

三电平 IGBT 变频器损耗分析及计算

朱 武, 忻 力, 李彦涌, 张东辉

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 文章以三电平应用为例, 对 IGBT 器件工作过程中损耗的构成和影响因素进行分析, 建立了一个适用于各种控制方式的三电平 IGBT 变频器损耗计算模型, 其以软件仿真数据或试验数据作为输入来计算三电平拓扑中每个功率器件的损耗功率, 计算值和测量值的误差在 2% 以内。利用该模型还可对前期产品设计进行仿真分析, 精确计算系统损耗, 并且根据器件损耗测试核对仿真的精确性, 进而配置与之匹配的冷却系统, 确保 IGBT 器件工作结温不超过器件要求值, 并避免冷却系统的过度设计。对于不同功率器件搭建的系统, 均可以参考和借鉴该方法进行系统损耗的精确计算。

关键词: IGBT; 三电平变频器; 散热; 损耗计算; 结温保护

中图分类号: TM46; TN32

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)05-0083-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.05.015

Loss Analysis and Calculation for Three-level IGBT Inverter

ZHU Wu, XIN Li, LI Yanyong, ZHANG Donghui

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Taking three-level converter application as an example, this paper analysed the components and influence factors of heat loss of working IGBT, presented an approach to calculate the heat loss of IGBT in three-level converter by different control methods, used the simulation or testing data as input to obtain heat losses of each IGBT in a three-level topology converter, and obtained a result whose error is within 2%. Furthermore, this approach can also be applied to the product design on early stage for precise computation of heat losses. With this approach, it is more likely to choose a reasonable cooling system which can guarantee that junction temperature is below permitted values and a rational redundant capacity of cooling system at the same time. Precise calculation of heat losses of the system with other power devices may refer to this paper as well.

Keywords: IGBT; three-level inverter; heat dissipation; loss calculation; junction temperature protection

0 引言

IGBT 是一种广泛应用的功率半导体器件, 具有开关频率高、通态电流大等优点。二极管中点箝位型三电平变频器与两电平变频器相比, 使用相同电压等级的功率器件可实现更高电压输出, 且在相同开关频率下, 交流输出电压电平数越多, 谐波含量越低。因此基于 IGBT 的二极管中点箝位三电平变频器能实现高电压、大容量、高性能的输出, 在大功率传动领域得到广泛应

用^[1]。

变频器中功率器件的损耗研究主要涉及器件单次开关的瞬态损耗和变频器系统运行时功率器件的稳定损耗功率两方面。对器件瞬态损耗的研究, 通常通过建立器件损耗模型进行, 建模方法可分基于器件物理结构和基于数学方法两类。系统总损耗计算方法相对成熟, 但是不同的控制方式和不同的输入条件下精确计算每个器件的损耗过程非常复杂; 而精确的功率器件损耗计算对于器件运行的可靠性非常重要, 并且可以根据器件在系统不同工况下的损耗占比和分布针对性地配置冷却装置, 实现冷却系统的最优匹配, 因此建立一个与控制方法无

收稿日期: 2017-08-14

作者简介: 朱武 (1987-), 男, 工程师, 主要从事功率半导体器件应用研究工作。

关、能够计算系统中每个功率器件损耗的通用平台非常重要。

当前针对 IGBT 变频器损耗的研究很多,包括两电平、三电平以及多电平拓扑的。IGBT 变频器的损耗主要由 IGBT 的开通损耗、关断损耗、通态损耗和 FRD 的通态损耗及关断损耗组成,文献 [2] 以建立 IGBT 和 FRD 开关过程功能模型的方法计算 IGBT 以及 FRD 的损耗,这种计算方法只能对趋势进行评估;文献 [3] 提出以两电平相桥臂作为单元计算变频器的损耗,该方法以理想开关器件代替 IGBT 进行分析,没考虑影响损耗的因素,其计算结果准确度不高;文献 [4] 建立了功率器件损耗计算平台,对功率器件损耗情况进行计算,但该平台没有计算吸收电路的损耗,无法计算系统总损耗,不能对系统损耗进行综合分析。

