

T 型三电平逆变器驱动永磁同步电机容错控制

林 海, 宋春然, 程思怡, 李演明

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘 要: 在 T 型三电平逆变器的永磁同步电机矢量控制系统中, 开关管常出现开路或短路故障, 此类故障会使原有调制策略失效, 引起三相电流畸变, 导致转速和转矩波动, 严重影响系统稳定性。为解决这些问题, 提出了一种容错 T 型三电平逆变器拓扑及相应的容错五段式空间矢量脉冲宽度调制 (SVPWM) 策略。新拓扑能够将潜在的短路故障统一转化为开路故障, 从而减少短路故障对系统的损害。根据故障相数对故障进行分类, 当故障类型满足容错调制策略的可行性要求时, 系统从原调制策略自动切换到容错五段式 SVPWM 策略, 确保系统在故障状态下正常运行。仿真和实验结果验证了本文所提逆变器拓扑和容错调制策略在实际应用中的有效性和可靠性。

关键词: T 型三电平逆变器; 空间矢量脉冲宽度调制; 永磁同步电机; 容错控制

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)02-0345-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240849

Fault-tolerant control for driving permanent magnet synchronous motor using T-type three-level inverter

LIN Hai, SONG Chun-ran, CHENG Si-yi, LI Yan-ming

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In the vector control system of a T-type three-level inverter for permanent magnet synchronous motors, switch failures such as open circuits or short circuits are common occurrences. These failures can disrupt the original modulation strategy, leading to distortion in the three-phase currents, which in turn causes fluctuations in speed and torque, severely impacting system stability. To mitigate these issues, this study proposes a fault-tolerant topology for the T-type three-level inverter and a corresponding fault-tolerant five-segment space vector pulse width modulation (SVPWM) strategy. The new topology can uniformly convert potential short-circuit faults into open-circuit faults, thereby reducing the damage caused by short-circuit faults to the system. Faults are categorized based on the number of affected phases, and when the fault type meets the feasibility requirements of the fault-tolerant modulation strategy, the system automatically switches to the fault-tolerant five-segment SVPWM strategy to ensure normal operation during fault conditions. Simulation and experimental results validate the effectiveness and reliability of the proposed topology and modulation strategy in practical applications.

收稿日期: 2024-07-28.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JM-298).

作者简介: 林海 (1978-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 电磁与机电系统设计与控制技术, 基于多电平逆变器的电机驱动技术, 电机系统设计与控制技术. E-mail: linhai@chd.edu.cn

Key words: T-type three-level inverter; space vector pulse width modulation; permanent magnet synchronous motor; fault-tolerant control

0 引言

T型三电平逆变器在中高压大功率逆变器领域得到广泛应用,相较传统的两电平逆变器,其具备输出电压谐波含量低、电压变化率小、电磁干扰少等优点。与二极管中点钳位型三电平拓扑相比,T型逆变器不但器件更少、损耗更小、输出电压谐波更小、效率更高,而且在中高压大功率逆变器领域展现了极大的发展潜力^[1-5]。

文献[6,7]提出,在电机驱动系统中,逆变器往往运行在恶劣环境下,且功率器件开关频率较高,其寿命损耗较快,过热现象尤为严重,导致功率器件易发生短路及开路故障。文献[8]指出,短路故障可能导致系统电流过大,从而对整个系统造成不可逆的损坏,因此迫切需要在极短时间内进行故障检测、分析和排除。文献[9]提出一种容错拓扑结构,通过增加冗余桥臂和半桥开关作为某相桥臂故障后的备用替代。文献[10]通过在功率开关器件旁串联快速熔断器,降低短路故障对系统造成的损害,同时对逆变器进行拓扑重构,使其具备容错工作能力。文献[11]引入一个带有电阻开关电路的冗余单元,增加了多相容错功能,提高了变换器的可靠性。文献[12]根据开路故障时的特征提出了一种故障诊断策略,能够精准定位故障开关管的位置。文献[13]提出了一种通过空间矢量脉宽调制(Space vector pulse width modulation, SVPWM)和逆变器输出电流进行故障诊断的方法。文献[14]将优选后的基本矢量构成虚拟矢量,从而制订出新型调制策略。文献[15]介绍了传统七段式SVPWM在多电平逆变器中的应用。文献[16]针对多电平逆变器中实现SVPWM存在许多困难,提出了两个开关序列的两种新的脉冲模式。

