

电力电子变换器电磁干扰抑制技术研究

李恒森 41132119820314391X

摘要

电力电子变换器是电能变换与控制的核心装置，广泛应用于新能源发电、电动汽车、工业传动等领域，但其开关器件的高频通断动作会产生强烈的电磁干扰，影响周边电子设备的正常运行，甚至威胁系统稳定性。本文首先分析了电力电子变换器电磁干扰的产生机理与传播路径，从传导干扰和辐射干扰两个维度梳理了干扰的主要来源，随后对当前主流的电磁干扰抑制技术进行分类阐述，包括无源滤波、有源滤波、布局优化、软开关技术方向，对比分析不同技术的适用场景与优缺点，最后对电力电子变换器电磁干扰抑制技术的未来发展方向进行展望，为相关领域的技术研发与工程应用提供参考。

关键词：电力电子变换器；电磁干扰；抑制技术；电磁兼容

一、电力电子变换器电磁干扰的产生机理与传播路径

电力电子变换器的核心功能是通过功率半导体开关器件的高频通断实现电能形式的转换，在开关过程中，器件端电压和电流会在极短时间内发生剧烈跳变，产生高幅值的 di/dt 与 du/dt ，这是电磁干扰产生的根本来源。根据干扰传播路径的不同，电力电子变换器的电磁干扰可以分为传导干扰和辐射干扰两类，其中传导干扰通过电源线、地线等导电介质传播，频率通常在 30MHz 以下，而辐射干扰通过空间电磁场向外扩散，频率多集中在 30MHz 以上。

传导干扰又可进一步划分为共模干扰和差模干扰，差模干扰是指存在于两根电源线之间的干扰信号，主要由开关器件换流过程中线路阻抗的电压波动产生，共模干扰则是指电源线对地之间的同相位干扰，主要源于开关器件与散热片之间的寄生电容，寄生电容在高频 du/dt 的作用下会产生位移电流，进而形成共模干扰通路。对于辐射干扰而言，其主要来源是变换器中的大电流回路以及长导线，这些结构在高频信号作用下相当于发射天线，将电磁能量辐射到周边空间，影响其他敏感电子设备的工作。

二、主流电磁干扰抑制技术分析

2.1 无源滤波技术

无源滤波是当前工程中应用最广泛的电磁干扰抑制技术，主要通过变换器的输入或输出端口加装无源 EMI 滤波器，实现对干扰信号的衰减。无源 EMI 滤波器通常由电感、电容、共模扼流圈等无源器件构成，针对共模干扰和差模干扰分别设计相应的滤波通路：共模扼流圈对共模信号呈现高阻抗，能够有效阻挡共模干扰的传播，X 电容并联在两根电源线之间，用于衰减差模干扰，Y 电容则连接在电源线与地之间，用于分流共模干扰电流。

无源滤波技术的优点是结构简单、成本低廉、可靠性高，适用于大多数中小功率电力电子变换器场景，但其也存在明显的局限性：一方面，无源滤波器的体积和重量较大，难以满足新能源汽车、航空航天等对功率密度要求较高的应用需求；另一方面，无源滤波器的参数固定，无法适应变换器工作状态变化带来的干扰频谱偏移，对于低频段干扰的抑制效果有限，同时寄生参数会影响滤波器在高频段的抑制性能。

2.2 有源滤波与有源抵消技术

有源电磁干扰抑制技术通过主动检测干扰信号，生成一个与原干扰幅值相等、相位相反的补偿信号，实现对干扰信号的抵消，主要分为有源滤波和有源干扰抵消两类。有源滤波技术通常将有源器件嵌入到滤波通路中，通过反馈控制实现对干扰信号的动态跟踪抑制，相较于无源滤波，有源滤波能够在更低的频率范围内实现更高的衰减倍数，同时体积更小，适合功率密度较高的应用场景。有源干扰抵消技术则专门针对共模干扰进行抑制，通过检测原边共模电流，在副边生成反向共模电流，直接抵消原有的干扰，不需要改变变换器主电路的结构，兼容性更好。