本文深入分析了三电平 IGBT 变频器损耗的组成、影响因素及计算方法,依据器件单管实验的方法得到 IGBT 和 FRD 的损耗特性曲线;分析了三电平 IGBT 变频器系统换流情况,依据控制脉冲和相桥臂交流电流推导出每个 IGBT、FRD 以及吸收电路器件的损耗计算方法,并使用 Matlab/Simulink 建立了适用于所有控制算法的通用三电平 IGBT 变频器损耗计算模型。该模型能够准确计算 IGBT 和 FRD 的通态损耗及开关损耗,并通过三电平 IGBT 模块的功率考核实验验证了该损耗计算模型的准确性。

1 三电平 IGBT 变频器损耗分析

IGBT 变频器总损耗由 IGBT 和 FRD 作为开关器件在静态、动态以及状态切换过程中的损耗构成。IGBT 模块正向截止电流非常小,所以计算时正向截止损耗通常可忽略;在大功率变频器中,控制损耗所占比例也非常小,计算时通常也可忽略。因此,在大功率变频器中,IGBT 损耗包括通态损耗、开通损耗和关断损耗;FRD 损耗包括通态损耗和关断损耗(反向恢复损耗),由于 FRD 开通损耗所占比例非常小,也忽略。

1.1 IGBT/FRD 通态损耗

IGBT 的通态损耗由其通态压降和流经 IGBT 的电流确定:

$$P_{\text{con}} = V_{\text{cesat}} \times I_C \quad (1)$$

式中: I_C ——流过 IGBT 器件的电流; V_{cesat} ——IGBT 器件饱和压降,其大小与 I_C 、芯片结温(T_j)及门极电压(V_{ge})相关。

V_{cesat} 受 IGBT 器件结温的影响,结温越高,压降越大,导致通态损耗也越大。

FRD 的通态损耗由其通态压降和流经 FRD 的电流确定:

$$P_f = V_f \times I_f \quad (2)$$

式中: I_f ——流过 FRD 器件的电流; V_f ——FRD 器件通态压降,其大小与 I_f 和 T_j 相关。

1.2 IGBT 开通和关断损耗

图 2 示出 IGBT 开关过程波形图。可以看出,IGBT 正常开通和关断过程中存在电流和电压的重叠期,所以存在 IGBT 的开关损耗。开通损耗是 IGBT 器件开通过程中电流与电压的积分,积分起止时刻参考 IGBT 器件开通过程,其大小与开通时的 I_C , T_j , V_{ce} (集电极与发射极间电压)及器件的驱动参数相关。开通过程中由于存在对管 IGBT 器件中二极管的反向恢复现象,所以开通损耗与二极管的特性存在一定关系;同时开通过程中回路中的杂散电感在电流的变化率 di_c/dt 作用下会导致器件 V_{ce} 降低从而影响开通损耗。

关断损耗是关断过程中电流与电压的积分,积分起止时刻参考器件关断过程,其大小与关断时的 I_C , V_{ce} , T_j 及器件的驱动参数相关。关断过程中回路中的杂散电感在电流的变化率 di_c/dt 作用下会导致器件 V_{ce} 的升高,形成关断过电压从而影响关断损耗^[5]。

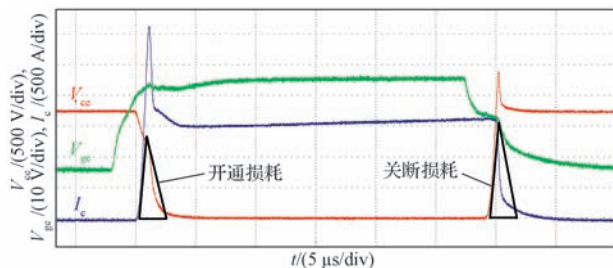


图 1 IGBT 开关过程
Fig. 1 IGBT Switching process

1.3 FRD 反向恢复损耗

反向恢复是 FRD 的固有特性,发生在由正向导通转为被动反向阻断的瞬间,表现为:先产生一个反向电流,后再恢复为反向阻断状态。反向恢复损耗是反向恢复过程中电流与电压的积分,起止时间为器件反向恢复过程时间,即从 10% 的 V_f 到 2% 的 I_f ,其大小与正向导通时的电流(I_f)、电流变化率(di_f/dt)、反向电压(V_r)及芯片的结温(T_j)相关。

2 三电平 IGBT 变频器损耗计算

系统正常运行时,由于电流和电压之间的相位关系,二极管中点箝位三电平变频器电路相桥臂有 6 条电流通路(图 4)。相桥臂 4 个 IGBT 器件有 6 种有效开关状态,依次为 S0 (0000), S1 (1100), S2 (0100),

