

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190286

非理想三相三重变换电路效率分析

巫付专, 霍国平, 彭圣, 李昊阳

(中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 针对传统三相三重电路不便分析系统实际效率的问题, 结合非理想状态三相三重电路的运行状态, 推导非理想状态下元件的等效模型, 建立非理想系统等效电路。并根据其等效电路推导出效率的计算公式, 分析在非理想状态下占空比以及各元件参数对效率的最终影响, 对系统分析以及电路设计时器件的选取和参数计算提供理论依据。进行了 SEMISEL 损耗仿真与 Matlab 电路仿真, 并搭建了实验平台。最终仿真与实验结果及推导模型相吻合, 验证了该模型能够很好地描述非理想状态下不同因素对效率的影响。

关键词: 非理想; 三相三重; 效率; 占空比; 参数计算

Efficiency analysis of non ideal three-phase triple circuit

WU Fuzhuan, HUO Guoping, PENG Sheng, LI Haoyang

(School of Electronic and Information, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: It is inconvenient to analyze the actual efficiency of the traditional three-phase triple circuit. Based on the operation state of three-phase triple circuit in non-ideal state, the equivalent model of components in non-ideal state is deduced, and the equivalent circuit of non-ideal system is established. According to the equivalent circuit, the calculation formula of efficiency is deduced and the duty cycle and the ultimate influence of component parameters on efficiency are analyzed in the non-ideal state. It provides theoretical basis for system analysis and device selection and parameter calculation in circuit design. The SEMISEL loss simulation and Matlab circuit simulation are carried out, and the experimental prototype is built. The simulation and experimental results coincide with the derived models, which verifies that the derived model can well describe the influence of different factors on efficiency under non-ideal conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61304115).

Key words: non-ideal; three-phase triple circuit; efficiency; duty cycle; parameter calculation

0 引言

随着电力电子领域的发展, 人们对 DC/DC 变换电路提出了更高的要求, 在具有稳定性能的同时要具有较高的效率。其中多相多重斩波电路由于稳定可靠、输出电流频率高而脉动小等优点在低电压大电流场合得到广泛的应用。目前对此类的研究多集中在建模与控制方向^[1-5], 国内外也有一些学者对 DC/DC 变换器损耗和效率最优化进行了分析^[6-12]。如文献[13-14]对电路中开关管损耗与开关机理进行了分析; 文献[15]对双向 DC/DC 变换器轻载损耗和效率最优化进行了分析, 但只考虑了轻载下开关管的损耗而忽略了其他器件的损耗。文献[16]提出通

过变频的手段来使电路效率最优。虽然对变换器损耗的计算与效率的优化有了不少研究, 但对整个系统依然缺少综合的损耗模型^[17], 也未对整个系统效率与系统参数选择的关系进行详细的分析。文章提出一种分析方法, 结合电路运行状态, 用元器件的等效模型代替理想模型; 推导出了非理想三相三重变换电路的等效电路; 分析各元件产生的损耗, 推导出效率计算模型, 为效率的优化和器件的选型及器件参数的设计提供了理论依据。而此分析方法也可拓展至其他拓扑结构。

1 非理想状态三相三重变换等效电路

1.1 理想三相三重变换电路

三相三重降压变换电路可视为 3 个结构相同的 Buck 变换电路组成, 如图 1 所示。而由于自身拓扑

结构的特性, 对其进行效率分析时可拆解为 Buck 电路进行分析。

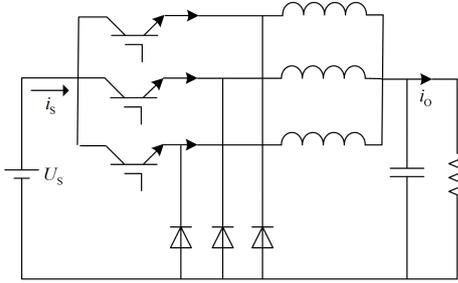


图 1 理想三相三重变换电路

Fig. 1 Ideal three-phase triple circuit

Buck 变换电路按电感电流是否连续可分为: 连续模式、断续模式和临界模式。Buck 变换电路参数的选取一般以临界模式^[18]为参考进行设计计算。

而理想化的电路分析可为电路设计时器件的选取提供一定的理论支持, 但在理想状态下开关管、二极管、电感与电容都不消耗功率。但在实际中开关管和二极管、电感和电容等都会产生一定的损耗。由于电容的损耗较前几种损耗相对较小, 因此本文忽略电容的损耗, 主要分析前三种元件的等效电路及损耗。