有源抑制技术的优势在于能够自适应跟踪干扰的变化，抑制效果优于传统无源滤波，且体积重量更小，但其缺点也较为突出：有源电路需要额外的供电与检测模块，增加了系统的复杂度和成本，同时有源器件本身也会产生新的电磁干扰，在高频段应用时容易出现稳定性问题，对控制带宽的要求较高，目前在大功率变换器中的应用还较为有限。

2.3 电路拓扑与软开关技术优化

从干扰产生的源头进行抑制是降低电力电子变换器电磁干扰最根本的方式，

通过优化电路拓扑、采用软开关技术降低开关过程中的 di/dt 与 du/dt ，能够从源头上减少干扰的产生。软开关技术通过在电路中引入谐振环节，使得开关器件在开通前实现零电压，关断前实现零电流，消除开关过程中电压电流的重叠，不仅能够降低开关损耗，还能够有效减缓电压电流的变化速率，降低电磁干扰的强度。例如，准谐振软开关变换器、全桥 LLC 谐振变换器等拓扑，相较于传统硬开关变换器，其电磁干扰水平能够降低 10dB 以上。

除了软开关技术，还可以通过拓扑结构改进抑制共模干扰，例如采用背对背开关拓扑、平衡拓扑结构，使得不同桥臂产生的共模干扰相互抵消，能够有效降低共模电压的幅值，减少寄生电容产生的共模电流。源头抑制技术不需要额外增加滤波环节，不会增大系统体积，同时能够降低损耗，提升效率，是当前电磁干扰抑制技术的重要发展方向。

2.4 布局与布线优化技术

合理的印制电路板布局布线能够有效减少寄生参数，切断干扰的传播路径，降低电磁干扰的辐射强度。在布局方面，应当将功率回路的元器件集中布置，尽可能缩短功率回路的走线长度，减小功率回路的面积，从而降低大电流变化产生的辐射干扰；将敏感的控制电路与功率电路分开布置，设置独立的接地层，避免功率干扰耦合到控制回路。在布线方面，功率走线应当尽可能加宽，降低走线的寄生电感，对于高压高频走线，应当避免长距离直角布线，减少信号反射产生的额外干扰；采用多层板设计，将电源层和地层完整分割，能够有效降低地层阻抗，减少共模干扰的产生。

三、电力电子变换器电磁干扰抑制技术的发展趋势

随着碳化硅、氮化镓等宽禁带半导体器件的普及，电力电子变换器的开关频率不断提升，目前已经进入兆赫兹级别，更高的开关频率虽然能够提升变换器的功率密度，但也使得电磁干扰的频率更高、频谱更复杂，抑制难度进一步增大，未来电磁干扰抑制技术将朝着几个方向发展：

第一，复合化抑制技术，单一的抑制技术已经无法满足高频变换器的 EMI 要求，将源头抑制、无源滤波、有源抵消相结合，发挥不同技术的优势，在不同频率段分别实现干扰抑制，能够在保证抑制效果的同时减小系统体积，降低成本，例如采用软开关技术降低源头干扰强度，再搭配小型化无源滤波器满足 EMI 标准，整体性能优于单一的大型无源滤波器方案。

第二，智能化抑制技术，结合自适应控制、人工智能算法，实现对电磁干扰的动态检测与自适应抑制，能够根据变换器的工作状态自动调整抑制参数，应对

不同负载、不同开关频率下干扰频谱的变化，提升抑制效果的稳定性，尤其适用于新能源发电等工况变化频繁的应用场景。

第三，集成化抑制技术，将 EMI 抑制模块与功率变换器主电路进行集成设计，开发内置 EMI 抑制功能的功率模块，减少外部寄生参数的影响，进一步提升系统的功率密度，降低设计复杂度，这也是模块化电力电子装置的重要发展方向。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 机械工业出版社, 2009.
- [2] 沙斐. 机电一体化系统电磁兼容设计[M]. 北京理工大学出版社, 2004.
- [3] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 高等教育出版社, 2011.