[光伏]

面向光伏微电网的固态变压器高频隔离拓扑结构优化

文/李澍　郭昱
内蒙古电力（集团）有限责任公司包头供电公司

为提高变压器输出功率的密度，控制能量转换中的损耗，开展面向光伏微电网的固态变压器高频隔离拓扑结构优化方法设计。计算SiC器件的导通电阻、截止频率、开关损耗等参数，掌握面向光伏微电网的固态变压器SiC器件高频特性；根据其高频特性，进行新型固态变压器拓扑结构隔离级参数设计；引进多目标优化算法，综合考虑多个因素，获得最优的拓扑结构，实现对其功率密度的优化。

随着全球对可再生能源的日益重视，光伏发电作为其中的重要一环，正经历着快速发展。光伏微电网作为光伏发电系统的重要组成部分，能够实现电力的就地消纳与高效利用，对于提高能源利用效率、增强电力系统稳定性具有重要意义[1]。现有的电力变压器在光伏微电网中的应用存在诸多局限，如效率低下、响应速度慢、难以适应分布式可再生能源的波动性等问题，因此，技术人员提出变压器（SST）在光伏微电网中的应用。

固态变压器作为一种新型的电力变换装置，具有灵活丰富的交直流端口配置，能够显著简化含分布式可再生能源发电系统的微电网的接入方式[2]。相比于常规变压器，固态变压器在电能质量、响应速度、灵活性等方面具有显著优势，能够更好地适应光伏微电网的运行需求。特别是在高频隔离拓扑结构方面，固态变压器展现出巨大的应用潜力。但光伏微电网中的电源和负载具有多样性和不确定性，高频隔离拓扑结构在实现高效电能变换的同时，也带来了电磁干扰、热管理和成本增加等问题。因此，如何优化固态变压器的高频隔离拓扑结构，以提高其性能、降低成本、增强系统的稳定性和可靠性，成为当前研究的热点和难点。

因此，本文将通过深入研究固态变压器的高频隔离拓扑结构，优化其设计和控制策略，进一步提高光伏微电网的运行效率和稳定性，为可再生能源的广泛应用提供有力支持。

面向光伏微电网的固态变压器SiC器件高频特性计算

为实现对固态变压器高频隔离拓扑结构的优化设计，采用设计SiC器件高频特性参数，旨在评估SiC器件在高频工作条件下的性能，确保固态变压器能满足光伏微电网对高效率、高稳定性和紧凑设计的需求[3]。导通电阻是固态变压器能量损耗的重要组成部分，通过精确计算，可以优化器件尺寸和材料选择，以降低损耗，提升整体效率。SiC器件的导通电阻的计算公式为

$$R_{on}=\rho\frac{L}{Wd} \tag{1}$$

式中，R_{on}为导通电阻；ρ为材料的电阻率；L为器件长度；W为器件宽度；d为器件厚度。

在此基础上应明确开关损耗直接影响固态变压器的能效和温升，通过对此参数的估算，可以指导开关器件的选择和驱动电路的设计，以减少损耗，

提高能效。SiC器件的开关损耗计算公式为

$$E_{se} \approx \frac{1}{2} C_{oss} V_{ds}^{\ 2} + Q_g V_{gs} \tag{2}$$

式中，E_{se}为开关损耗；C_{oss}为输出电容；V_{ds}为漏源电压；Q_g为栅极电荷；V_{gs}为栅源电压。

完成上述计算后，进行SiC器件的截止频率，确定器件的工作频率上限，为固态变压器的频率选择和拓扑结构设计提供依据[4]。计算公式为

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_g C_{iss}} \tag{3}$$

式中，f_c为截止频率；R_g为栅极电阻；C_{iss}为输入电容。

通过上述公式的计算，得到SiC器件的高频特性参数集合$\zeta = \{R_{on}, E_{se}, f_c\}$，以此方式为固态变压器高频隔离拓扑结构的优化设计提供数据支持，全面提升固态变压器在光伏微电网中的性能表现。

