[控制系统]

基于开关周期的IGBT模块功率损耗和结温计算

文/河北工业大学电气工程学院　王鹏冲
台湾勤益科技大学电子工程系　李玲玲

为计算逆变器IGBT模块功率损耗和结温，通过分析逆变器中IGBT模块的工作方式，建立了基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块电热耦合模型。该模型以IGBT开关周期为基本单位，结合IGBT功率损耗计算方法，通过分析每个开关周期内IGBT电流、占空比、调制度、功率因数角等功率损耗计算所需参数的计算方法，得到每个开关周期内的IGBT功率损耗。利用该模型对特定工作条件下的IGBT模块功率损耗和结温情况进行了仿真分析。从仿真结果可以看出，该模型能够考虑温度对功率损耗的影响，并且能够更真实地反映输出周期内IGBT模块的功率损耗和结温波动情况。

IGBT模块凭借其大电流、高开关频率的优势在逆变器中得到了广泛的应用。IGBT模块的结温计算对于逆变器的散热设计、可靠性等都具有重要价值。

Infineon等一些IGBT模块生产厂家提供了在线损耗和结温仿真工具（如IPOSIM），能够为IGBT模块的选型和散热系统设计提供一定的参考价值。然而，这些在线仿真工具通常只能计算IGBT模块输出周期的平均功率损耗，因此也无法考虑输出周期内IGBT模块的结温波动情况。然而逆变器输出周期内的结温波动情况具有重要的价值。

本文以永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）驱动系统为例，通过Matlab/Simulink搭建了基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块结温计算模型。该模型考虑了IGBT模块损耗与结温之间的相互耦合以及输出周期内的占空比、结温等的变化情况，更能真实地反映输出周期内IGBT功率损耗和结温的变化情况。

永磁同步电动机驱动系统

三相电压型逆变器供电的PMSM驱动系统主电路如图1所示。三相电压型逆变器和PMSM均具有三相对称结构，在控制PMSM稳定运行时，三相逆变器输出的三相电压、电流均为三相对称形态。可以认为在一个输出周期内，每个IGBT产生的功率损耗相同。同样，每个续流二极管产生的功率损耗也相同。本文以A相上桥臂的IGBT为例，对IGBT的功率损耗和结温进行分析。需要说明的是，当IGBT芯片与续流二极管芯片相距较远时，可以忽略二者之间温度的相互影响，因此在本文中只对IGBT芯片的功率损耗和温度进行分析，本文中IGBT模块结温指IGBT芯片温度。

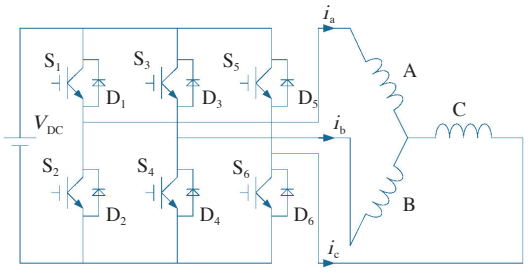

图1　PMSM驱动系统主电路

IGBT模块结温计算模型

IGBT模块的结温计算通常先利用IGBT功率损

耗计算模型求得功率损耗，再根据IGBT模块的热模型计算得到结温，并且功率损耗受结温的影响。

1．IGBT模块开关周期的功率损耗计算

在一个开关周期内，IGBT产生的损耗主要可以分为通态损耗和开关损耗两部分，其中开关损耗又包括开通损耗和关断损耗。

IGBT生产厂家一般在器件手册上提供少数几种状态下的开通损耗E_{on}和关断损耗E_{off}曲线。经验表明，将给定状态下的开通损耗和关断损耗按线性化折算，可以满足工程计算的需求。IGBT每个开关周期的时间都非常短暂，可以近似认为在一个开关周期内的导通电流为恒值，记为I_{CE}。单个开关周期内的IGBT开关损耗计算公式为

$$\begin{cases} P_{on}(V_{DC},I_{ce},T_j)=\dfrac{1}{T_{sw}}\left(E_{on125}+K_{on}(T_j-125)\dfrac{U_{DC}}{U_{nom}}\times\dfrac{I_{CE}}{I_{nom}}\right) \\ P_{off}(V_{DC},I_{ce},T_j)=\dfrac{1}{T_{sw}}\left(E_{off125}+K_{off}(T_j-125)\dfrac{U_{DC}}{U_{nom}}\times\dfrac{I_{CE}}{I_{nom}}\right) \end{cases} \tag{1}$$

$$K_{on}=\frac{T_{j1}-T_{j1}}{E_{on1}-E_{on2}} \tag{2}$$

$$K_{off}=\frac{T_{j1}-T_{j1}}{E_{off1}-E_{off2}} \tag{3}$$

其中，T_{sw}为开关周期；E_{on125}与E_{off125}分别为IGBT特定测试条件下（包括测试时直流母线电压U_{nom}，I_{nom}导通电流 等参数），结温为125℃时的开通能耗与关断能耗；K_{on}、K_{off}为温度修正系数，T_{j1}，T_{j2}为两种测试条件的温度，E_{on1}、E_{on2}、E_{off1}、E_{off2}为两种测试温度对应的开通或关断损耗。以上参数均可从IGBT器件手册直接或间接获取。U_{DC}为逆变器直流母线电压。

