

Boost PFC 电路中开关器件的损耗分析与计算

曹建安, 裴云庆, 王兆安

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 根据开关器件的物理模型, 分析了开关器件在 Boost 电路中的损耗, 并计算了 Boost PWM 和 PFC 两种不同电路的开关损耗, 给出了开关器件的功耗分布。最后对一台 3kW 的 Boost 型 PFC 整流电源进行了优化设计。

关键词: 功率因数校正; 功率损耗

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2002)01-0041-04

1 前言

开关电源中功率器件的损耗影响其可靠性和效率, 从而影响其性能指标。特别是在功率因数校正(PFC)电路中, 二极管反向恢复电流不但给二极管造成损耗, 而且给开关管造成损耗, 并产生较大的 EMI 干扰。文献[1]对硬开关 Boost PWM 电路中开关器件的损耗作了较为详尽的分析和计算, 但是该文献中的损耗模型仅适合于小功率的 Boost PWM 电路。对大功率 Boost PFC 整流电源而言, 该模型就不能准确描述开关器件的工作状态, 其功率损耗的计算结果误差也就比较大。因此, 作者对如图 1 所示的一台 3kW 的 Boost PFC 整流电源进行了损耗分析和计算, 并得出和实际比较接近的结论。

图 1 硬开关 Boost PFC 主电路

Fig. 1 Circuit of hard-switching boost PFC

图 1 中, V_{AC} 为交流电网电压, B 为整流桥, L 为升压电感, Q 为 MOSFET 开关管, D_{body} 为 Q 的寄生

二极管, C_r 为寄生电容和吸收电容之和, D 为隔直二极管, C_L 为滤波电容, R_L 为负载。

2 Boost PWM 电源开关损耗分析与计算

在典型 Boost 电路的应用中, 开关损耗主要集中在两种器件上: 一种是快恢复二极管的损耗, 另一种是开关管的损耗。其中快恢复二极管对整机的性能指标和可靠性影响比较大。

2.1 快恢复二极管的损耗

快恢复二极管的损耗主要由三部分组成: 一部分是开通损耗 P_{ON} , 一部分是通态损耗 P_{CON} , 另一部分是关断损耗 P_{OFF} 。在分析之前, 假设电感 L 工作在电流连续模式下, 并且二极管关断时的 di_{fr}/dt 等于开关管开通时的 di_{fr}/dt 。快恢复二极管的开通损耗由开关管关断时的 di_{fr}/dt 决定, 关断损耗由开关管开通时的 di_{fr}/dt 决定。图 2 为二极管 DSEK60-06A 典型的反向恢复特性。其中 t_{fr} 为二极管正向电压恢复时间, V_{FR} 为二极管正向恢复最大电压, V_F 为二极管压降的典型值, I_F 为二极管正向电流, V_O 为输出电压, $I_{D(RM)}$ 为二极管的反向恢复电流的最大值, t_{rr} 为反向恢复时间, di_{fr}/dt 为二极管在开通和关断时的电流变化率。

2.1.1 快恢复二极管开通损耗 P_{ON}

将图 2 中快恢复二极管的正向开通过程的电流和电压波形进行理想化处理, 得到如图 3 的波形。当快恢复二极管开通时, 二极管在上升时间 t_{fr} 内承

收稿日期: 2000-09-08

作者简介: 曹建安(1971-), 男, 陕西籍, 博士生, 主攻 DC/DC 变换器、功率因数校正、DC/AC 逆变器、软开关技术的研究。

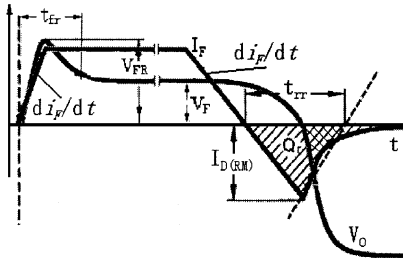


图 2 二极管的电压电流导通特性
Fig. 2 Commutational performance of the diode

图 3 二极管的正向开通时的电压和电流波形

Fig. 3 Turnon voltage and current waveforms of the diode

受较高的开通电压,经过 t_{tr} 之后,二极管的导通电压降恢复到其正常的正向压降。因此,快恢复二极管的开通损耗 P_{ON} 可以表述为:

$$P_{ON} = \frac{1}{2} f_c \cdot I_F \cdot (V_{FR} - V_F) \cdot t_{tr} \quad (1)$$