新型固态变压器拓扑结构隔离级参数设计

完成SiC器件高频特性计算后，进行新型固态变压器拓扑结构隔离级的参数设计，旨在确保固态变压器在高频、大功率环境下稳定运行，同时优化其性能。设计中，隔离级中采用的高频变压器不仅具有储能与续流的功能，还是实现电气隔离的关键组件[5]。其电感值的选择需兼顾功率传输效率和电流波动控制。根据其高频特性参数，计算传输功率，公式为

$$P(\zeta) = f V_{in} I(L)(1-D)^2 \tag{4}$$

式中，P为传输功率；f为开关频率；V_{in}为输入电压；$I(L)$为电感电流；D为占空比。

为了最大化传输功率并控制电流波动，高频变压器的电感值L需满足

$$L = \frac{V_{in} D(1-D)}{f \Delta I(L)} \tag{5}$$

式中，$\Delta I(L)$为允许的电感电流波动范围。

通过上述计算，可以确定高频变压器的最佳电感值。在隔离级的输入和输出端，需要增加滤波电感以平滑电流波形，减少谐波含量。滤波电感的值取决于所需滤除的谐波频率和允许的电流波动。根据电感滤波的基本原理，滤波电感L_f可表示为

$$L_f = \frac{V_{ripple} T}{2\Delta L_f} \tag{6}$$

式中，V_{ripple}为允许的电压波动；T为开关周期，ΔL_f为允许的电流波动。

通过合理设计滤波电感，有效减少谐波含量，提高固态变压器的电能质量。在隔离级中，电容主要用于储能和稳定直流母线电压，其值的选择需考虑功率平衡、电压波动和电容的寿命[6]。根据电容储能公式和电压波动要求，隔离级电容C可表示为

$$C = \frac{I_{dc} DT}{2\Delta V} \tag{7}$$

式中，I_{dc}为直流母线电流，ΔV为允许的电压波动。

设计最优电容值，可以确保固态变压器在功率波动时仍能保持稳定的直流母线电压。综合上述公式计算结果，得到新型固态变压器拓扑结构隔离级最优电感、电容参数。

基于多目标优化算法的拓扑结构功率密度优化

在完成拓扑结构隔离级参数的设计后，进一步对固态变压器的功率密度进行优化，以提高其整体性能和效率。在此过程中，引进多目标优化算法，综合考虑多个因素，获得最优的拓扑结构[7]。设计中，将固态变压器的功率密度优化过程转化为一个多目标优化问题。设x为设计变量的向量，包括拓扑结构的各个参数（如L_f、C、f等）[8]。设计目标为找到一组最优的设计变量x_{opt}，使得多个目标函数同时达到最优

$$Y = \sum x_{opt} = \sum \{F(x), L_f(x), C(x), f(x)\} \tag{8}$$

式中，Y为最优目标函数；$F(x), L_f(x), C(x), f(x)$为固态变压器的功率密度L_f、C、f的最优条件。

为了求解多目标优化问题，采用GA优化算法，通过模拟自然选择或群体行为的过程，在解空间中搜索最优解[9]。此过程计算公式为

$$x_{new} = \alpha x_1 + (1-\alpha) x_2 \tag{9}$$

式中，x_{new}为新生成的设计变量；x_1、x_2为父代设计变量；α为交叉系数。

求解中，定义适应度函数评估每个设计变量x的优劣。适应度函数可以基于上述目标函数帕累托前沿构建[10]。通过迭代搜索和选择操作，算法逐渐收敛到一组最优解集。设$Y(x)$为目标函数向量，x_1、x_2为两个设计变量。若$Y(x_1)$在所有目标上都不劣于$Y(x_2)$，且至少在一个目标上优于$Y(x_2)$，则称x_1帕累

