

功率电感绕组高频损耗计算的一种方法

A method for calculating the high frequency loss of power inductors

苏银行，邵革良

田村（中国）上海技术研发中心，上海 200020

摘要：在Dowell对高频功率电感绕组损耗理论分析与验证的基础上，讨论了高频功率电感在电流为三角波时绕组损耗的一种计算方法；以连续工作模式的BUCK转换器中使用的高频功率电感为例进行说明。本计算方法仅考虑由趋附效应与邻近效应引起的电感绕组高频损耗，未考虑由漏磁通引起的涡流损耗。

关键词：趋肤效应，邻近效应，绕组损耗

Abstract: Dowell of high-frequency power inductor winding loss theory analysis and verification based on, discuss the high-frequency power inductor in current for triangular wave winding losses of a calculation method; used in continuous mode of Buck Converter in high frequency power inductor as an example is described. This method only considers the caused by the skin effect and proximity effect of inductance winding loss at high frequency, the eddy current loss caused by the leakage magnetic flux is not considered.

Keywords: skin effect, proximity effect, winding loss

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展，电力电子设备中功率器件的工作频率不断提高；电感作为电力电子设备使用的主要功率器件其损耗也在不断增加，占电力电子设备总损耗相当大的比例；所以对电感损耗分析非常重要。上个世纪 60 年代 Dowell 对电感的绕组损耗做了具体的理论分析与验证；Dowell 对电感绕组损耗的分析是在电感电流为正弦波的情况进行的^[1]；然而电感电流一般不是正弦电流，主要以三角波电流为主。文中分析了电感损耗中的绕组损耗讨论了电感电流为三角波电流时绕组损耗的一种计算方法，并用具体实例讲述具体计算。

1 绕组损耗

高频功率电感绕组损耗（忽略由漏磁通引起的涡流损耗）取决于流过电感电流的直流分量，基波分量与高次谐波分量。电感电流 i_L 表示为傅立叶系数形式如下：

$$i_L = I_L + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{mn} \cos(n\omega t + \varphi_n)) \quad (1)$$

I_L 是电感电流的直流分量， I_{mn} 是电感电流的 n 次谐波分量。

高频电感绕组损耗表示如下：

$$P_w = P_{wdc} + P_{wac} \quad (2)$$

P_w 为电感绕组总损耗， P_{wdc} 为电感绕组直流损耗， P_{wac} 为电感绕组交流损耗。

1.1 DC-DC 转换器中功率电感电流分析

连续工作模式的 DC-DC 转换器：BUCK，BOOST，BUCK-BOOST 等电路电感电流，如图 2-1 所示：

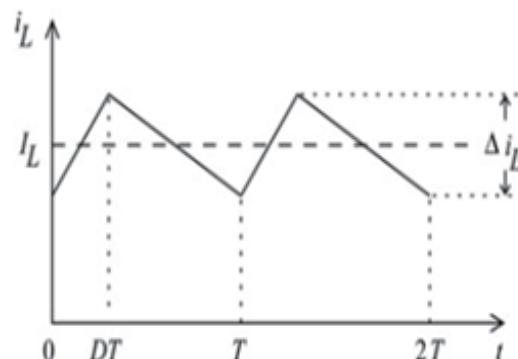


图 2-1 电感总电流波形

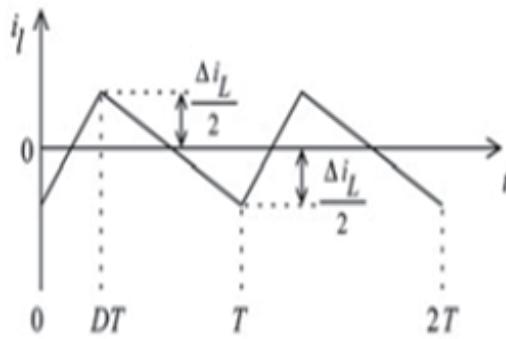


图 2-2 电感电流交流分量波形

i_L 为电感总电流, I_L 为直流分量, i_l 为交流分量, Δi_L 为交流分量峰峰值, D 为占空比, T 为开关周期。连续工作模式的 DC-DC 转换器任意占空比时交流分量表达式:

$$i_l(t) = \begin{cases} \frac{\Delta i_L}{2} + \frac{\Delta i_L}{D+T_S}, & 0 \leq t \leq D * T_S \\ \frac{\Delta i_L}{2} - \frac{\Delta i_L}{(1-D)*T_S}, & D * T_S \leq t \leq T_S \end{cases} \quad (3)$$

$$i_l(t) = i_L(t) - I_L \quad (4)$$

对于连续工作模式的 BUCK 电路电感电流交流分量的峰峰值与占空比的关系为:

$$\Delta i_L = V_O * \frac{(1-D)}{f_s * L} \quad (5)$$

式(5)中 V_o 为输出电压, L 为电感量, f_s 为开关频率。

对电感电流交流分量进行傅立叶分析过程如下:

$$i_l(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n * \omega * t) + b_n \sin(n * \omega * t)] \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i_l(t) * \cos(n * \omega * t) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i_l(t) * \sin(n * \omega * t) dt \quad (8)$$

各次谐波电流幅值为:

$$I_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (9)$$

由式(3), (5), (7)得出:

$$a_n = \frac{\Delta i_L}{2 * \pi^2 * D * (1-D)} * \frac{\cos(2 * n * \pi * D) - 1}{n^2} \quad (10)$$

由式(3), (5), (8)得出:

$$b_n = \frac{\Delta i_L}{2 * \pi^2 * D * (1-D)} * \frac{\sin(2 * n * \pi * D)}{n^2} \quad (11)$$

由式(9), (10), (11)得出基波分量与各次谐波分量的峰值为:

$$I_{mn} = \frac{\Delta i_L}{\pi * n * (1-D)} \sin c(n * \pi * D) \quad (12)$$

$$I_{mn} = \frac{\Delta i_L}{\pi * n * (1-D)} \sin c(n * \pi * D) \quad (13)$$

由(5), (12), (13)得出:

$$I_{mn} = \frac{V_O}{f_s * L} * \frac{\sin(n * \pi * D)}{\pi^2 * \pi^2 * D} = \frac{V_O}{f_s * L} * \frac{\sin c(n * \pi * D)}{\pi * \pi} \quad (14)$$

电感电流的傅立叶表达形式如下:

$$i_L(t) = I_L + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n * \omega * t) + b_n \sin(n * \omega * t)] \quad (15)$$

由式(5), (10), (11), (15)得出:

$$i_l(t) = \frac{\Delta i_L}{\pi^2 * D * (1-D)} * \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(2 * n * \pi * D)}{n^2} * \sin(n * \omega * t - n * \pi * D) \right] \quad (16)$$

式(16)为含各次谐波电感电流的表达形式。

1.2 周期性三角波电流时电感绕组损耗分析

高频功率电感绕组损耗表达式(2)中直流损耗为:

$$P_{wdc} = R_{wdc} * I_L^2 \quad (17)$$

交流损耗为:

$$P_{vac} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn}^2 * R_{wn} \quad (18)$$

式(17)中 R_{wdc} 为电感绕组的直流电阻, 式(18)中 R_{wn} 电感绕组在 n 次谐波下的交流电阻。绕组电阻因数为绕组的交流电阻与直流阻抗的比值^[2](绕组的交流电阻包括所有谐波下的电阻)。

$$F_{Rn} = R_{wn}/R_{wdc} \quad (19)$$

$$F_{Rn} = \frac{R_{wn}}{R_{wdc}} = \sqrt{n} * A * \left[F_{RS} + \frac{2 * (N_i^2 - 1)}{3} * F_{RP} \right] \quad (20)$$

式(20)中 F_{RS} , F_{RP} 式分别为趋肤效应因子与邻近效应因子:

$$F_{RS} = \frac{\sinh(2 * A * \sqrt{n}) + \sin(2 * A * \sqrt{n})}{\cosh(2 * A * \sqrt{n}) - \cos(2 * A * \sqrt{n})} \quad (21)$$

$$F_{RP} = \frac{\sinh(2 * A * \sqrt{n}) - \sin(2 * A * \sqrt{n})}{\cosh(2 * A * \sqrt{n}) + \cos(2 * A * \sqrt{n})} \quad (22)$$

对于圆形导线截面积标准化^[2]即:

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{3}{4}} * \frac{d}{\sigma_w} * \sqrt{\frac{d}{p}} \quad (23)$$

高频情况下趋肤深度的表达式为^[2]:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{\pi * \mu_0 * \rho_w * f_s}} \quad (24)$$