式(1)中: f_c —MOSFET 开关频率

2.1.2 快恢复二极管通态损耗 P_{CON}

一般在计算快恢复二极管的通态损耗时,仅以二极管的正向导通压降 V_F 和正向电流 I_F 的乘积来计算。事实上由于二极管的正向导通电流和电压降的关系如图 4 所示,二极管在导通时存在内阻 r_D ,所以二极管的通态损耗 P_{CON} 应该为:

$$P_{CON} = V_F \cdot I_{D(AV)} + r_D \cdot I_{D(RMS)}^2 \quad (2)$$

图 4 二极管的正向电流和管压降特性
Fig. 4 Forward current and drop-voltage performance of the diode

式中: $I_{D(AV)}$ —二极管电流的平均值

$I_{D(RMS)}$ —二极管电流的有效值

虽然 r_D 一般只有几毫欧到几十毫欧,但当 PFC 整流电源输出较大功率的时候, r_D 的影响还是比较大。

2.1.3 快恢复二极管关断损耗 P_{OFF}

快恢复二极管的关断损耗是由二极管的反向恢复电流造成的损耗。根据图 2 二极管关断时的电压电流特性,可以近似处理成如图 5 所示。则关断损耗 P_{OFF} 的一般表达式为:

$$P_{OFF} = \frac{1}{4} \cdot f_c \cdot I_{D(RM)} \cdot K_f \cdot V_R \cdot t_{tr} \quad (3)$$

式中: K_f —二极管反向恢复电流 $I_{D(RM)}$ 的温度系数,当二极管结温为 100 , $K_f = 1.1$,所以,综合式(1)、(2)、(3),可得出快恢复二极管的总开关损耗 P_D 为:

$$P_D = P_{ON} + P_{CON} + P_{OFF} \quad (4)$$

图 5 快恢复二极管关断特性

Fig. 5 Turnoff performance of the fast reverse diode

2.2 开关管的损耗

开关管的损耗由 3 个部分组成,开通损耗 P_{ON} 、通态损耗 P_{CON} 和关断损耗 P_{OFF} 。其一般的损耗表达式为^[1]:

$$\left. \begin{aligned} P_{ON} &= \frac{1}{2} f_c \cdot C_r \cdot U_0^2 \\ P_{CON} &= I_{Q(RMS)}^2 \cdot R_Q \\ P_{OFF} &= \frac{1}{2} f_c \cdot U_0 \cdot I_L \cdot t_{tr} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $I_{Q(RMS)}$ —开关管的电流有效值

R_Q —开关管在给定温度下的导通电阻

I_L —电感 L 的电流,且 $I_L = I_N$

t_{tr} —开关管开通上升时间

但是,在 Boost 电路中,由于二极管在关断时产生的反向恢复电流,造成二极管本身损耗,同时也增大了开关管 Q 的开通损耗,其增大的部分等于二极

管的 P_{OFF} 。另外,由于开关管 Q 的输出电容是和其漏源之间电压比的平方根成正比,即:

$$C_{\text{OSS}} \propto \sqrt{\frac{U}{U_{\text{N}}}}$$

其中: C_{OSS} — 开关管的输出电容

U — 开关管漏源之间变化的电压

U_{N} — 开关管漏源之间的额定电压

$$\text{由此可得} \quad C_{\text{T}} = \frac{4}{3} C_{\text{OSS}}$$

这样,开关管的总损耗表达式(5)修正为:

$$P_{\text{Q}} = \frac{2}{3} f_{\text{C}} \cdot C_{\text{OSS}} \cdot U_{\text{O}}^2 + \frac{1}{4} f_{\text{C}} \cdot I_{\text{D(RM)}} \cdot K_{\text{f}} \cdot V_{\text{R}} \cdot t_{\text{tr}} + P_{\text{CON}} + P_{\text{OFF}} \quad (6)$$

3 Boost PFC 开关损耗分析与计算

开关管 Q 和快恢复二极管工作在 Boost PFC 电路中时,开关器件流过的电流为正弦波的全波包络线波形。当 Boost PFC 的工作频率为 f_{C} ($T_{\text{C}} = 1/f_{\text{C}}$),交流电的频率为 f ($T = 1/f$),并设 $n = f/f_{\text{C}}$ 。在图 6 中,从 $nT_{\text{C}} \sim (n+1)T_{\text{C}}$ 为一个开关周期, $nT_{\text{C}} \sim (n+1-D_{\text{n}})T_{\text{C}}$ 为 Q 的导通时间, I_{N} 为输入电流, I_{Q} 为 Q 的电流。在计算 Boost PFC 电路中器件的功耗时,和 Boost PWM 电路中的功耗有较大的区别。设控制器的占空比为 D ,并且 $D = (V_{\text{O}} - V_{\text{N}})/V_{\text{O}}$ 。则在电网频率下的占空比为 D_{n} 。当 Q 导通,占空比为 D_{n} 时,开关管流过的电流为 $D_{\text{n}} \cdot I_{\text{L}}$,同样,快恢复二极管流过的电流为 $(1 - D_{\text{n}}) I_{\text{L}}$,其中