1.2 非理想状态器件等效电路

1) 非理想开关器件等效电路

开关器件以 IGBT 为例进行分析, IGBT 结构等同于 N 沟道 MOSFET 与 PNP 晶体管构成的达林顿结构^[14]。要有一个简单且方便计算的电路模型精确地表达有一定的困难。根据其工作过程 IGBT 的总损耗通常可分为静态损耗和动态损耗。其中静态损耗的计算一般只考虑导通损耗。导通损耗与通过的电流和占空比成正比, 随温度升高而增加, 随栅极和漏极之间的电压(\$U_{ge}\$)的增加而减小。动态损耗即开关损耗, 它与开关频率、电流和电压成正比, 随温度升高而增加, 随栅极的增大而增大, 随门极关断电压的增加而减小。其开关过程如图 2 所示。

开关管导通损耗 \$P_{on}\$ 主要与压降 \$U_{ce}\$、导通电流 \$I_o\$ 与导通时间 \$T_{ON}\$ 有关, 可表示为

$$P_{on} = U_{ce} I_o f_s T_{ON} \quad (1)$$

式中, \$f_s\$ 为开关管频率。而饱和压降不仅与电流大小有关, 还与 IGBT 此时结温 \$T_j\$ 有关, 一般以式(2)表示。

$$U_{ce} = V_{T0} + r_T \cdot I \quad (2)$$

式中: \$r_T\$ 为近似曲线的斜率, 即 \$\Delta U_{ce} / \Delta I\$; \$V_{T0}\$ 为该曲线与 X 轴的交点电压值。等效电路可以用电动势(\$U_T\$)代替。

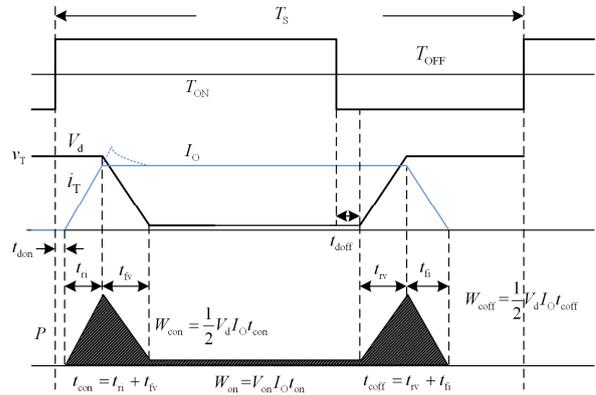


图 2 IGBT 的工作波形图

Fig. 2 IGBT working waveforms

IGBT 的开关损耗 \$P_{sw}\$ 主要与母线电压 \$V_{cc}\$、电流、开关频率 \$f_s\$、结温 \$T_j\$、门级电阻 \$R_g\$ 和回路电感 \$L_{ce}\$ 有关, 其开关损耗表达式为

$$P_{sw}(f_s, I_s, V_{CC}, T_j, R_g, L_{ce}) = f_s \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \left(\frac{I_s}{I_{ref}}\right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{ref}}\right)^{K_v} \cdot K(T_j) \cdot K(R_g) \cdot K(L_s) \quad (3)$$

式中: \$E_{on}\$ 与 \$E_{off}\$ 分别为已知参考电压、电流、门级电阻、结温 \$T_j\$ 和回路电感等条件下的开通损耗与关断损耗; \$K_i\$ 为电流折算系数; \$K_v\$ 为电压折算系数; \$K(T_j)\$ 为温度折算系数; \$K(R_g)\$ 和 \$K(L_s)\$ 分别为门级电阻和回路电感的折算系数。而上述表达过于复杂, 亦可以利用图形化的方式来表达其开关损耗, 如式(4)所示。

$$P_{sw} = \frac{1}{2} U_s I_o f_s (t_{con} + t_{coff}) \quad (4)$$

当 \$U_s\$、\$I_o\$ 和 \$f_s\$ 等参数一定时, 等效电路可用一个电阻 \$R_{ds}\$ 等效。则开关管的等效电路可表示为如图 3 所示。