式(23),(24)中 d 为绕组导线的直径, p 为相邻导线间距(即同一层相邻导线的距离), σ_w 导线的电阻率, μ_0 为空气的磁导率。

由式(20)得出:

$$R_{wn} = \sqrt{n} * A * \left[F_{RS} + \frac{2 * (N_i^2 - 1)}{3} * F_{RP} \right] * R_{wdc} \quad (25)$$

电感绕组总损耗为:

$$P_w = R_{wdc} * I_L^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn}^2 * R_{wn} \quad (26)$$

式(26)通过变形得出：

$$P_w = R_{wdc} * I_L^2 \left[1 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{mn}}{I_L} \right)^2 * \frac{R_{wn}}{R_{wdc}} \right] \quad (27)$$

由式(19),(27)整理得出：

$$P_w = R_{wdc} * I_L^2 \left[1 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{mn}}{I_L} \right)^2 * F_{Rn} \right] \quad (28)$$

式(28)为电感绕组损耗的一般表达式，其中包括直流损耗与交流损耗。

2 连续工作模式下 BUCK 电路电感绕组损耗计算

输入电压：

$$V_{in_min}=250V$$

输出电压：

$$V_{out}=48V$$

开关频率：

$$f_s=100kHz$$

根据 BUCK 电路工作原理计算电感量：

$$L=400 \mu H$$

导线：AWG #22，磁铁芯：2616PA170-3C8。

圈数：

$$N=53$$

层数：

$$N_1=4$$

每层需要的圈数为：

$$N_0=13$$

由式(24)计算趋深度：

$$\sigma_w=0.21mm$$

$$\text{设: } S_k = \frac{d_i}{\sigma_w}$$

$$\rho_w = 5.9 * 10^7 \frac{S}{m}$$

d_i 为裸导线的直径，查表知：

$$d_i=0.64mm$$

由式(29)得出：

$$S_k=3.1$$

导线的直流电阻：

$$R_{wdc} = N * \frac{\pi}{2} * (B + C) * \lambda_W \quad (30)$$

查磁芯手册知：

$$B=21.6mm \quad C=11.3mm$$

由式(30)得出：

$$R_{wdc}=0.144\Omega$$

通过分析对 1-5 次谐波下引起的交流损耗如图 3-2 第 5 次谐波的损耗为 0.001W 占总损耗的比例很小 5 次谐波后的损耗可以忽略。

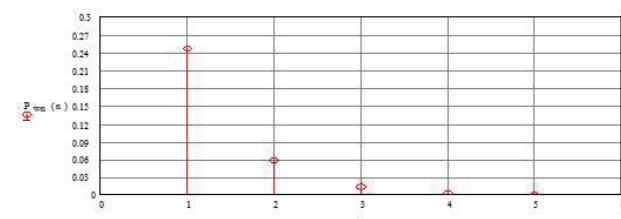


图 3-2 1-5 次谐波交流电阻损耗

取 1-5 次谐波分析 ($n=1, 2, \dots, 5$) 对交流损耗分析。

圆导线截面积归一化^[2],

$$\frac{d_i}{(d_o - d_i) * 2 + d_i} = 0.85 \quad (31)$$

$$p = (d_o - d_i) * 2 + d_i \quad (32)$$

$$\frac{d}{\sigma_w} = 3.11$$

d_o 含绝缘层导线的直径，查表知：

$$d_o=0.7mm$$

由式(23)计算得出：

$$A=2.4$$

计算 1-5 次谐波下总的交流损耗

$$P_{wac} = \frac{\Delta i_{Lmax}^2}{2 * \pi^4 * D_{min}^2 * (1 - D_{min})^2} * \sum_{n=1}^5 \left\{ \left[\frac{\sin(n * \pi * D_{min})}{n^2} \right]^2 * R_{wn}(n) \right\} \quad (33)$$

$$P_{wac} = 322mW$$

纹波系数：

$$k=0.4$$

由式(5)得：

$$\Delta i_{Lmax}=0.96A$$

计算绕组的直流损耗

$$P_{wdc} = I_{omax}^2 * R_{wdc} \quad (34)$$

$$P_{wdc} = 325mW$$

由式(2)计算绕组的总损耗为：

$$P_w = 647mW$$

下转141页