托支配x_2，帕累托前沿是所有不被其他设计变量帕累托支配的设计变量集合。通过多目标优化算法，可以获得一组最优解集，即帕累托前沿上的设计变量集合。设计变量多个方面均表现出良好的性能。以此种方式，实现拓扑结构的优化。

实例应用分析

1. 实验准备

本次实验选取某发电单位作为试点，该单位的光伏微电网系统已初具规模，总装机容量达到数兆瓦，其中分布式光伏发电系统占据主导地位。该单位的光伏微电网配置了高性能的储能系统，储能系统的电池容量达到了500 A·h以上，足以应对大规模的光伏发电波动和负载需求变化。此外，该储能系统内部采用大量的高性能电池单元和先进的电池管理技术，总重量超过了5 t，电池单元不仅具有高能量密度和长寿命的特点，还能够在不同时间段和负载需求下实现精准的电能调节，从而确保光伏微电网的稳定运行。

深入研究中发现，该单位采用了固态变压器技术，实现了电力传输的高效、节能和环保。固态变压器利用高频变压器实现隔离功能，大幅度减小了变压器的重量和体积，同时提高了电网的供电质量和稳定性。据初步统计，与传统变压器相比，固态变压器的能效提高了约20%，损耗降低了近30%。根据本次实验需求，使用MATLAB搭建测试环境，进行固态变压器仿真模型的构建，模型录入参数见表1。

表1　固态变压器仿真模型设计参数

序号	项目	参数
1	输入滤波电感量/mH	2.0
2	整流器后端电容值/μF	1.8
3	隔离级前端电感规格/μH	18.3
4	隔离级输入电容容量/μF	800
5	系统额定电压等级/V	380
6	工作频率设定值/Hz	50
7	固态变压器效率（%）	≥98
8	高频隔离变压器频率/kHz	10
9	固态开关器件最大耐受电压/V	1200
10	系统整体功率因数	≥0.99

为了测试面向光伏微电网的固态变压器高频隔离拓扑结构优化方法，对测试现场进行布置，确保实验场地安全隔离，配置必要的防护设施，以应对可能的电气安全挑战。同时，设置高准确度的测量仪表，监控固态变压器输入输出的电压、电流波形及频率等关键参数，配置数据采集系统，实现数据的实时记录与分析。

在此基础上，采用专用高频电缆连接固态变压器与各测试终端，以减少信号衰减和电磁干扰。所有接线均经过严格检查，确保连接牢固且绝缘良好，避免实验过程中出现短路或漏电风险。测试现场布置如图1所示。

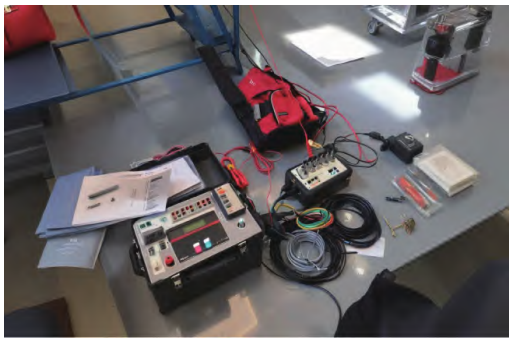

图1　固态变压器高频隔离拓扑结构优化测试布置

按照上述步骤，完成本次实验的相关准备工作，为拓扑结构优化效果的检验予以技术支持。

2. 功率密度检验

功率密度作为衡量固态变压器高频隔离拓扑结构优化效果的关键指标，表示单位体积或重量内所能提供的功率大小，该指标直接反映了固态变压器在紧凑性和高效性方面的综合表现。

在检验过程中，需要准确测量固态变压器的实际体积和重量，通过测量固态变压器的输入功率和输出功率，可以计算出其实际提供的功率值。将实际提供的功率值除以固态变压器的体积或重量，即可得到功率密度指标。在满足光伏微电网需求的前提下，功率密度越高，优化效果越好。对优化前、后的变压器输出功率密度进行检验，其结果如图2所示。