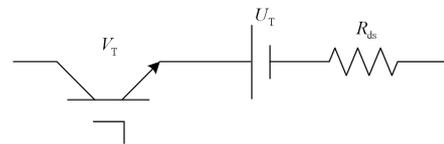


图 3 开关管的等效电路

Fig. 3 IGBT equivalent circuit

2) 非理想二极管等效电路

二极管主要以半导体 PN 结为基础, 同样它的损耗由开关损耗和通态损耗组成。导通损耗与电流和占空比成正比。开关损耗与开关频率、电流、电压成正比, 随温度升高而增加。若忽略温度的影响, 则二极管开关损耗为

$$P_{ds} = f_s \cdot E_{rec} \cdot I_F / I_{nom} \quad (5)$$

式中: f_s 为开关频率; E_{rec} 为续流能量; I_F 为实际工作电流; I_{nom} 为额定工作电流。当 E_{rec} 、 I_F 和 f_s 一定时, 损耗模型可用一个电阻 R_{VD} 等效。二极管导通损耗为

$$P_{ss} = U_{VD} \cdot I_F \quad (6)$$

式中: U_{VD} 为导通压降(指导手册提供); I_F 为实际工作电流。二极管通态损耗主要和通态压降有关, 可以用一个电动势代替。二极管等效电路如图 4 所示。

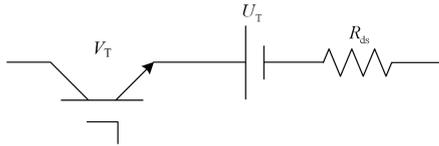


图 4 二极管等效电路

Fig. 4 Diode equivalent circuit

3) 非理想电感等效电路

电感线圈的损耗主要是线圈导线引起的铜耗和铁心损耗, 对于普通 DC/DC 变换电路, 铜耗包括直流 I^2R 损耗和交流损耗。其中交流损耗主要由趋肤效应和邻近效应所导致。它可以通过多根导线并联适度缓解。铁心损耗主要由磁滞损耗和涡流损耗两部分, 其中铁心中的磁滞损耗正比于磁滞回线的面积。其与电流的波动和频率有关。电感为非线性元件, 其损耗精确计算比较困难, 具体计算可参考文献[19], 当电路参数选定后, 等效电路如图 5 所示。



图 5 电感线圈等效电路

Fig. 5 Inductance coil equivalent circuit

1.3 非理想状态三相三重变换等效电路

根据上节的分析, 忽略电容漏电流的非理想状态三相三重变换等效电路如图 6 所示。

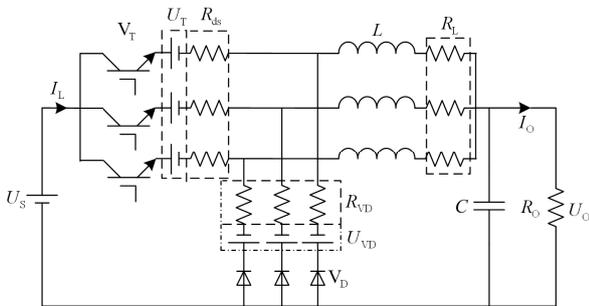


图 6 非理想状态三相三重变换电路

Fig. 6 Non ideal three-phase triple circuit

图 6 中 R_{ds} 为开关管的等效电阻, U_T 为开关管的导通压降, R_{VD} 为续流二极管的等效电阻, U_{VD}

为续流二极管的导通压降, R_L 为电感的等效电阻。而在实际应用中, 无论是三相三重电路还是多相多重电路, 每个支路运行状态一致, 因此只需要分析其中一条支路的运行状态, 随后对其余各支路波形进行叠加即可。三相三重电路总电流的脉动频率是单相电流脉动频率的三倍, 但脉动幅值波动较小, 而在实际应用中随着电流频率的提高, 平波电抗器的重量与体积可显著减小, 滤波器的效果可以明显改善。此外, 当其中一个支路出现故障时, 其他支路可以正常工作, 能够大幅提高系统可靠性。

当 V_T 导通时电感两端电压为

$$u_{Lon} = U_s - I_L R_{ds} - U_T - I_L R_L - U_O \quad (7)$$

当 V_T 不导通时电感两端电压为

$$u_{Loff} = -(U_{VD} + U_O + I_O R_{VD} + I_O R_L) \quad (8)$$

利用伏秒特性可得

$$U_O = [DU_s - DU_T - U_{VD}(1-D)] \cdot \frac{R_O}{DR_{ds} + R_{VD}(1-D) + R_L + R_O} \quad (9)$$