$$1 - D_{\text{n}} = \frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{O}}} = \frac{V_{\text{N}} \sin(2(n+1)T_{\text{C}}/T)}{V_{\text{O}}} \quad (7)$$

式中: V_{min} — 电网电压瞬时值

$$I_{\text{L}} = \sqrt{2} (P_{\text{O}}/V_{\text{N}}) \cdot \sin(2ft) \quad (8)$$

所以快恢复二极管的平均电流^[2] $I_{\text{D(AV)}}$ 和有效

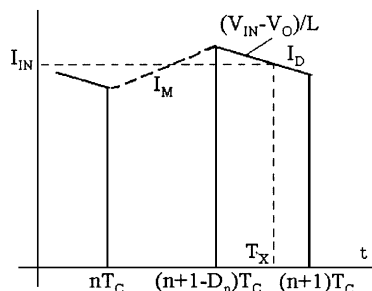


图 6 一个开关周期电感中的电流波形

Fig. 6 Inductor current waveform of one cycle

值 $I_{\text{D(RMS)}}$ 分别为:

$$I_{\text{D(AV)}} = \frac{T_{\text{C}}}{T} \sum_{n=0}^{N-1} I_{\text{L}} \cdot (1 - D_{\text{n}}) \quad (9)$$

$$I_{\text{D(RMS)}} = \sqrt{\frac{T_{\text{C}}}{T} \sum_{n=0}^{N-1} (I_{\text{L}} \cdot (1 - D_{\text{n}}))^2}$$

于是,将式(9)中的 $I_{\text{D(AV)}}$ 和 $I_{\text{D(RMS)}}$ 代入式(4),可得 Boost 电路中快恢复二极管的总功率损耗 P_{D} 。同样,开关管 Q 流过的电流为 $D_{\text{n}} I_{\text{L}}$,其平均电流^[2] $I_{\text{Q(AV)}}$ 和有效值 $I_{\text{Q(RMS)}}$ 分别为:

$$I_{\text{Q(AV)}} = \frac{T_{\text{C}}}{T} \sum_{n=0}^{N-1} I_{\text{L}} \cdot D_{\text{n}} \quad (10)$$

$$I_{\text{Q(RMS)}} = \sqrt{\frac{T_{\text{C}}}{T} \sum_{n=0}^{N-1} (I_{\text{L}} \cdot D_{\text{n}})^2}$$

将式(10)代入式(6),可得 Boost 电路中开关管 Q 的总损耗。

4 实验结果分析与计算

以图 1 为主电路的整流电源,使用 PM300 测量该整流电源的效率。当输入电压为 50Hz、AC222V,输出电压为 381V,输出电流为 8.3A,开关频率为 50kHz 时,测得输入电流 I_{N} 为 15.1A。整机效率 = 94.3%,功率因数为 0.999。

在设计 Boost PFC 电源时,由于存在着引线的分布电感,快恢复二极管的电流上升率 $(di_{\text{f}}/dt)_{\text{ON}}$ 和电流下降率 $(di_{\text{f}}/dt)_{\text{OFF}}$ 设为 500A/μs。开关管 Q 最小占空比 $D_{\text{MIN}} = (V_{\text{O}} - V_{\text{M}})/V_{\text{O}} = 0.19$ 。 D_{I} 为 DSEK60-06A,其导通电阻为 7.1mΩ,最大导通比为 $(1 - D_{\text{MIN}}) = 0.81$,平均输出电流 $I_{\text{D(AV)}} = 8.3\text{A}$,峰值平均电流为:

$$I_{\text{F}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{M}} \cdot D_{\text{MIN}}}{L \cdot f_{\text{C}}} + 15.1 = 22.5\text{A}$$