S3 (0110)，S4 (0010)，S5 (0011)^[6]。以 S5 开关状态为例，0011 表示 IGBT 器件 V1 和 V2 为关断状态，V3 和 V4 为导通状态，其他状态依此类推。其中，S0 为系统停机封脉冲状态；为保证功率器件的运行安全，S1~S5 五种开关状态只能在相邻状态之间切换，不能跳跃变化。

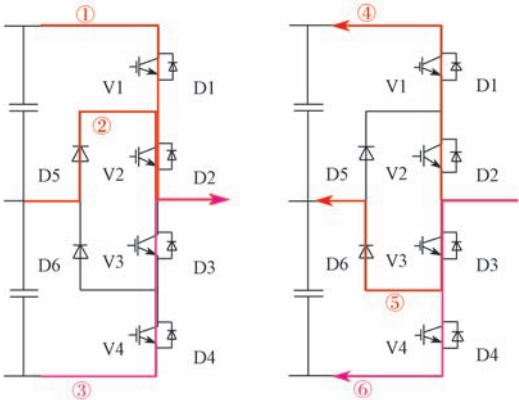


图 2 二极管中点箝位三电平拓扑电流回路
Fig. 2 Current loop of the diode neutral point clamped three-level topology

2.1 IGBT/FRD 通态损耗计算

系统运行时，利用式（1）和式（2）计算 IGBT 和 FRD 的通态损耗。由三电平电路拓扑开关动作的规律可知，存在 IGBT 处于导通状态但桥臂电流流过 IGBT 的反并联二极管的情况，此时在 IGBT 上并不产生通态损耗，所以在计算 IGBT 和 FRD 的通态损耗时需确定每个元件在哪种条件下是处于导通状态且有电流流过。由相桥臂 IGBT 的控制脉冲以及相桥臂交流电流的方向可以准确判断相桥臂每个器件的开关状态以及是否有电流通过，判断方法如表 1 所示。

表 1 IGBT/FRD 通态损耗确定方法
Tab. 1 Determination method of IGBT/FRD on-state losses

通态损耗元件	判断依据	
	开关状态	交流电流方向
V1	V1 通态	流出
V2	V2 通态	流出
V3	V3 通态	流入
V4	V4 通态	流入
D1	V3 断态	流入
D2	V3 断态	流入
D3	V2 断态	流出
D4	V2 断态	流出
D5	V1 断态，V2 通态	流出
D6	V4 断态，V3 通态	流入

2.2 IGBT/FRD 关断损耗计算

依据文献 [7] 可知，中点箝位二极管 D5 和 D6 在 V2 和 V3 关断电流时，由于不承受反向恢复电压，因

此不产生反向恢复损耗；D2 和 D3 在电流截止后由于 V2 和 V3 处于导通状态，因此 V2 和 V3 不承受反向恢复电压，同样不产生反向恢复损耗。依据三电平开关器件动作规律可知，IGBT 中 V1 在电流流经 D1 和 D2 时进行关断动作不会产生关断损耗；V2 在电流流经 V3 和 D6 时进行关断动作不会产生关断损耗。同理，V4 在电流流经 D3 和 D4 时进行关断动作不会产生关断损耗；V3 在电流流经 V2 和 D5 时进行关断动作不会产生关断损耗。

IGBT 关断损耗的产生条件是有电流流过该 IGBT 时进行关断动作；FRD 产生关断损耗的条件是在有导通电流流过的情况下关断且关断后承受反向电压。依此原则，由 IGBT 控制脉冲以及相桥臂交流电流得到 IGBT 和 FRD 产生关断损耗的方法，如表 2 所示。

表 2 IGBT 相桥臂器件产生的关断损耗确定方法
Tab. 2 Determination method for turn-off losses of IGBT phase bridge arm devices

关断损耗元件	判断依据	
	开关动作	交流电流方向
V1	V1 关断	流出
V2	V2 关断	流出
V3	V3 关断	流入
V4	V4 关断	流入
D1	V3 开通	流入
D2	无关断损耗	无关断损耗
D3		
D4	V2 开通	流出
D5	V1 开通	流出
D6	V4 开通	流入

2.3 IGBT/FRD 开通损耗计算

通常，根据器件的工作特性和损耗计算方式，FRD 的开通过程损耗可以忽略，只计算通态损耗；而 IGBT 的开通过程中，电流曲线和电压曲线有明显的交汇，损耗不可以忽略。