从图2所示的结果可以看出，应用设计的方法进行固态变压器高频隔离拓扑结构优化，优化前变压器输出的功率密度在300～400 W/m³之间，优化后，功率密度在450～650 W/m³之间，由此可以说明，设计的方法在提高变压器输出功率密度中起到可较好的效果。

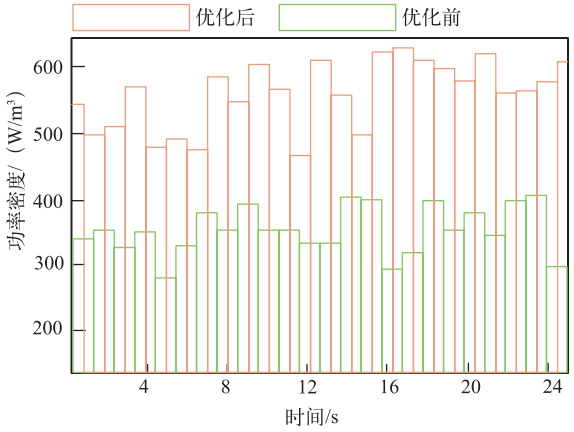

图2　功率密度检验

3. 固态变压器能量转换损耗

固态变压器能量转换损耗包括导体电阻损耗、磁心损耗以及开关损耗等多个方面。导体电阻损耗是由于固态变压器内部电流通过导体时产生的热量损失，取决于导体的电阻率和电流大小。磁心损耗则是由于磁心在交变磁场中发生磁化和去磁化过程时产生的能量损失，与磁芯材料的特性、工作频率以及磁通密度等因素密切相关。此外，开关损耗是由于固态变压器中开关器件在开通和关断过程中产生的能量损失，受到开关速度、开关电压和电流波形以及开关器件自身特性的影响。

在评估固态变压器能量转换损耗时，需要综合考虑以上各种损耗因素，对其进行分析，并采取针对性的措施进行损耗控制，以此种方式，提升固态变压器在光伏微电网等应用场景中的性能和可靠性。对优化前、后固态变压器能量转换损耗进行检验，其结果如图3所示。

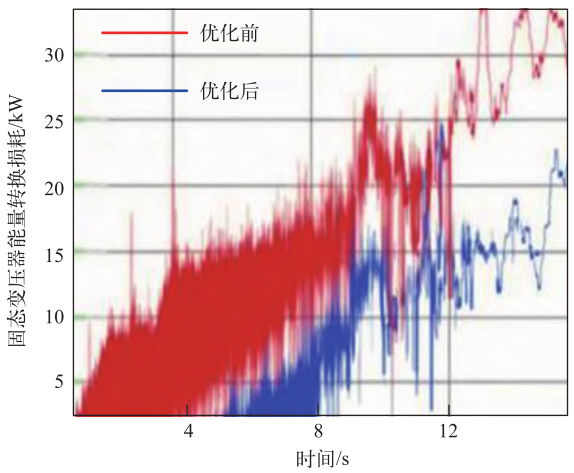

图3　固态变压器能量转换损耗检验结果

从图3所示的实验结果可以看出，相比优化前，优化后的固态变压器能量转换损耗较小。

4. 电流谐波含量检验

电流谐波含量检验是确保电力系统稳定运行和设备安全的重要环节，该指标用于衡量电流中谐波成分所占的比例，以评估其对电气设备的潜在危害。谐波电流是指交流电流中除了基波（即电网工频）外，还包含的其他频率成分。谐波成分可能由非线性负载、电力电子设备等因素产生，对电网的电能质量产生负面影响。对优化前、后的变压器输出电流谐波含量进行检验，其结果如图4所示。

