

大功率光伏逆变器电抗器损耗分析与优化

The Loss Analysis and Optimization of Reactor In the High-Powered Photovoltaic Inverter

洪添丁¹, 董纪清¹, 陈为¹, 王建刚², 于晓强²

¹ 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108

² 青岛云路新能源科技有限公司 青岛 266109

摘要: 电抗器的尺寸、重量和损耗对大功率光伏逆变器的效率, 尤其是欧洲效率有重要影响。本文基于一个容量为 500kVA 的 3 相光伏逆变器的电抗器进行分析, 分别分析绕组损耗和磁芯损耗, 最后结合欧洲效率进行优化绕组厚度, 使其达到最高欧洲效率。

关键词: 电抗器, 损耗, 优化, 欧洲效率

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)11-3-121

1 引言

随着世界人口持续增长, 人们对能源的需求量日益增加, 不仅传统化石能源是有限的, 还会造成严重的环境污染。在追求低碳社会的今天, 太阳能作为一种取之不尽用之不竭的绿色新能源, 越来越受到世界各国的关注^[1]。在各国政府的大力支持下, 光伏发电技术和产业得到了快速的发展。太阳能应用需求不断上升, 逆变器供应商在持续不断地提高产能的同时, 要着重考虑逆变器的成本以及整体效率的问题^[2]。其中输出滤波电抗器的体积、重量、效率是极其重要的, 它越来越成为光伏逆变器技术开发和产业化关注的热点。光伏逆变器电抗器的特点在于需要通过工频大电流的同时, 还要承受逆变器的开关频率的高频纹波, 这给电抗器的损耗分析带来很大困难。本文主要分析电抗器的损耗机理, 优化电抗器的电气参数, 旨在减少损耗, 提高效率和降低成本。因此如何提高光伏发电系统的效率, 从而降低开发成本, 日渐成为国内外研究的热点^[3-4]。

欧洲效率是衡量逆变器性能指标的最重要参数。欧洲效率并不是仅由额定功率确定的, 而是由不同负载下的各个效率的加权组合。这将使磁性元件的设计增加了许多困难。磁性元件的损耗包括磁芯损耗和绕组损耗。在光伏并网逆变器电感电流中同时含有工频的基波和高频谐波分量, 考虑到高频涡流效应, 损耗模型和计算要变得复杂许多^[5-7]。

本文基于一个容量为 500kVA 的 3 相光伏逆变器的 LCL 型电抗器进行损耗分析及优化设计, 最终得到最佳的欧洲效率。第一个电感(逆变器侧) $L_1=0.12\text{mH}$, 第二个电感(电网侧) $L_2=0.04\text{mH}$ 。 L_1 含有基波和谐波, 由于滤波电容的作用, L_2 的谐波分量很小, 视为仅含基波。铁芯材料为 B23P090 材质的硅钢片。

2 绕组损耗分析

大功率电抗器需要通过较大电流, 一般采用铜箔或铝箔绕制。为了减少磁芯气隙扩散磁通带来的涡流损耗, 铁芯采用分布气隙的方式, 图 1 为该模型的电磁场仿真, 给出了绕组电流密度的分布以及扩散磁通引起的附加损耗, 比起集中气隙的方式, 分布气隙的扩散磁通大大减少了, 因此本文忽略气隙扩散磁通的影响。模型可近似等效为一维涡流理论模型^[8], 其电流密度表达式为:

$$J(x) = k \cdot \frac{H_1 \cosh[k(D-x)] - H_2 \cosh(kx)}{\sinh(kD)} \quad (1)$$

其中 D 是金属箔的厚度, H_1 和 H_2 分别为沿箔两侧的磁场强度, 可以由安培环路定律得到, 如图 2 所示, 其值为

$$H1_i = \frac{I}{\text{Height}} \cdot (N-i), H2_i = \frac{I}{\text{Height}} \cdot (N-i+1)$$

其中 Height 为绕组箔高度, i 为绕组由内层到外层的层序号, N 为总匝数。

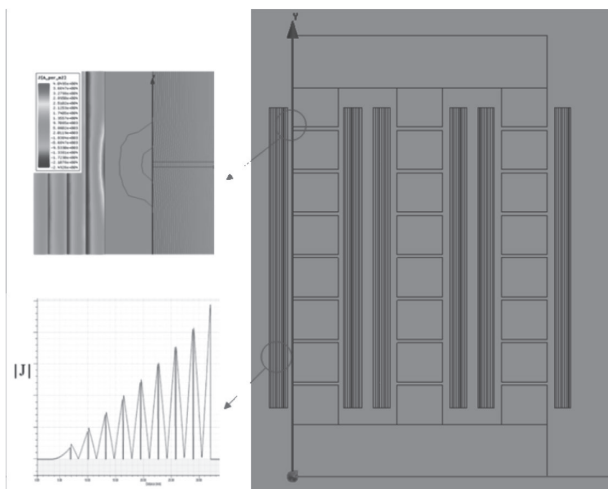


图1 高频涡流场仿真

由于 J 只有 y 轴方向上的分量, 且只沿 x 轴变化, 即 J 是只与 x 有关的函数。设绕组高度为 $Height$, 厚度为 D , 总匝数为 N , 第 i 匝的长度为 SLT_i , 则第 i 匝绕组的损耗为:

$$P_{wvi} = \frac{1}{2\sigma} \int_0^{Height} \int_0^{SLT_i} \int_0^D |J_i(x)|^2 dx dy dz = \frac{1}{2\sigma} \cdot Height \cdot SLT_i \cdot \int_0^D |J_i(x)|^2 dx \quad (2)$$

电抗器中柱和绕组的截面如图 3 所示, 可以计算 SLT_i 的值如下:

$$SLT_i = 2 \cdot [a + 2c + 2i(D + \delta) + b + 2c + 2i(D + \delta)] \quad (3)$$

其中, a 和 b 分别为磁芯中柱截面的长和宽, c 为第一匝绕组与磁芯直接的距离, D 为绕组厚度, δ 为匝间绝缘层厚度。

因此, 绕组损耗为:

$$P_{wv} = \sum_{i=1}^N P_{wvi} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\sigma} \cdot Height \cdot SLT_i \cdot \int_0^D |J_i(x)|^2 dx \quad (4)$$

由于电流含有谐波分量, 而绕组损耗同时是频率的函数, 因此可对电流进行傅立叶分解, 再对不同频率的电流

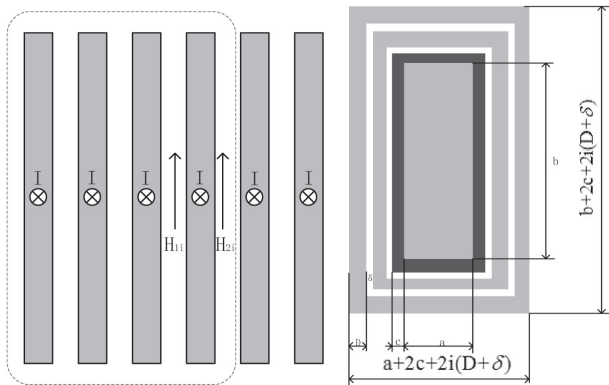


图2 绕组的截面图

图3 匝长的计算

造成的损耗进行累加, 得到总损耗值, 即:

$$\Sigma P_w = \sum_{j=0}^{N_h} P_{w_j} \quad (5)$$

其中 N_h 为电流谐波分量的个数, P_{w_0} 为基波电流引起的绕组损耗值。

由于绕组的厚度与磁芯损耗无关, 此处画出绕组损耗随绕组厚度变化的曲线, 取 L_1 的基波电流的幅值 1000A, 频率 50Hz, 谐波电流的幅值 100A, 频率分别为 3kHz 和 6kHz, 匝数为 10 匝; L_2 仅含基波电流, 幅值为 1000A, 匝数为 5 匝。如图 4 所示:

其中横坐标为绕组箔厚, 单位是 0.1mm, 纵坐标为绕组损耗, 单位是 W, 从曲线的对比中可以看出, 含有谐波的 L_1 在谐波电流幅值相同的情况下, 谐波频率越高, 绕组的最优厚度越小; 而仅含有基波的 L_2 厚度越厚损耗越小, 同时负载为满载时绕组的最优厚度比半载时来的大。

3 磁芯损耗分析

本文选用的电抗器磁芯为 B23P090 材质的硅钢片, 在正弦激励下损耗可由公式 $P_{cv} = k \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta$ 拟合得到, 其工频和高频的损耗曲线及函数如图 5 所示:

其中当频率小于 1000Hz 时, $P_{cv} = 3.55 \times 10^{-4} \cdot f^{1.685} \cdot B_m^{1.914}$, 当频率在 1000Hz 到 10000Hz 之间时, $P_{cv} = 2.45 \times 10^{-4} \cdot f^{1.727} \cdot B_m^{1.865}$, B_m 为磁通密度的峰值, 单位是 Tesla, P_{cv} 为单位质量的损耗, 单位是 W/kg, 设磁芯密度为 $Density$, 磁芯中柱高度为 $HeightC$, 则单相磁芯损耗为:

$$P_c = P_{cv} \cdot HeightC \cdot Density \quad (6)$$

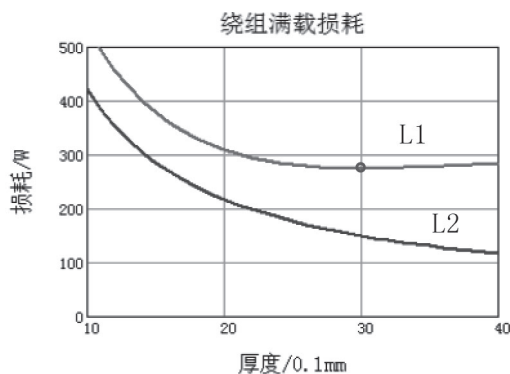
4 欧洲效率优化

考虑到电抗器多数时间并不是在额定负载下工作, 并且电抗器在不同负载下效率也不一样, 若只比较在标准测试条件下的效率并不合理。因此提出了加权效率的概念, 比较常用的是根据欧洲效率, 从上面的分析可知, 不同频率、不同负载下绕组的最优厚度不同, 并且都存在对应的最优厚度, 因此可能存在绕组的最优厚度使得欧洲效率达到最高。其中欧洲效率定义为:

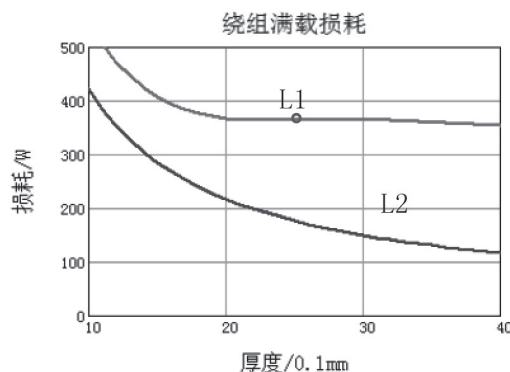
$$\eta_{Euro} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%} \quad (7)$$

代入前面的计算结果得到:

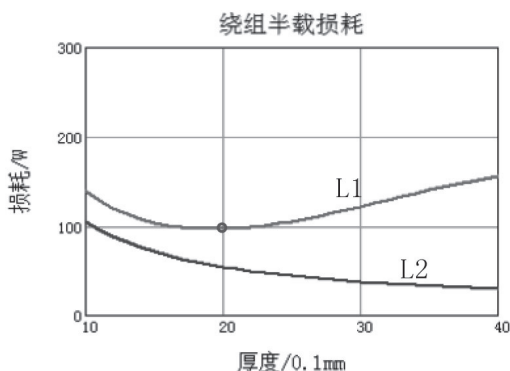
$$\eta_{Euro}(D) = \sum_{i=0}^5 \left[weight_i \cdot \left(1 - \frac{P_{other_i} + P_{wv_i}(D)}{P_0 \cdot Rating_i} \right) \right] \quad (8)$$



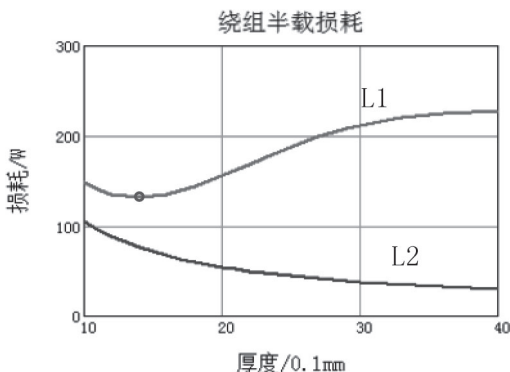
(a) 谐波频率3kHz的满载损耗曲线



(b) 谐波频率6kHz的满载损耗曲线



(c) 谐波频率3kHz的半载损耗曲线



(d) 谐波频率6kHz的半载损耗曲线

图4 不同谐波频率、不同负载下的绕组损耗-绕组厚度曲线

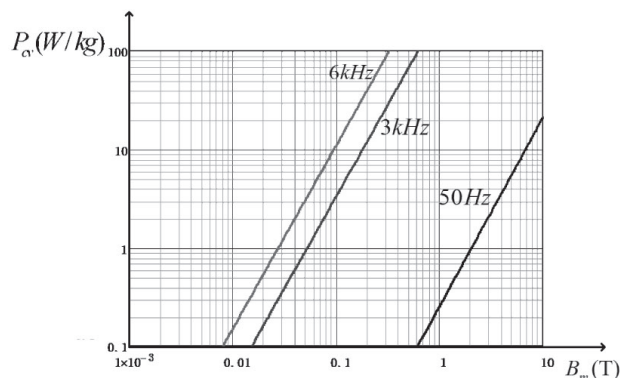


图5 B23P090 材质的硅钢片铁损曲线

其中, $Rating_i$ 表示不同的负载比例, $weight_i$ 表示欧洲效率表达式中各个负载下对应的权重, 即 P_{other_i} 则表示其各个负载下对应的其他损耗值, 其值与绕组厚度 D 无关。可以根据它来得到电抗器 L_1 的欧洲效率最高时的绕组厚度, 如图6所示。