当交流电流流入交流端、流经 D1 和 D2 时，如果此时 V1 或 V2 开通，由于电感型负载交流电流方向不能突变以及半导体的单向导电性，交流电流仍然走 D1 和 D2，虽然 IGBT 芯片存在导通压降，但 IGBT 芯片未通过电流，所以此时 V1 和 V2 开通 IGBT 不会产生开通损耗。同样，当交流电流流出交流端、流经 D3 和 D4 时，如果此时 V3 或 V4 开通，由于电感型负载交流电流方向不能突变以及半导体的单向导电性，电流仍然走 D3 和 D4，此时 V3 或 V4 开通 IGBT 不会产生开通损耗。因此，IGBT 开通损耗的产生条件是开通后有电流流过该 IGBT。由此可得产生 IGBT 开通损耗的判断方法如表 3 所示。

表 3 产生 IGBT 开通损耗的判断方法
Tab. 3 Judgment method for IGBT turn-on loss generation

开通损耗元件	判断依据	
	开关动作	交流电流方向
V1	V1 开通	流出
V2	V2 开通	流出
V3	V3 开通	流入
V4	V4 开通	流入

3 三电平 IGBT 变频器损耗计算仿真平台搭建

对于已知直流电压和功率等级的三电平 IGBT 变频器系统，按照系统电压、电流进行 IGBT 和 FRD 双脉冲斩波实验，并用 Xviewer 软件计算 IGBT 和 FRD 在各关断电流下的损耗，得到 IGBT 及 FRD 的关断损耗与电流的关系曲线。按照器件损耗计算方法，输入三电平变频器相桥臂各 IGBT 控制脉冲以及该相电流的情况，即可计算出变频器各元件的通态损耗、开通损耗以及关断损耗。

在 Matlab/Simulink 中搭建损耗计算仿真平台，其损耗仿真计算框图如图 3 所示。损耗仿真计算平台包括系统工况仿真、损耗计算和损耗分析 3 部分。系统工况仿真得到损耗计算所需的控制脉冲和负载电流信号，这也可由实测的相桥臂电压、电流信号处理后得到。损耗计算分为 IGBT 和 FRD 通态损耗计算、IGBT 和 FRD 关断损耗计算以及 IGBT 开通损耗计算 3 部分。损耗分析部分利用计算的损耗结果与模块热阻进行器件结温计算，同时还可清晰显示相桥臂中各器件的损耗分布情况，为变频器在特殊工况下的分析和系统保护提供指导。

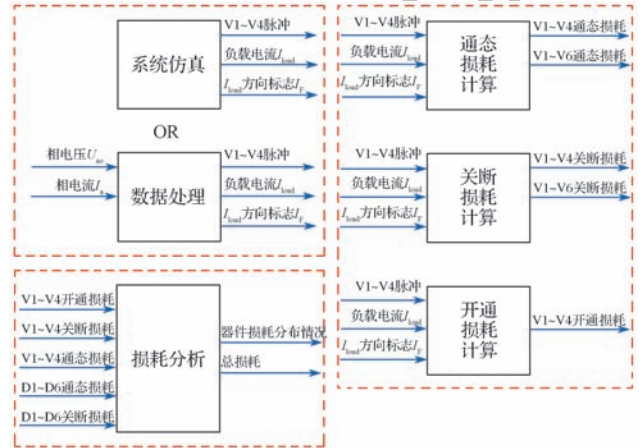


图 3 损耗计算仿真模型框图
Fig. 3 Block diagram of the loss calculation simulation model

损耗计算仿真模型中忽略了 IGBT 和 FRD 的断态损耗，没有考虑模块中各 IGBT 元件下散热器台面温度的差异等，这使得仿真得到的损耗值与实际系统损耗值存在细小差异，但不影响对系统总损耗的判断和分析。另外，在固定直流电压和电流的情况下，损耗随温度的变化而变化，仿真时需注意不同温度下损耗计算的迭代。

4 实验验证

三电平 IGBT 相模块采用 FF1000R17IE4 型 IGBT，在半桥直流电压 900 V、电流 130 A~1 270 A 工况下进行斩波实验，得到 IGBT 开关损耗以及 FRD 反向恢复损耗（图 4）。可以看出，IGBT 的关断损耗和电流近似呈线性关系。