为实现仅通过修改控制策略而无须改变拓扑结构,使T型三电平逆变器在开路或短路故障后进入容错运行状态,本文提出了一种新的容错T型三电平逆变器拓扑结构及相应的五段式SVPWM容错调制策略。实验结果表明,这种拓扑和调制策略能够有效地将故障状态的逆变器稳定地转入容错运行状态,直至故障被排除。

1 T型逆变器故障类型分析

1.1 容错T型三电平逆变器拓扑

容错T型三电平逆变器拓扑结构如图1所示,该拓扑每相由4个带有反并联二极管的功率开关管、3个熔断器、3个继电器常闭触点构成。其中, S_{x1} 、 S_{x4} 为外管, S_{x2} 、 S_{x3} 为内管($x=A, B, C$)。当 S_{x1} 和 S_{x2} 导通时,逆变器输出电压为 $U_{dc}/2$,定义为P状态;当 S_{x2} 和 S_{x3} 导通时,逆变器输出电压为0,定义为O状态;当 S_{x3} 和 S_{x4} 导通时,逆变器输出电压为 $-U_{dc}/2$,定义为N状态。

当某相关管发生短路故障时,控制单元根据电流采样信息判断开关管的故障位置,控制故障位置的继电器的常闭触点打开,从而将短路故障转化为开路故障。为防止继电器的常闭触点未能及时断开,导致系统受到更严重的损害,熔断器在发生短路故障时也能及时断开,从而将短路故障统一转化为开路故障。

由于该拓扑能够将短路故障统一转化为开路故障,因此将开关管开路故障类型分为3种,分别为单相、两相、三相开关管单管或多管开路故障。根据开关管的故障情况画出电压空间矢量分布图及矢量的有效作用区域,并总结出各种故障类型下容错调制策略的可行性。

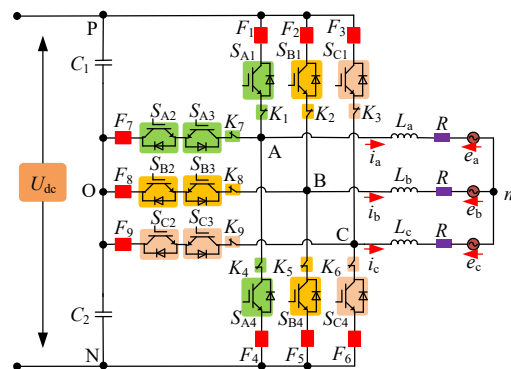


图1 容错T型三电平逆变器

Fig. 1 Fault-tolerant T-type three-level inverter

1.2 单相故障类型分析

单相故障以C相为例,当开关管 S_{C1} 发生故障,C相失去输出P电平状态的能力,O、N状态依然能正常输出;而A、B相均能正常输出P、O、N三种电平状态。此时,电压空间矢量分布及矢量

有效作用区域如图2(a)所示,即当 S_{C1} 发生故障后,大矢量NPP、NNP、PNP,中矢量NOP、ONP,小矢量OPP、OOP、POP,以及零矢量PPP都已损失。其中,已经损失的零矢量和矢量都用其冗余矢量代替,开关管 S_{C4} 故障与 S_{C1} 故障类似。当开关管 S_{C2} 或 S_{C3} 发生故障时,如图2(b)所示,C相失去了输出O电平状态的能力,P、N电平状态能够正常输出;而A、B相均能正常输出P、O、N3种电平状态。根据电压空间矢量分布图可知,中矢量NPO、PNO,小矢量OPO、PPO、POO、ONO、NNO、NOO,以及零矢量OOO都已损失,电压空间矢量的有效作用区域是整个大六边形。

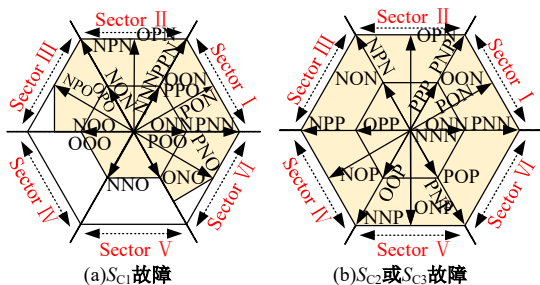


图2 单相典型故障

Fig. 2 Single-phase typical fault

1.3 两相故障类型分析

两相故障以B、C相为例,当开关管 S_{B1} 与 S_{C1} 发生故障,B、C两相失去输出P电平状态的能力。当开关管 S_{B4} 与 S_{C4} 故障,B、C两相失去输出N电平状态的能力,将已经损失的零矢量和矢量都用各自的冗余矢量代替,两种故障类型电压空间矢量的分布及矢量有效作用区域如图3(a)(b)所示。