一个开关周期内的通态功率损耗计算公式为

$$P_{IGBT_con}(U_{CE},I_{CE},D)=U_{CE}\times I_{CE}\times D \tag{4}$$

其中，U_{CE}为IGBT的导通压降，D为该开关周期内IGBT的占空比。

对于固定的驱动电压，导通压降与导通电流、结温有关，可以根据IGBT的器件手册中的输出特性曲线获取。当采用输出特性的线性近似形式来表示U_{CE}与I_{CE}的关系时，有

$$U_{CE}=I_{CE}r_{co}+U_{CE0} \tag{5}$$

其中，R_{CE}为IGBT的等效导通电阻，U_{CE0}为初始导通压降，二者均与结温有关。特定结温下的导通电阻和初始导通压降可由下式计算得到。

$$U_{CE0}(T_j)=U_{CE0}(T_{nom})+K_{VCE0}(T_j-T_{nom}) \tag{6}$$

$$r_{CE0}(T_j)=r_{CO}(T_{nom})+K_{RCO}(T_j-T_{nom}) \tag{7}$$

$$K_{VCE0}=\frac{T_{j1}-T_{j2}}{U_{CE0_1}-U_{CE0_2}} \tag{8}$$

$$K_{RCO}=\frac{T_{j1}-T_{j2}}{R_{CO_1}-R_{CO_2}} \tag{9}$$

从式（1）～式（9）可以看出，只需知道每个开关周期内的导通电流I_{CE}、通态压降U_{CE}、占空比D以及结温T_j，即可计算得到该开关周期内的平均功率损耗。

2．开关周期内的逆变器运行参数获取

在SVPWM调制的PMSM驱动系统中，PMSM定子电流仅在正半周期内流过A相上管IGBT，其通态电流瞬时值I_{CE}与相电流幅值和转子角位置有关，可以表示为

$$I_{CE}=\begin{cases} I_\phi\cos(\theta_{dA}+\dfrac{\pi}{2}+\beta) & \cos(\theta_{dA}+\dfrac{\pi}{2}+\beta)>0 \\ 0 & \cos(\theta_{dA}+\dfrac{\pi}{2}+\beta)\leqslant 0 \end{cases} \tag{10}$$

其中，θ_{dA}为转子d轴与A轴夹角，在实际系统中可由PMSM位置传感器直接测得，本文仿真模型中设定转子初始角位置为与A轴重合，即$\theta_{dA0}=0$，采用转子角速度对时间的积分可以求得每个开关周期的θ_{dA}；β为电流相角，φ与电流控制方式有关；为功率因数角。

SVPWM调制方式下，A相上管占空比计算公式为

$$D(t)=\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}M}{4}\begin{cases} \cos\left(\theta_{uA}-\dfrac{\pi}{6}\right) & 0\leqslant\theta_{uA}\leqslant\dfrac{\pi}{3} \\ \sqrt{3}\cos\theta_{uA} & \dfrac{\pi}{3}\leqslant\theta_{uA}\leqslant\dfrac{2\pi}{3} \\ \cos\left(\theta_{uA}+\dfrac{\pi}{6}\right) & \dfrac{2\pi}{3}\leqslant\theta_{uA}\leqslant\pi \\ \cos\left(\theta_{uA}-\dfrac{\pi}{6}\right) & \pi\leqslant\theta_{uA}\leqslant\dfrac{4\pi}{3} \\ \sqrt{3}\cos\theta_{uA} & \dfrac{4\pi}{3}\leqslant\theta_{uA}\leqslant\dfrac{5\pi}{3} \\ \cos\left(\theta_{uA}-\dfrac{\pi}{6}\right) & \dfrac{5\pi}{3}\leqslant\theta_{uA}\leqslant 2\pi \end{cases} \tag{11}$$

$$\theta_{uA}=\theta_{dA}+\frac{\pi}{2}+\beta+\varphi \tag{12}$$

其中，θ_{uA}为定子电压矢量与A轴夹角；M为SVPWM调制度，与定子电流矢量、PMSM参数和直流母线电压有关。

3．IGBT模块热网络

基于集总参数法的Foster热网络是对IGBT模块实际传热过程的集中等效，并且容易用电路网络的形式在仿真软件中实现，是工程上常用的IGBT模块结温计算方法。本文采用Foster网络构建IGBT模块的等效传热模型，如图2所示。其中，$R_{th,JC}$、$C_{th,JC}$分别为IGBT结到壳之间的等效热阻、热容，$R_{th,CH}$、$C_{th,CH}$分别为壳到散热器的等效热阻、热容；$R_{th,HC}$、$C_{th,HC}$分别为散热器到冷却液的等效热阻、热容；电压源T_{co}代表冷却液温度。