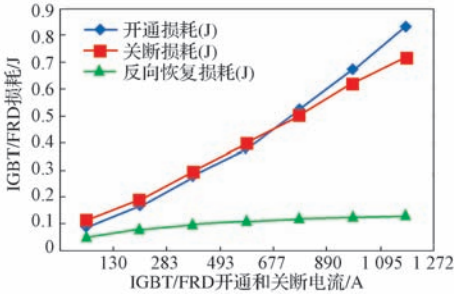


图 4 实测损耗 - 电流关系曲线
Fig. 4 Measured loss-current relationship curves

三电平 IGBT 相模块功率考核电路如图 5 所示。其中，半桥电压为 1 800 V，负载为 0.025 Ω+0.4 mH，负载输出频率为 50 Hz，开关频率为 2 000 Hz，电流有效值为 650 A。按照试验参数，将实际试验用控制程序在 Matlab 中进行仿真，利用损耗计算仿真平台得到总损耗为 4.26 kW，各个元件的损耗情况如图 6 所示。

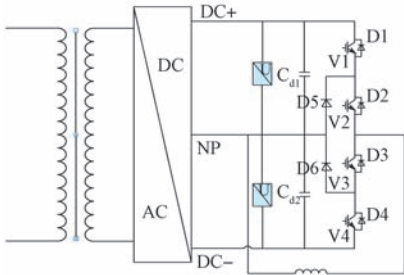


图 5 三电平模块功率考核电路
Fig. 5 Power assessment circuit of the three-level module

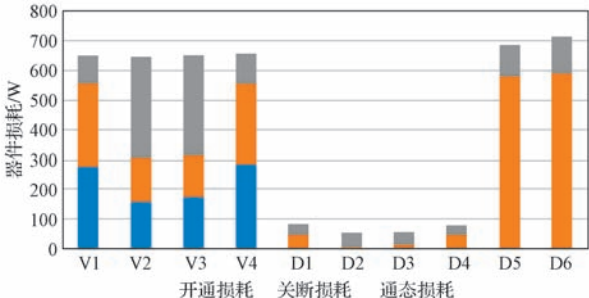


图 6 各元件损耗情况
Fig. 6 Losses of the components

由图 6 可知，4 个 IGBT(V1~V4) 总损耗基本一致；反并联二极管 (D1~D4) 的损耗很小；中点箝位二极管 (D5~D6) 的损耗大，且主要是由 FRD 通态损耗引起。形成这样损耗分布是因为负载电阻很小，输出电压小，电压处于零电平的时间长，电流在模块内部主要流经内管 (V2 或 V3) IGBT 和中点箝位二极管。

在搭建的模块试验平台中进行模块功率考核实验，其中模块采用水冷方式散热，其试验波形如图 7 所示。可以看出，V2 通流时间长，开关次数少，因此其通态损耗大；V1 通流时间短，开关次数多，因此其开关损耗大；D5 的通流时间长，开关次数也多，因此其损耗最大。实验结果与损耗仿真结果一致，验证了损耗分析方法的有效性。

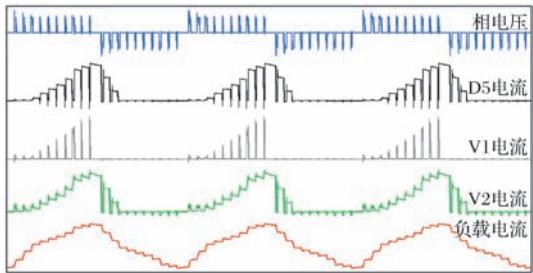


图 7 实验电流波形
Fig. 7 Experimental current waveforms

试验过程中，记录试验平台水冷系统流量及进出口温度。负载电流 650 A 时，进水温度 25.2 ℃，回水温度 32.7 ℃，流量 8 L/min。通过损耗计算模型，计算得到其总损耗为 4.2 kW。可以看出，实际损耗与计算损耗的误差在 2% 以内，损耗计算精度较高，满足工程应用需求。

5 结语

本文分析了三电平 IGBT 变频器功率损耗的组成及影响因素，依据三电平变频器换流及开关动作规律分析得出每个功率器件的损耗计算方法，基于 Matlab 软件建立了以仿真数据或实测相电压及电流波形为输入的损耗仿真计算模型，进行了三电平 IGBT 相模块功率考核实验。损耗计算结果与实验结果误差在 2% 以内，验证了损耗计算模型的准确性。该方法还可拓展应用于不同的全控型开关器件。系统中单个器件损耗精确计算，依