式(9)中, 其占空比 D 不超过 1/3, 稳态非理想状态三相三重斩波电路支路等效电路如图 7 所示。

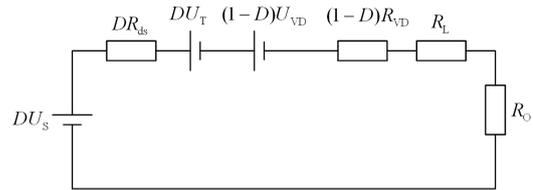


图 7 非理想状态三相三重变换支路等效电路

Fig. 7 Non ideal three phase and triple circuit equivalent circuit

2 非理想状态三相三重变换功耗分析

2.1 功耗分析

根据非理想状态三相三重变换等效电路, 其功率损耗为

$$P_{loss} = 3I_O^2 [DR_{ds} + R_{VD}(1-D) + R_L] + 3I_O [DU_T + U_{VD}(1-D)] \quad (10)$$

式中: R_{VD} 为二极管的等效电阻; R_{ds} 为开关管导通和关断损耗的等效电阻。由于影响开关管实际损耗的因素众多, 会受到开关电压、电流、频率与回路电感等因素的影响, 使等效电阻很难准确计算。可通过参数表获取开通能量 E_{on} 、关断能量 E_{off} 以及续流能量 E_{rec} 等参数来进行等效计算。本文中开关管选型以 IGBT 为例, 其等效电阻计算如式(11)所示。

$$R_{ds} = P_{sw} / I_S^2 \quad (11)$$

二极管的等效电阻 R_{VD} 可采用相同的方法进行计算, 电感的等效电阻有所选的电感型号和材质等

决定,一般都通过参数表进行近似估算。但由于损耗的大小呈现出非线性变化趋势,具体损耗可通过仿真软件进行校正计算。

2.2 SEMISEL 功耗仿真

理论主要分析了 DC/DC 开关周期中的损耗及其影响因素,但理论计算不够精准。且实际中不同情况对应着不同的损耗计算公式。而损耗仿真软件 SEMISEL 能够针对在不同工况下,不同拓扑结构以及不同调制方式进行损耗计算。图 8 与图 9 是在典型工况下的 IGBT 与二极管损耗信息。

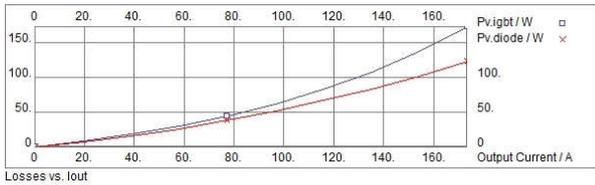


图 8 损耗随电流变化趋势图

Fig. 8 Variation trend of loss with current

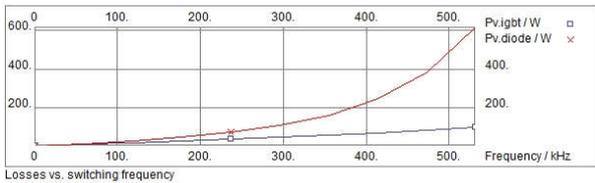


图 9 损耗随频率变化趋势图

Fig. 9 Variation trend of loss with frequency

而在实际中结温^[20]除了会影响到开关管的稳定性,也会对开关管的损耗产生影响,结温越高,损耗越大。而影响结温的因素又包括电压、电流与频率等因素。

3 非理想三相三重电路效率与电路参数分析

设变换电路的输出功率为 P_{out} , 则其效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = 1 / \left(1 + \frac{P_{loss}}{P_{out}} \right) = 1 / \left\{ 1 + \frac{3}{R_o} [DR_{ds} + R_L + (1-D)R_{vD}] + \frac{3}{U_o} [DU_T + (1-D)U_{vD}] \right\} \quad (12)$$

器件损耗会随着结温的升高、电流的增大、频率的增加等而增加。当追求效率最优时,选择合适的器件、调制方式、工作电流与频率等,能够有效提高系统效率^[21-22]。

而当采用软开关和同步整流等技术时,非理想状态三相三重变换等效电路可视具体情况进行分析,例如可参阅文献[1-4, 20],此状态下开关管的开

关损耗可以忽略。而当电路开关管、二极管、电感、开关频率、输出电压和输出功率选定时,其中 R_{ds} 、 R_{vD} 、 U_T 、 U_{vD} 及 R_L (忽略电流纹波对电感的影响)即可确定。此时影响变换电路的效率只有占空比 D 和电感等效电阻。