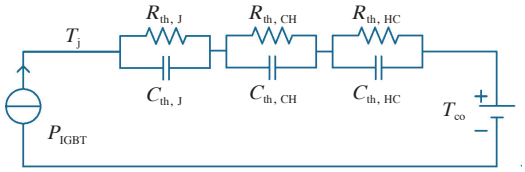

图2　Foster热网络模型

仿真分析

基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块结温计算流程如图3所示。其中，逆变器运行参数可以根据PMSM所需转矩、转速，PMSM数学模型，SVPWM工作原理以及驱动系统电流控制方式计算得到，本文不再赘述。IGBT损耗模型及IGBT模块及散热器RC热网络参数可从器件手册和散热器设计获取。Matlab/Simulink作为一种仿真软件，具有强大的数值计算能力和丰富的电气元器件模型，为实现电热联合仿真提供了方便。

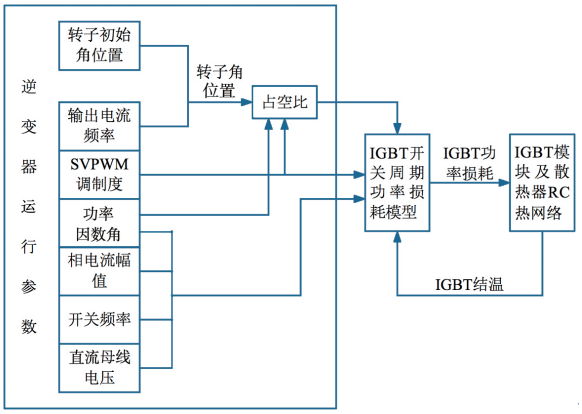

图3　基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块结温计算流程

本文应用Simulink建立了基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块结温计算仿真模型，并与采用基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块功率损耗和结温计算方法进行了对比。当逆变器功率因数角为−30°～30°时，一个输出周期内IGBT平均功率损耗的计算公式为

$$P_{IGBT_avg}=\frac{f_{sw}}{\pi}(E_{on125}+E_{off125})\frac{U_{DC}}{U_{nom}}\times\frac{I_\phi}{U_{nom}}+\frac{1}{2\pi}U_{CE0}I_\phi+\frac{1}{8}R_{CE}I_\phi^2+\frac{1}{8}MU_{CE0}I_\phi\cos\varphi+\left(\frac{24\cos\varphi-3\sqrt{3}-2\sqrt{3}\cos(2\varphi)}{48\pi}\right)MR_{CE}I_\phi^2 \quad (13)$$

由于在该公式推导过程中需要进行积分计算，并且一个输出周期内的结温波动较大，因此没有考虑结温对损耗的影响。

以Infineon公司的FS200R07PE4型IGBT模块为例，分析了该IGBT模块在表1所示逆变器工作条件下的功率损耗和结温情况。其中，电流控制方式采用$i_d=0$控制，此时有 。IGBT模块损耗模型和RC热网络仿真参数从器件手册获取，散热器RC热网络参数采用IPOSIM在线仿真系统提供的典型水冷散热方式，各参数如表2所示。

表1　仿真参数

调制度	功率因数角/（°）	开关频率/Hz	输出频率/Hz	直流母线电压/V	相电流幅值/A
0.9	20	10 000	50	350	150

表2　损耗模型及RC热网络仿真参数

开通损耗（125℃）	3.55×10^{-3}（J）	关断损耗（125℃）	1.05×10^{-2}（J）
通态压降（125℃）	0.7168 V	导通电阻（125℃）	0.0048 Ω
测试直流母线电压	300 V	测试导通电流	200 A
开通损耗温度系数	1.1×10^{-5}	关断损耗温度系数	2.65×10^{-5}
通态压降温度系数	1.2×10^{-3}	导通电阻温度系数	1.4×10^{-5}
结到壳热阻	0.25 K/W	结到壳热容	0.4326（J/K）
壳到散热器热阻	0.084 K/W	壳到散热器热容	0.200（J/K）
散热器到冷却液热阻	0.216 K/W	散热器到冷却液热容	64.815（J/K）
冷却液温度		60 ℃	

