特定谐波频率的抑制效果, 滤波器输出信号可表示为

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} h(m)x(n-m) \quad (8)$$

式中, $y(n)$ 为滤波器输出; $h(m)$ 为滤波器系数; $x(n)$ 为输入信号; M 为滤波器的阶数。

通过动态更新滤波器系数, 可以实现对变化谐波特性的适应, 从而增强对谐波的抑制能力, 保持电力传动系统的高效稳定运行。系统的整体性能可由谐波总畸变率 (THD) 进行评价, 其计算公式为

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (9)$$

式中, I_1 为基波电流有效值。

通过 THD 指标的监测, 可以全面反映系统在谐波抑制过程中的表现, 并为进一步的优化决策提供数据依据。

4. 控制策略优化

在基于多电平变换器的电力传动系统中, 控制策略优化能够提升谐波抑制性能, 旨在根据改进调制技术和控制算法, 降低系统运行中的谐波分量, 提升系统的动态响应特性和稳态性能。在实际应用中, 脉宽调制 (PWM) 技术和空间电压矢量调制 (SVPWM) 技术被广泛采用, 通过合理设计开关信号的产生, 实现对变换器输出波形的精确控制。在控制策略优化过程中, 采用预测控制和自适应控制方法能够有效提高系统对负载变化和干扰的鲁棒性。此外, 基于模糊逻辑控制 (FLC) 和神经网络控制 (NNC) 的新型控制策略也为谐波抑制提供新的思路, 应用智能算法实现对系统非线性特性的建模与识别, 进而优化控制决策, 减少谐波生成。在多电平变换器的控制策略中, 尤其是针对谐波分量的实时监测与反馈机制的引入, 能够实现对谐波电流的动态调整, 以适应负载特性的变化, 确保系统在各种工况下保持优良的电能质量。在控制优化的过程中, 数字信号处理技术通过快速傅里叶变换 (FFT) 等频域分析手段, 对系统输出进行频谱分析, 准确识别出主要谐波成分, 并据此进行针对性的控制策略调整, 进而提高系统的谐波抑制能力。

技术应用测试

在本实验中, 所使用的数据集是通过实测获得的, 数据采集过程是在特定的实验环境中进行的, 涉及到多电平变换器在不同负载条件下的运行状态。实验设备包括多电平变换器、负载设备以及高精度数据采集系统, 确保数据的准确性和可靠性。该数据集被用于评估优化后的控制策略, 其应用分为测试和验证两部分。在实验过程中, 所有数据均用于测试目的, 以检验控制策略优化的有效性和谐波抑制效果。整个数据集包含 1 000 条数据, 每条数据记录了实验过程中的重要参数。整个测试过程进行 10 次独立实验, 每次实验均基于相同

的实验设置，以确保结果的可重复性和可靠性。测试指标主要包括输出电压、输出电流、总谐波失真（THD）、控制信号频率以及系统效率。这些指标各自代表系统在不同运行状态下的关键性能参数，其中输出电压和输出电流反映变换器的基本电气特性，总谐波失真则衡量输出波形的质量，控制信号频率体现控制策略的响应速度，而系统效率则表明能量转换的有效性^[5]。测试数据见表2。

表2 测试数据

实验编号	输出电压/V	输出电流/A	总谐波失真(THD)(%)	控制信号频率/Hz	系统效率(%)
1	220.45	10.33	3.12	1.50	95.23
2	225.67	11.27	2.89	1.50	94.75
3	218.56	9.84	3.45	1.50	96.10
4	230.12	10.87	2.95	1.50	94.80
5	221.79	10.50	3.01	1.50	95.50
6	224.21	11.13	2.85	1.50	94.92
7	219.34	10.02	3.32	1.50	95.70
8	226.45	11.48	2.88	1.50	94.66
9	220.90	10.65	3.15	1.50	95.10
10	223.11	11.09	2.99	1.50	94.85

根据测试结果，可以看出在不同实验编号下，输出电压和电流都保持在合理范围内，THD值则在2.85%~3.45%，表明了较好的谐波抑制效果。控制信号频率均为1.50 Hz，这一频率设定使得控制策略能够高效运行。系统效率在94.66%~96.10%，反映出良好的能量转换性能。综上所述，实验结果验证了优化控制策略的有效性，为进一步提升电力传动系统的性能提供实证依据。

结束语

通过系统的研究与实践验证，能够为电力行业在提高电能质量、降低谐波影响和延长设备使用寿命等方面提供可行的解决方案，推动电力电子技术在工业及民用领域的广泛应用，为构建高效、稳定和智能的现代电力传输体系奠定基础。此研究不仅能够促进电力传动系统的技术进步，还将推动相关标准和规范的制定，以应对日益复杂的电力需求和挑战。这既是时代发展的需求，也是实现可持续电力发展的重要途径，具有深远的现实意义和应用价值。EA

(收稿日期：2024-11-13)

参考文献

[1] 马文忠, 孙鹏, 周冠宇, 等. 模块化多电平变换器两段式模型预测控制[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1419-1427.

[2] 陈天牧, 曾国宏, 王静, 等. 抑制电流纹波的模块化多电平直流变换器移相调制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 206-214.

[3] 余斌, 李辉, 赖锦木, 等. 基于桥臂电流控制的模块化多电平储能系统谐波抑制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 82-92.

[4] 李天皓, 姚磊, 张帅龙. 模块化多电平变换器改进两段式模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 96-104.

[5] 陈天牧, 曾国宏, 王静, 等. 抑制电流纹波的模块化多电平直流变换器移相调制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 206-214.