当要求的效率已知,而其他器件已经选定其功耗无法改变时,可通过调节所设计电感的等效电阻来满足效率的要求。常规电感参数的选取可参考文献[18]进行计算,当考虑效率因素时,可在电感设计时提供额外约束条件,按此原则设计出的电感不仅能满足系统稳定性的要求,同时也能满足效率的要求。

4 仿真与实验

为验证效率与占空比的关系,搭建了基于 Matlab/Simulink 的非理想状态三相三重变换电路仿真模型。以理论估算来设置参数,随后利用 SEMISEL 软件进行校正。给定输出电压为 24 V,输入电压以及效率与占空比的关系如图 10 所示。

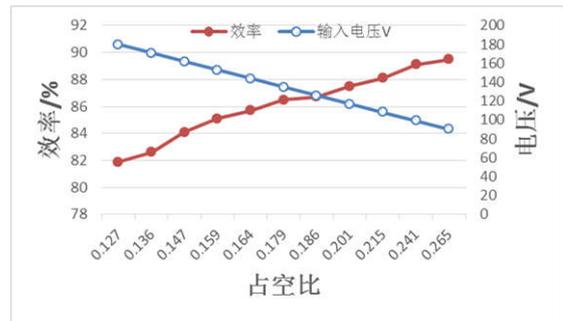


图 10 效率与占空比的关系趋势图

Fig. 10 Relationship between efficiency and duty cycle

从图 10 中可看出,随着占空比的增加,效率呈现上升趋势。为进一步进行实际验证,搭建了样机系统,验证样机采用 DSP28335 为核心控制芯片,采用的 IGBT 型号为 FSAM30SH60A,开关脉冲频率为 4.28 kHz。实验结果如表 1 所示,呈现出随着占空比增加效率提高的趋势。

表 1 实验测试效率与占空比的关系

Table 1 Relationship between experimental efficiency and duty cycle

占空比	输入电压/V	输入功率/W	输出功率/W	效率/%
0.08	200	86.0	70.3	81.7
0.11	160	84.8	70.1	82.6
0.17	106	83.7	70.3	83.6
0.22	84	82.3	70.2	85.2
0.28	66	81.8	70.0	85.6

从仿真上看其结果与理论有所出入, 但总的趋势与理论结果一致。从实验结果看, 由于理论计算忽略了电容的损耗、线路损耗和占空比变化引起的电流变化, 造成电感的损耗, 也造成了实验结果与理论值存在一定的误差, 但总的趋势与理论结果一致。

5 结语

为了对非理想三相三重电路进行效率计算, 本文在分析了各元件等效模型的基础上建立了非理想三相三重变换电路的等效电路; 推导了效率的计算公式以及非理想状态下占空比以及各元件实际参数对效率的影响, 并通过仿真与实验验证了推导模型的合理性。而当电路开关管、二极管、电感、开关频率、输出电压和输出功率选定时, 调整占空比可以提高系统的效率。当其他因素选定其功耗无法改变时, 可调节电感的等效电阻的大小来满足系统的效率要求, 为器件的选取以及电感的参数设计提供了依据。