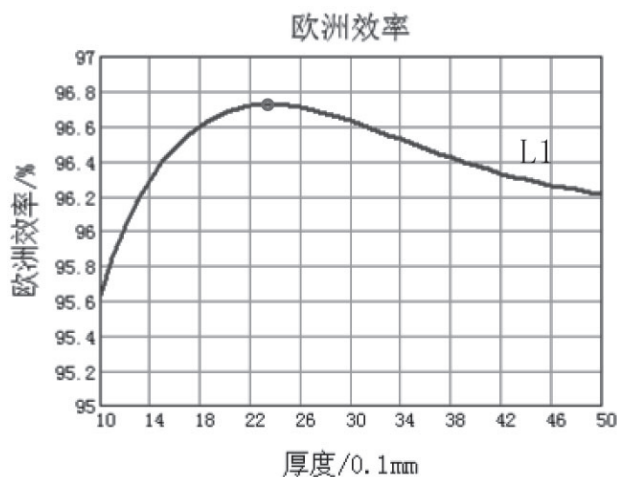


图6 欧洲效率 - 绕组厚度曲线

5 结论

本文通过分析 LCL 型滤波电抗器的绕组损耗和磁芯损耗, 通过基波电流与不同频率的谐波电流分量的损耗叠加, 得到不同负载下的最优绕组厚度算法。最后基于最佳欧洲效率的目标进行设计绕组的厚度, 得到如下几个结论:

- 1) 由于高频涡流效应, 电抗器箔形绕组厚度并不是越厚, 绕组总损耗越小。
- 2) 在不同的负载功率下, 绕组具有不同的最优厚度。在几千赫兹的一般大功率逆变器应用情况下, 负载越小, 最优厚度越薄。

3) 在保持磁芯工频最大磁密不变的前提下, 增加绕组匝数可减少磁芯截面积, 但由于匝数增加, 引起的高频涡流邻近效应增强, 会使得绕组总损耗增加, 但绕组的最优厚度减小。

4) 含有不同频率的谐波电流下, 都可能存在对应的最佳效率时的绕组厚度, 这十分有助于设计最佳的绕组厚度。

参考文献

- [1] 宋静文, 郭育华. 大功率光伏逆变器损耗模型的研究[D]. 西南交通大学研究生学位论文电力电子与电力传动: 1-8.
- [2] 杨金焕, 汪乐, 于化丛等. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013:1-17, 167-169.
- [3] 陈为, 何建农. 电力电子高频磁技术及其发展趋势. 电工电能新技术, 2000, 19(2): 30-34.
- [4] 李智华, 罗恒康, 费鸿俊. 直流偏置对功率铁氧体损耗影响的计算. 电工电能新技术, 2002, 21(3): 41-43. 牟宪民, 王建骥, 纪延超, 魏晓霞. 可控电抗器的现状及其发展[J]. 哈尔滨哈尔滨工业大学电气工程系, 2006年第25卷第4期: 1-4.
- [5] 旷建军, 严仰光, 阮新波. 开关电源中磁性元件绕组损耗的分析与研究[D]. 南京航空航天大学, 电力电子与电力传动 20071001: 9-20.

- [6] 旷建军, 阮新波, 任小永. 气隙设计对电感绕组损耗的影响[J]. 南京航空航天大学航空电源重点实验室210016, 电子元件与材料 2007年第26卷第10期: 60-63.
- [7] 旷建军, 阮新波, 任小永. 集肤和邻近效应对平面磁性元件绕组损耗影响的分析. 中国电机工程学报, 2006. 3, 18(6): 170-175.
- [8] P. L. Dowell, B. Sc. (Eng.). Effects of eddy currents in transformer windings[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 113(8): 1387-1394.

作者简介

洪添丁, 男, 硕士研究生, 专业: 电气工程, 研究方向: 高频磁技术, 邮箱: 913100512@qq.com, 联系电话: 15705963259, 地址: 福州市闽侯县福州大学电气学院, 邮编: 350108;

董纪清, 女, 博士、副教授, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容等;

陈为, 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容诊断与滤波器、磁集成、电磁场分析与应用和电磁检测等。

王建刚, 男, 硕士, 研究方向为功率变换中的磁性元件。

于晓强, 男, 硕士, 研究方向为功率变换中的磁性元件。