查阅该二极管的特性可知,当 $(di_{\text{f}}/dt)_{\text{ON}}$ 为 500A/μs, t_{fr} 为 150ns, V_{FR} 为 16V。在 $I_{\text{F}} = 22.5\text{A}$ 时,查二极管正向电流和管压降的关系可以得出 $V_{\text{F}} = 1.6\text{V}$;二极管正向电流的有效值 $I_{\text{D(RMS)}} = 1.44 I_{\text{D(AV)}} = 11.95\text{A}$ (系数 1.44 为方波的波形系数);式(9)中二极管的反向恢复电流 $I_{\text{D(RM)}}$ 可以通过查 $I_{\text{D(RM)}}$ 和 $(di_{\text{f}}/dt)_{\text{OFF}}$ 的关系得到: $I_{\text{D(RM)}} = 18\text{A}$ 。当二极管工作在 100℃ 时,温度系数 $K_{\text{f}} = 1.1$ 。于是,由式(4)可以得到快恢复二极管的总损耗为:

$$P_{\text{D}} = P_{\text{QN}} + P_{\text{CON}} + P_{\text{OFF}} = 1.22 + 15.58 + 28.3 = 45.1\text{W}$$

开关管为 IXFS34N8D,其输出电容 C_{OSS} 为

630pF。当 Boost 工作在硬开关管状态时,在开关管的漏源之间并联一个 2.2nF 的高压电容。开关管的峰值平均电流 $I_{Q(AV)} = 22.5A$,有效值电流为 $I_{Q(RMS)}$

$1.44 \times 22.5 \times 0.19 = 6.16A$,经查 IXFS34N8D 导通电阻的温度特性为:在 100 时的导通电阻为 0.9。根据式(6)可知开关管的功率损耗为:

$$P_Q = P_{ON} + P_{CON} + P_{OFF}$$

$$= 10.2 + 28.3 + 34.2 + 21.3 = 94W$$

这样,在 Boost 电路中,开关管的总损耗为 94W。经测得整流桥的压降为 0.85V,其功率损耗为 $2 \times 0.85 \times 15.2 = 25.8W$ 。该整流电源的总损耗为 $45.1 + 94 + 25.8 = 164.9W$,加上其他的杂散损耗要占到 0.5%左右,于是整机的损耗为 5.4%。整机的效率为 94.6%,和试验结果基本吻合。

5 结 论

根据以上本文对 Boost PFC 整流电源中开关器件的功率损耗分析和计算,基本上可以得出以下几点:

- (1) 二极管反向恢复电流,增加其关断损耗的同时,增大了开关管的损耗;
- (2) 二极管的关断损耗占其总损耗的大部分;

Analysis of power dissipation of switching components in boost PFC circuit

CAO Jiaran, PEI Yunqing, WANG Zhaoan
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The power dissipations of switching components used in boost PFC circuit are analyzed and computed in detail by the model of their application in power switching, and their distributions are figured out. Then one 3kW rectified power device with boost PFC circuit is optimized and designed.

Key words: PFC; power dissipation

下 期 目 录 (部分)

满足新版 IEC1000-3-2 标准规定(2000 版)的单相 LC 滤波整流器的设计	林维明, Javier SEBASTIÁN, A FERNANDEZ
系统辨识在 UPS 逆变器无差拍控制中的应用	高军, 姜桂宾, 杨旭, 王兆安
大电机环氧云母定子绝缘超声波声速的研究	郝艳捧, 王国利, 谢恒堃, 戴建军
300MW 汽轮发电机定子绕组蒸发内冷的实验研究	阮琳, 顾国彪, 傅德平
SVC 平衡控制方法及其所需信号的检测	逯帅, 刘秀成, 陈建业, 王赞基
三相 PWM 整流器空间矢量控制简化算法的研究	浦志勇, 黄立培, 吴学智
基于 IPM 的脉冲电磁场发生系统	宋婷, 刘瑛岩, 关志成
DARCN 全桥变换器的软开关分析与谐振参数设计	张克强, 瞿文龙, 谭瑞民
CIGRE 电极系统中气隙放电时延的研究	李俭, 乐波, 曹成平, 谢恒堃
变频调速异步电动机铁耗的分析计算	刘玉庆, 李莉
涡流无损检测中快速识别方法的研究	孙晓云, 刘东辉, 孙会琴, 盛剑霓
大型汽轮发电机定子主绝缘老化状态的实验研究	卢伟胜, 马小芹, 乐波, 项添春, 等
电力设备中液位高精度变送技术的研究	赵龙章, 梁庆荣
面向对象技术在暂态全过程自适应仿真中的应用	王庆平, 陈超英, 陈礼义
一种新颖的高功率因数整流器的研究	谢仁践, 张波
一种适用于推挽式逆变器的低损耗缓冲吸收器及其对功率电路的影响	刘超英