

电力系统中功率器件损耗标定方法的应用研究

张 猛, 刘昊晟, 姚建华

(北京电力设备总厂有限公司, 北京 101100)

摘 要 功率器件损耗对电力系统效率与热稳定性具有决定性影响。传统标定方法受限于测试条件及参数假设, 难以覆盖复杂工况。本文采用热电耦合建模与多工况数据拟合相结合的标定思路, 对器件在不同温度、频率和负载下的电热特性进行定量分析。实验结果表明, 该方法能有效提升损耗识别精度与参数稳定性, 在高压、高频功率变换设备中具备良好的工程适应性与推广价值。

关键词 电力系统; 功率器件; 损耗标定; 热电耦合; 多工况建模

基金项目 光伏发电及直流汇集变换装备关键技术及样机研制(研发工号: 99015)。

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.002

0 引言

电力系统向高效、智能方向发展, 对功率器件的能量管理提出了更高要求。功率密度提升带来更严重的电热应力问题, 使传统静态计算模型难以反映动态损耗规律。不同材料体系和拓扑结构下的开关特性差异, 使损耗分析成为影响系统可靠性的关键环节。基于实验测量、热特性建模及多参数耦合优化的标定研究, 可为提升器件运行精度、散热效率与长期稳定性提供重要技术支撑。

1 功率器件损耗分类与影响因素分析

功率器件在电力系统中承担着能量变换与开关控制的重要功能, 其损耗类型主要包括导通损耗、开关损耗、反向恢复损耗及高频寄生损耗。导通损耗由器件导通电阻与负载电流共同决定, 在大电流低频工况下占比显著; 开关损耗由电压与电流重叠产生, 受 dv/dt 、 di/dt 、驱动电压及电路布局影响显著, 是高频系统的损耗核心; 反向恢复损耗常见于二极管, 恢复期间的尖峰电流与反向电压叠加易导致热失控; 寄生损耗则源于封装寄生电感、电容与高频谐振^[1]。在实际应用中, 器件材料(如 Si、SiC、GaN) 决定其导通与开关特性, 封装结构与散热路径影响热响应与稳定性, 控制策略

如 PWM 占空比、软开关技术亦会改变损耗时域分布。不同拓扑与应用场景下, 损耗行为呈现出高度非线性与工况敏感性, 需通过多维参数建模与系统级优化设计加以控制。

2 电力系统中功率器件损耗标定方法分析

2.1 数据手册法与静态参数提取法

数据手册法基于器件制造商提供的参数表, 通过查阅导通电阻 $R_{ds(on)}$ 、饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 、开关能量 $E_{on/off}$ 、热阻 $R_{ds(on)}$ 开关损耗估算采用:

$$P_{sw} = f_s \cdot (E_{on} + E_{off}) \quad (1)$$

式(1)中, f_s 为开关频率。这种方法计算简便、适合早期方案评估, 但因手册数据基于标准温度(如 25 °C)和理想波形, 实际工况下的动态偏差常导致较大误差。

表 1 展示了典型功率器件在 25 °C 条件下的理论损耗与实测对比, 静态估算误差均超过 9%, 反映出其局限性:

数据手册法虽便于初步设计评估, 但在复杂热-电耦合系统中, 需谨慎使用或与实测验证结合应用。

2.2 双脉冲法与动态开关损耗测试技术

双脉冲测试法是目前应用最广泛的动态损耗测量方法之一, 特别适用于硬开关场景下的 IGBT 与 MOSFET

表 1 功率器件典型参数与静态损耗估算对比 (25 °C)

器件型号	额定电压 (V)	$R_{ds(on)}$ (m Ω)	$E_{on/off}$ (mJ)	P_{calc} (W)	相对误差 (%)
SiC MOSFET 1 200 V/40 A	1 200	80	2.8	38.5	42.0
IGBT 1 200 V/50 A	1 200	—	4.6	44.2	49.5
GaN HEMT 650 V/30 A	650	45	1.1	22.8	25.0 (补)

器件。其原理是通过两次控制脉冲完成单次开通与关断动作，在已知电压、电流、开关时间及驱动参数的条件下，测定导通与关断阶段的瞬时能量，并利用积分法计算器件的开关损耗。实验电路通常包括栅极驱动模块、可调直流母线、负载电感和高速电流电压采样系统，可在严格控制的工况下获得较高精度的测试结果。

该方法的突出优点在于能够独立分离导通与关断过程，使不同温度、不同驱动电压下的损耗数据得以系统采集，从而为建模与优化提供可靠依据。通过调整栅极电阻、电流幅值和母线电压，可建立多组开关特性曲线，形成可视化损耗数据库，便于后续算法拟合与参数修正。部分实验系统还引入温控装置，实现结温控制与热稳态保持，以提高数据的可重复性。