当开关管 S_{B1} 与 S_{C2} 、 S_{C3} 发生故障时,B相失去输出P电平状态的能力,C相失去输出O电平状态的能力,将已经损失的零矢量和矢量都用各自的冗余矢量代替,当前电压空间矢量的分布及矢量有效作用区域与开关管 S_{B1} 与 S_{C1} 发生故障时

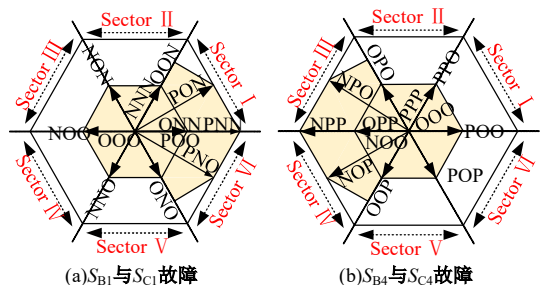


图3 两相典型故障

Fig. 3 Two-phase typical fault

类似。同时,与上述两种故障类似的情形还包含开关管 S_{C1} 与 S_{B2} 、 S_{B3} 发生故障,开关管 S_{C4} 与 S_{B2} 、 S_{B3} 发生故障,开关管 S_{B4} 与 S_{C2} 、 S_{C3} 发生故障。

当开关管 S_{B1} 与 S_{C4} 发生故障,此时B相失去输出P电平状态的能力,C相失去输出N电平状态的能力。由于部分损失的小矢量已经不能用冗余矢量代替,电压空间矢量已经不能包围一个完整的圆周,因此这种故障情况已经不能仅通过改变调制策略保证系统继续以容错状态运行。

1.4 三相故障类型分析

当开关管 S_{A1} 、 S_{B4} 与 S_{C4} 发生故障时,A、B、C相分别失去了输出P、N、N电平状态的能力。如图4(a)所示,逆变器已经不能输出圆形旋转电压,在当前矢量的损失情况下逆变器已经不能满足容错运行的最低要求。类似的故障情况还有开关管 S_{A4} 、 S_{B2} 与 S_{C2} 发生故障,如图4(b)所示,A、B、C相分别失去了输出N、O、O电平状态的能力。

当开关管 S_{A4} 、 S_{B4} 与 S_{C4} 发生故障,如图4(c)所示三相同步都失去输出N电平状态的能力,系统容错运行只能以母线电压的一半而降额运行。

当开关管 S_{A2} 、 S_{B2} 与 S_{C2} 发生故障时,如图4(d)所示,A、B、C相都损失了O电平状态。由于所有中小矢量全部损失,因此只剩下大矢量和零矢量。此种故障情况使T型三电平逆变器拓扑直接退化成三相两电平逆变器拓扑。虽然这种故障情况下系统能够通过容错调制策略继续运行,但是当前拓扑已经不能满足T型逆变器不允许PN

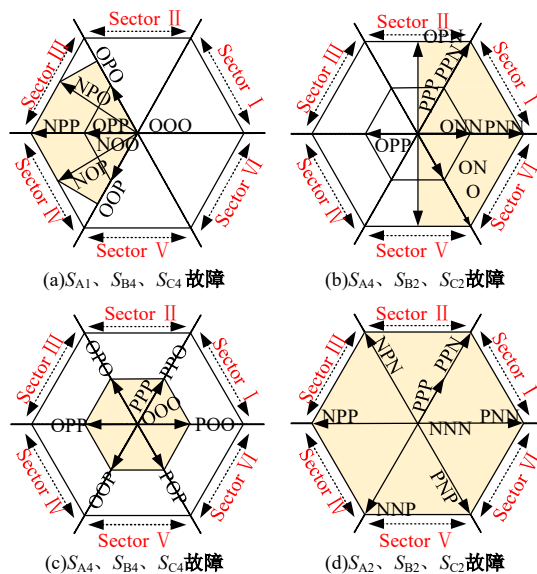


图4 三相典型故障

Fig. 4 Three-phase typical fault

电平状态直接跳变的原则,使开关管需要直接承受母线电压,也增加了开关管的损耗率与故障率。

T 型三电平逆变器的单相、两相及三相的开关管单管或多管发生开路故障后,对电压空间矢量的影响各不相同,若电压空间矢量的有效作用区域能够以有效零矢量为圆心而内切出一个完整的圆周,则该故障情况即可应用容错调制策略。各种故障类型条件下容错调制策略的可行性如表 1 所示。