赖于功率器件开关损耗和导通损耗的精确计算，而功率器件 IGBT 的损耗随着其芯片结温的变化会有一定的差异，后续将进一步深入研究功率器件损耗与其散热条件的关系，细化单个器件损耗同工况、散热条件以及系统的关系，甚至与器件寿命的关系。

参考文献：

[1] 谭国俊, 景巍. 有源钳位三电平变频器及其结温平衡控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 159-163.
TAN G J, JING W. Active Neutral Point Clamped Three-Level Converter and Its Junction Temperature Balancing Control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 159-163.
[2] 崔梅婷, 潘艳, 王伟, 等. 软穿通型 3 300 V/1 200 A IGBT 模块建模与仿真 [J]. 智能电网, 2017, 5(4): 329-333.
CUI M T, PAN Y, WU W, et al. Modeling and Simulation of Soft-punch-through 3300 V/1200 A IGBT Module [J]. Smart Grid, 2017, 5(4): 329-333.
[3] ALVAREZ S, LADOUX P. Universal power losses estimator for low voltage IGCTs switching cells [C] //European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden. Germany: IEEE, 2006.
[4] XIE L, WENG G, QI J, et al. A universal power loss estimator for three level IGCT converter [C] //International Conference on Electrical Machines and Systems. Hangzhou: IEEE, 2014: 2495-2500.
[5] 熊妍, 沈燕群, 江剑, 等. IGBT 损耗计算和损耗模型研究 [J]. 电源技术应用, 2006(5): 55-60.
XIONG Y, SHEN Y Q, JIANG J, et al. Study on Loss Calculation and Model for IGBT [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2006(5): 55-60.
[6] 王群京, 陈权, 姜卫东, 等. 中点钳位型三电平逆变器通态损耗分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 66-71.
WANG Q J, CHEN Q, JIANG W D, et al. Analysis of Conduction Losses in Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 66-71.
[7] 景巍, 谭国俊, 叶宗彬. 大功率三电平变频器损耗计算及散热分析 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 134-140.
JING W, TAN G J, YE Z B. Losses Calculation and Heat Dissipation Analysis of High-Power Three-Level Converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 134-140.

(上接第 82 页)

[5] 张祥, 陈燕平, 忻力, 等. 新一代集成式 TGA23A 型地铁牵引逆变器 [J]. 机车电传动, 2014(1): 61-64.
ZHANG X, CHEN Y P, XIN L, et al. New-generation Integrated Metro Traction Inverter TGA23A [J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(1): 61-64.
[6] 曾明高, 严志勇, 张晓, 等. 地铁集成式辅助电源研制 [J]. 机车电传动, 2014(1): 69-73.
ZENG M G, YAN Z Y, ZHANG X, et al. Design of Integrated Auxiliary Power Supply for Metro [J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(1): 69-73.
[7] BAYERER R, DOMES D. Power circuit design for clean switching [C] // 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg, Germany, 2010: 16-18.
[8] 刘峰, 马伯乐, 杨光, 等. 大功率变流器模块主电路杂电感分析 [J]. 机车电传动, 2013(6): 15-19.

LIU F, MA B L, YANG G, et al. Stray Inductance Analysis of Main Circuit for High-power Converter Module [J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(6): 15-19.
[9] 罗冰洋, 黄丽婷, 莫易敏, 等. 大功率 IGBT 散热器水冷热阻计算 [J]. 现代电子技术, 2013(36): 165-167, 170.
LUO B Y, HUANG L T, MO Y M, et al. Forced water cooled thermal-resistance calculation for high-power IGBT radiator [J]. Modern Electronics Technique, 2013(36): 165-167, 170.
[10] 杨传超. 大功率 LED 多芯片模块散热器设计与封装结构热阻分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
[11] 余军, 马雅青, 赵振龙, 等. 电动汽车用水冷散热器的设计及仿真 [J]. 大功率变流技术, 2015(3): 51-53, 63.
YU J, MA Y Q, ZHAO Z L, et al. Design and Simulation of Water-cooled Radiator Used in Electric Vehicle [J]. High Power Converter Technology, 2015(3): 51-53, 63.