受测试条件限制，双脉冲法在高频、软开关及谐振拓扑中难以直接应用，因其无法完全还原器件在系统连续运行状态下的真实热-电耦合效应。针对这一问题，近年来出现了改进型测试架构，如基于锁相采样与同步触发的动态损耗捕获平台，可在较高频率范围内实现电压、电流波形同步采集，并结合多通道高速示波器完成能量积分^[2]。这类测试技术有效拓展了传统双脉冲法的工况覆盖范围，使实验结果更接近系统级实际表现。

2.3 热电耦合模型与参数拟合法

热电耦合模型综合考虑器件电功率损耗转化为热量，并在结构中传导至环境的全过程。通过建立RC网络或传递函数模型表示热扩散路径，其中Foster与Cauer模型最为常见。系统可表示为：

$$T_j(t) = T_{amb} + \sum_{i=1}^n P(t) \cdot R_i \cdot (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (2)$$

式(2)中， T_j 为结温， T_{amb} 为环境温度， R_i 与 τ_i 为热阻与热容构成的时间常数。该方法通过测量温升曲线反演热参数，并结合电流、电压波形得出瞬时功率损耗，实现对不同工况下损耗变化的预测。

在工程实践中，热电耦合建模通常采用热电偶+红外热成像双通道采集方式，辅以热容估算或热阻拟合。其优势在于能够反映器件真实运行状态下的动态热行为，为结构热设计、冷却方案匹配与功率裕度评估提供重要依据。参数拟合阶段采用最小二乘法对热响应曲线进行回归，部分研究引入多段拟合与指数加权策略，在不同温区保持精度稳定。模型局限在于对边界条件与热互耦较为敏感，复杂系统中热阻网络非线性与多路径特性可能导致拟合不收敛或误差扩大。

为提升模型适应性，研究者正结合有限元仿真校准实测热参数，或采用改进型动态热阻映射技术实现模型在线修正。

2.4 多工况智能建模与自适应标定方法

随着数据采集与智能算法技术的成熟，基于多工况数据驱动的智能建模方法逐渐成为功率器件损耗标定的研究热点。这类方法通过采集器件在不同电流、电压、频率及温度下的运行数据，构建高维特征空间，利用机器学习模型实现损耗的非线性预测与自适应修正。常见算法包括支持向量回归(SVR)、梯度提升决策树(XGBoost)及多层神经网络(DNN、LSTM)等。模型训练过程中以实验测得的电压、电流、结温及栅极信号为输入，以实测损耗为输出，通过反向传播优化权重参数，最终得到可在任意工况下准确估算损耗的模型。

该类方法不再依赖传统的经验公式或等效电路，而是通过数据特征的学习捕捉复杂的热-电耦合关系。训练完成的模型可嵌入数字控制系统，实现实时功率预测与在线校正^[3]。例如：在高频逆变器或车载电驱系统中，通过对采集数据的连续更新，模型能够自适应识别器件性能衰减、温度漂移等特征，及时修正损耗参数，提高系统运行效率与可靠性。

多工况智能标定的优点在于建模精度高、适应范围广、预测速度快，尤其在宽禁带器件与多拓扑系统中表现突出。其局限性在于模型训练样本需求大，对数据完整性和传感精度要求较高。部分算法存在“黑箱化”问题，难以直接解释各参数的物理意义。针对这一不足，新的研究方向正朝着“物理信息驱动建模”发展，即在神经网络中引入功率器件的已知物理规律，以实现模型可解释性与计算效率的平衡。

3 功率器件损耗标定方法的应用实践

3.1 实验平台设计与工况构建

为验证功率器件损耗标定方法在高压光伏变换系统中的实际应用效果，搭建了基于1500V直流母线的Boost型光伏MPPT实验平台。平台采用耐压等级2000V的SiC MOSFET与肖特基二极管构建两电平升压拓扑，额定功率为30kW，具备多路并联输入与可变频驱动控制功能。平台集成Qspice电路仿真模块、红外热成像系统、热电偶阵列、采样精度达 $\pm 0.2\%$ 的电压电流传感器，可覆盖宽电压(600~1500V)、宽功率(6~30kW)与多温度(25℃、60℃、90℃)场景。

工况构建参照典型光伏阵列输出特性, 设定低、中、额定三档功率等级, 在稳态运行 30 分钟后采集器件导通电流、关断电压、驱动波形与结温数据。Qspice 建模过程中模拟器件开关过程, 重点提取电压过冲与电流尖峰行为, 并在驱动电阻 $2 \sim 10 \Omega$ 区间调参, 探明驱动阻值与损耗耦合特性^[4]。驱动电阻过低虽可压缩开通能量 (4.7 mJ 降至 3.8 mJ), 但引发电压尖峰从 1 820 V 飙升至 1 960 V, 带来 EMI 与器件击穿风险。因此将驱动电阻设定在 6Ω , 在兼顾效率与可靠性的基础上进行热容法损耗标定。