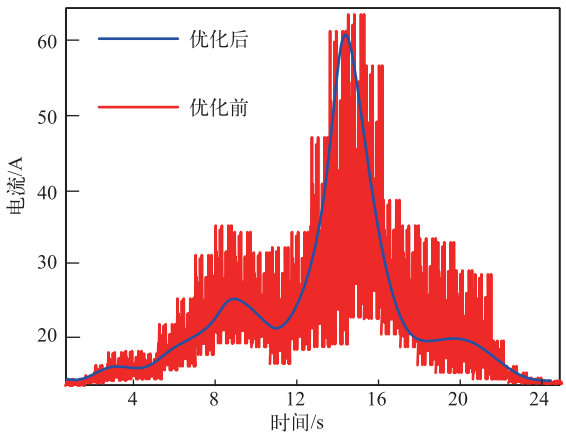

图4　电流谐波含量检验

从图4所示的实验结果可以看出，优化前，变压器输出电流谐波含量较多，虽然可以通过曲线基本分辨电流峰值与变化趋势，但对电能服务质量造成了严重影响。优化后，电流中几乎不含谐波，电能质量显著上升。

结束语

在光伏微电网中，高频隔离变压器通过电磁感应原理，在高频交流电的作用下实现电能的传递和电压的变换。此种高频隔离拓扑结构不仅能够有效地保护电路和人身安全，防止电气故障的传播，还能够提高系统的功率密度和效率。对于光伏微电网而言，高频隔离拓扑结构能够更好地适应分布式可再生能源的波动性，提高系统的稳定性和可靠性。针对光伏微电网的特点，采用了SiC器件的高频特性进行计算，确保了固态变压器在高频环境下能够保持高效稳定运行。新型固态变压器拓扑结构的隔离级参数设计，进一步提升了变压器的性能，使其

能够更好地适应光伏微电网的复杂环境。此外，方法还运用了多目标优化算法对拓扑结构的功率密度进行优化，不仅提高了变压器的紧凑性和高效性，还满足了光伏微电网对高功率密度的需求。通过对固态变压器能量转换损耗和电流谐波含量的检验，验证了优化方法的有效性，为固态变压器在光伏微电网中的应用提供了有力的技术支持。**EA**

（收稿日期：2025-04-17）

参考文献

[1] 孙瑶，樊艳芳，卢俊龙，等．陆上风电直流汇集系统拓扑结构优化设计方法[J]．电力系统自动化，2023，47(3)：142-152．

[2] 甘育东，王军，古世甫，等．非均匀温度分布下温差发电阵列拓扑结构优化[J]．科学技术与工程，2023，23(29)：12585-12593．

[3] 修佳鹏，刘卉馨，杨正球，等．NDN区块链网络拓扑结构性能分析及优化模型[J]．通信学报，2024，45(11)：46-58．

[4] 李星，高建良，张学博，等．BP神经网络预测地表沉降参数的算法与拓扑结构寻优[J]．中国安全生产科学技术，2023，19(6)：90-97．

[5] 李健，陈红，李大伟，等．高速高功率密度无轴承永磁薄片电机设计与优化[J]．电机与控制学报，2024，28(6)：171-180．

[6] 郭玲伟，洪小飞，彭冲冲．离散变量影响下激光通信网络拓扑结构优化研究[J]．激光杂志，2024，45(7)：199-204．

[7] 郭新泽，石顺义，周克民．基于双线性类桁架材料模型的拉-压杆拓扑优化设计[J]．力学季刊，2024，45(2)：419-428．

[8] 张伟，罗世刚，白永利，等．基于节点电压概率公模型的区拓扑优化研究[J]．中南民族大学学报：自然科学版，2023，42(5)：689-695．

[9] 刘鸿鹏，滕禹，卢壮，等．低直流链电压尖峰的二极管辅助型优化Y源逆变器[J]．高电压技术，2023，49(6)：2569-2578．

[10] 梁宇涛，林舜江，冯祥勇，等．海上风电场交流集电和多端柔直输电并网系统多目标优化规划[J]．电网技术，2024，48(6)：2404-2415．