从上述分析可以看出，IGBT模块功率损耗与结温有关，而IGBT模块传热过程具有相对较长的时间常数，因此在逆变器相同的工作条件下，IGBT模块结温达到稳态的过程中，每个输出周期的功率损耗会随结温改变而变化。IGBT功率损耗和结温仿真结果分别如图4、图5所示。可以看出，在起始阶段随着结温的升高各个开关周期的IGBT功率损耗逐渐增大。该功率损耗随结温变化的过程是基于输出周期平均功率损耗的结温计算模型没有考虑的。

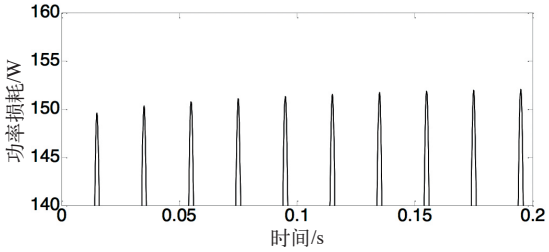

图4　起始阶段IGBT模块功率损耗幅值

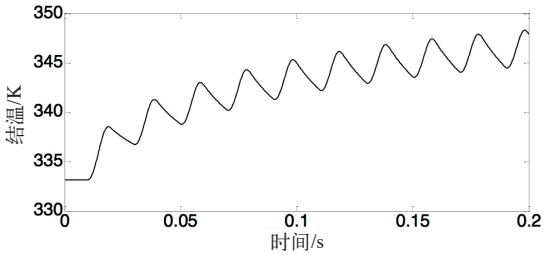

图5　起始阶段IGBT模块结温

在该仿真实例中，仿真运行100 s后，可以认为结温和功率损耗已经达到稳定。稳定后，本文模型和输出周期平均功率损耗（采用半波正弦插值）的模型相比得到的功率损耗波形如图6所示。

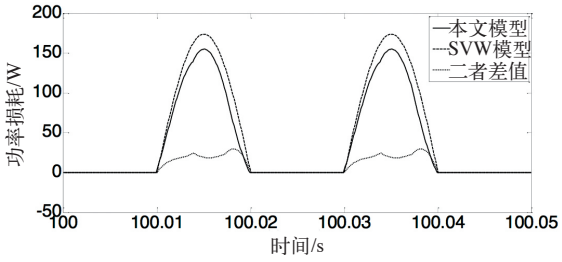

图6　稳定后功率损耗波形

从图6可以看出，两种模型的功率损耗计算结果存在一定误差，且该模型得到的IGBT功率损耗在一个输出周期内不为半波正弦形，造成该现象的原因主要有两方面：

1）在一个输出周期内，虽然导通电流按正弦规律变化，但通态压降、占空比也时时变化，造成了通态损耗在一个输出周期内并不按正弦规律变化。当通态损耗在总损耗中的比例增加时，总损耗非正弦的特点将更加突出。

2）一个输出周期内的结温波动情况，也造成了开关损耗、通态损耗与导通电流之间的非线性关系。

稳定后，本文模型得到的结温波形如图7所示。

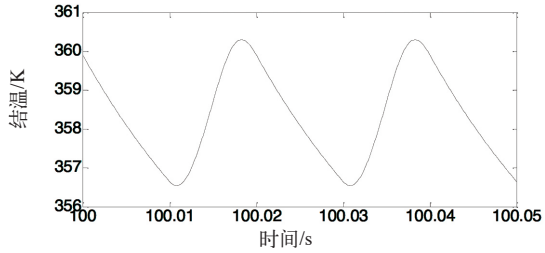

图7　稳定后IGBT模块结温波形

结束语

本文通过分析PMSM驱动系统中SVPWM调制方式下逆变器IGBT模块的功率损耗和结温计算方法，建立了基于开关周期平均功率损耗的IGBT模块电热耦合模型。通过上述分析可知，与基于输出周期平均功率损耗的方法相比，该模型考虑了温度对功率损耗的影响，并且能够更准确的反应输出周期内的功率损耗和结温波动情况。**EA**

（收稿日期：2016.09.11）

（编辑：杨得润）

斯凯孚（SKF）投资中国工厂滚子生产线

2016年1月17日，斯凯孚投资7 000万瑞典克朗，用于发展中国大连工厂的滚子生产能力。该项投资将提升斯凯孚全球生产能力，同时增强斯凯孚在中国的服务能力。

斯凯孚工业销售亚洲区总裁唐裕荣（Patrick Tong）表示：“发展斯凯孚在中国的滚子制造能力是我们采取的具有重大战略意义的举措，这将使我们能够通过缩短交货时间和加快客户响应速度，从而更好地利用现有的制造能力，加强我们在中国市场的竞争力。”

斯凯孚对中国大连工厂的投资现已全面启动，在2017年滚子产量将大幅提升。