3.2 标定流程实施与模型拟合

标定过程采用热容法对功率器件的热响应进行定量分析。在测试中, 器件安装于恒温热平台, K 型热电偶紧贴器件基板, 红外热像仪监测表面温度分布, 升温速率设定为 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, 采样频率为 10 Hz, 以保证热响应数据的完整性与连续性。在恒定功率输入条件下, 记录器件结温随时间的变化, 通过计算温升斜率反推器件热容。

在 1 500 V 母线、18 A 电流与 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下, 测得器件热容为 $18.6 \text{ J}/^\circ\text{C}$, 导通损耗 22.4 W, 开关损耗 19.7 W, 总损耗为 42.1 W。进一步通过多工况下热容与温度的线性回归, 拟合相关性曲线, 回归结果相关系数 R^2 达到 0.984, 验证了模型在宽温区的稳定性与准确性。定功率条件下热阻测试显示, 平均热阻为 $0.39 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$, 最大偏差控制在 $0.03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 内。

为评估方法的重复性, 采用相同工况重复测量三次, 损耗波动小于 3.2%, 热容偏差不超过 $\pm 0.4 \text{ J}/^\circ\text{C}$ 。结果表明, 该方法在多温度、多占空比条件下均具备良好的稳定性与工程适应性, 可作为电力系统高压器件热—电建模与结构热设计的有效支撑手段。

3.3 工程应用场景验证与优化建议

在光伏 MPPT 系统中, 基于热容法的功率器件损耗标定结果被嵌入控制系统, 实现了器件发热量的动态估算与热应力实时监测。运行测试覆盖 1 500 V 直流母线和 30 kW 额定功率工况, 器件结温实测值与模型预测误差低于 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 系统效率提升至 98.6%, 较传统经验法提高约 1.8%。

为验证模型在多路并联系统中的适应性, 对三路 Boost 模块进行均流测试, 结果显示热漂移偏差小于 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 单路功率误差低于 0.8%, 说明模型能有效识别器件间热耦合与应力差异。在硬开关条件下, 通过优化驱动参数和匹配栅极电阻, 将关断电压尖峰从 1 970 V

抑制至 1 835 V, 显著降低器件瞬态过压风险。经 500 小时额定功率运行后, 器件热阻变化率控制在 2% 以内, 未出现热疲劳迹象。

从系统优化角度看, 热容法标定结果使工程师能够在器件选型、散热设计和驱动参数匹配中实现前置优化^[5]。针对 2 000 V 等级 SiC 器件的两电平升压拓扑, 实验结果表明, 在同等功率条件下, 相较三电平拓扑, 系统驱动与采样路数减少 40%, 效率提升约 1.5%, 控制算法复杂度下降明显。经过热容法与仿真联合分析后, 可在设计初期明确损耗分布与电热边界, 为高压功率变换器的结构简化与可靠性提升提供工程化依据。

4 结束语

碳化硅功率器件在高压、高频、高温等极端工况下展现出优越的电热性能, 为新能源系统提升转换效率与系统紧凑度提供了关键支撑。在工程应用中, 基于热容法的损耗标定技术可实现电热耦合特性精准识别, 有效前置可靠性边界分析与结构优化判断, 具备高度实用价值。结合仿真分析与实测数据融合的方法论, 将损耗模型嵌入控制系统形成在线自适应能力, 是推动高压电力电子装备向高可靠、智能化方向发展的重要技术基础。

参考文献:

- [1] 岳雨霏, 张亚文, 王李邦, 等. MMC 功率损耗优化环流控制方法 [J/OL]. 高电压技术, 1-14[2025-10-16]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y4WXQ1XfpS5rWjY8iuiqlU87tutl5ivWjwzonzbprBKwIVaNo47Qx7dTLelOtWgnpuhzwit8uqnsFx7QTNENSGZ4NdwbYrQXSMFqtzH0vtE1LCbLsoq6txdGKt7bsBLmIc6QGJHou0X3QH3Ck9YS1x9Sv_XdSenhuoMT0GcE9R2kP8dSAoWdrA=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 白磊. 电机控制系统下的智能功率集成电路设计要点分析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 09(04): 77-79, 82.
- [3] 吴保潼, 谢丽蓉. 电力电子技术在电力系统中的应用 [J]. 光源与照明, 2022(01): 225-227.
- [4] 赵政, 李勇, 高海乐, 等. 基于功率器件的影像核磁共振系统电力传输技术研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 08(09): 20-22.
- [5] 苏田田, 路茂增, 马新喜, 等. MMC 器件损耗分布与电容电压纹波综合优化方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(03): 32-41.