参考文献

- [1] 周进, 何志琴, 杨睿琬. DC/DC 变换器 Buck 电路建模分析与控制研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 95-100.
ZHOU Jin, HE Zhiqin, YANG Ruiwan. Modeling analysis and control research of DC/DC converter Buck circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(9): 95-100.
- [2] HEGAZY O, BAGHDADI M E, MIERLO J V, et al. Analysis and modeling of a bidirectional multiport DC/DC power converter for battery electric vehicle applications[C]// 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, August 26-28, 2014, Lappeenranta, Finland.
- [3] 戴喜良, 刘珂, 张雅洁. H 桥级联型谐波发生器直流电压均衡分析与控制[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 73-79.
DAI Xiliang, LIU Ke, ZHANG Yajie. Analysis and control of DC voltage balance of H-bridge cascade harmonic generator[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(3): 73-79.
- [4] 韩素敏, 吴晓静, 苗纪青. DC-DC 变换器的差模传导干扰耦合通道建模分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 122-128.
HAN Sumin, WU Xiaojing, MIAO Jiqing. Modeling of differential mode conducted interference coupling channel of a DC-DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 122-128.
- [5] 章勇高, 熊健, 王帅, 等. 一种基于混合 Buck/Boost 电路的两级式逆变器功率解耦方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 70-77.
ZHANG Yonggao, XIONG Jian, WANG Shuai, et al. Research on a decoupling method of a two-stage inverter with hybrid Buck/Boost circuit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 70-77.
- [6] 叶俊, 张峰. Buck 同步整流电路 MOSFET 损耗的计算[J]. 电力电子技术, 2007, 41(12): 109-111.
YE Jun, ZHANG Feng. The loss calculation of the MOSFET in synchronous buck circuit[J]. Power Electronics, 2007, 41(12): 109-111.
- [7] OSTMAN K B, JARVENHAARA J K. A rapid switch bridge selection method for fully integrated DCDC buck converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4048-4051.
- [8] 刘爽, 牟龙华, 许旭锋, 等. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 63-70.
LIU Shuang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Research on power electronic devices failures' effect on microgrid operational reliability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 63-70.
- [9] KRISMER F, KOLAR J W. Efficiency-optimized high current dual active bridge converter for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2745-2760.
- [10] KRISMER F, KOLAR J W. Accurate power loss model derivation of a high-current dual active bridge converter for an automotive application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 881-891.
- [11] TAO F, XIE Z, CHENG J, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [12] 程向文, 黄辉, 李钙, 等. 使用 SiC 开关的两电平和三电平逆变器损耗与效率分析[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 99-105.
CHENG Xiangwen, HUANG Hui, LI Gai, et al. Analysis on losses and efficiencies of two-level and three-level inverters using SiC switches[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 99-105.
- [13] 罗毅飞, 刘宾礼, 汪波, 等. IGBT 开关机理对逆变器死区时间的影响[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 62-68.
LUO Yifei, LIU Binli, WANG Bo, et al. The influence of IGBT switching mechanism on the dead-time of inverters[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 62-68.

- [14] 刘宾礼, 刘德志, 罗毅飞, 等. 基于电压电流的 IGBT 关断机理与关断时间研究[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 384-392.
LIU Binli, LIU Dezhi, LUO Yifei, et al. Investigation into the turn-off mechanism and time of IGBT based on voltage and current[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 384-392.
- [15] 杨玉岗, 宁浩轩, 李涛, 等. 双向 DC/DC 变换器轻载损耗和效率最优化分析[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2527-2530.
YANG Yulan, NING Haoxuan, LI Tao, et al. Optimization analysis of power loss and efficiency of bidirectional DC/DC converter at light load[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2527-2530.
- [16] GILDERSLEEVE M, FORGHANIZADEH H P, MEMBERS, et al. A comprehensive power analysis and a highly efficient, mode-hopping DC-DC converter[C] // IEEE Asia-pacific Conference on ASIC, August 8-8, 2002, Taipei, Taiwan, China.
- [17] 李婧, 袁立强, 谷庆, 等. 一种基于损耗模型的双有源桥 DC-DC 变换器效率优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 66-76.
LI Jing, YUAN Liqiang, GU Qing, et al. An efficiency optimization method in dual active bridge DC-DC converter based on loss model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 66-76.
- [18] 巫付专, 沈虹. 电能变换及控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [19] 周岩, 张俊波, 陈麒米. 开关变换器功率电感磁损建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 132-136.
ZHOU Yan, ZHANG Junbo, CHEN Qimi. Modeling and application of core losses for power inductor in switching converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 132-136.
- [20] 姚芳, 王少杰, 李志刚. IGBT 结温获取方法及其讨论[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 42-48.
YAO Fang, WANG Shaojie, LI Zhigang. Review of IGBT junction temperature acquisition method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(12): 42-48.
- [21] MING D L, LEE Y H, CHEN K H. A high efficiency adaptive frequency hopping controlled 1/3x step-down switch capacitor DC-DC converter with deep-green mode operation[C] // IEEE International Symposium on Circuits & Systems, 2012: 966-969.
- [22] 施玉祥, 柳绪丹, 邓成, 等. Boost-LLC 高效率 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2010, 44(8): 24-26.
SHI Yuxiang, LIU Xudan, DENG Cheng, et al. Boost-LLC high efficiency DC/DC converter[J]. Power Electronics, 2010, 44(8): 24-26.
-
- 收稿日期: 2019-03-17
作者简介:
巫付专(1965—), 男, 硕士, 教授, 主要从事电力电子与电能质量方面的研究; E-mail: wfzh@zzti.edu.cn
霍国平(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与微电网。E-mail: flyhgp@yeah.net
(编辑 魏小丽)