表 1 调制策略可行性
Table 1 Feasibility of modulation

故障类型	故障开关管	容错调制策略可行性
单相	$S_{C1}、S_{C4}$	✓
	$S_{C2}、S_{C3}$	✓
	$S_{C1}、S_{C2}$	×
两相	$S_{B1}、S_{C1}$	✓
	$S_{B1}、S_{C4}$	×
	$S_{B2}、S_{C2}$	✓
	$S_{B1}、S_{C2}、S_{C3}$	✓
三相	$S_{A1}、S_{B1}、S_{C1}$	✓
	$S_{A4}、S_{B1}、S_{C1}$	×
	$S_{A1}、S_{B2}、S_{C2}$	×
	$S_{A2}、S_{B2}、S_{C2}$	✓

2 容错五段式 SVPWM 调制

根据表 1 可以确定具体故障类型能否使用容错调制策略。无论是单相、两相或者三相故障,若容错调制策略可行,则对容错调制策略的制订规则都是一致的。

单相故障以 $S_{C2}、S_{C3}$ 开路或者短路故障为例,若其为短路故障,如图 1 所示,继电器常闭触点 K_9 断开连接,此时电压空间矢量的有效作用区域能够以有效零矢量为圆心而内切出一个最大的圆。因此,基于容错 T 型三电平逆变器拓扑结构采用容错五段式 SVPWM 调制策略可以实现满额容错运行。

由于小矢量和中矢量的损失,为保证电机转矩脉动小,需要将 I、II、IV、V 大扇区重新分成两个小扇区,而 III、VI 大扇区不再划分小扇区。新扇区划分如图 5 所示。

重新划分小扇区后采用五段式矢量合成的方式,将矢量顺序归纳为表 2。

矢量顺序固定后,将大扇区 II、IV、V 都归一化到第 I 大扇区。计算 I 扇区的 1、2 小扇区及 III

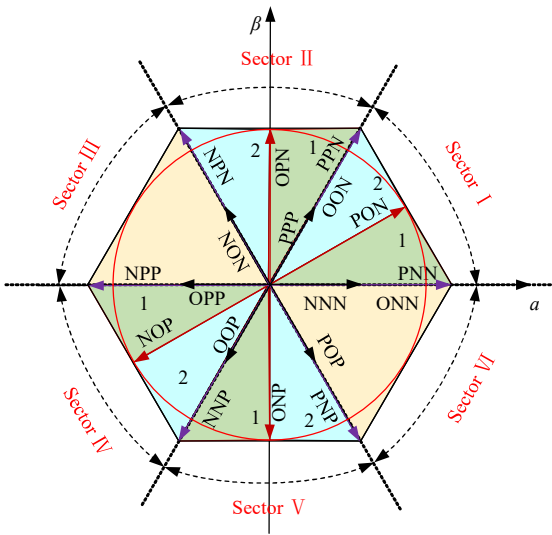


图 5 新扇区划分

Fig. 5 Sector division

表 2 矢量顺序表

Table 2 Vector order table

扇区号	矢量顺序
	作用时间 $T_1/2-T_2/2-T_3/2-T_2/2-T_1/2$
I (1)	NNN-PNN-PON-PNN>NNN
I (2)	NNN-PON-PPN-PON>NNN
II (1)	NNN-OPN-PPN-OPN>NNN
II (2)	NNN-NPN-OPN-NPN>NNN
III	NNN-NPN-NPP-NPN>NNN
IV (1)	NNN-NOP-NPP-NOP>NNN
IV (2)	NNN-NNP-NOP-NNP>NNN
V (1)	NNN-NNP-ONP-NNP>NNN
V (2)	NNN-ONP-PNP-ONP>NNN
VI	NNN-PNN-PNP-PNN>NNN

扇区的基本矢量作用时间,将各扇区的基本矢量作用时间归纳为表 3。

计算 I (1) 扇区矢量时间得到:

表 3 矢量作用时间表
Table 3 Vector action time

扇区号	矢量作用时间
I (1)	$T_{11}/2-T_{12}/2-T_{13}-T_{12}/2-T_{11}/2$
I (2)	$T_{21}/2-T_{22}/2-T_{23}-T_{22}/2-T_{21}/2$
II (1)	$T_{11}/2-T_{13}/2-T_{12}-T_{13}/2-T_{11}/2$
II (2)	$T_{21}/2-T_{23}/2-T_{22}-T_{23}/2-T_{21}/2$
III	$T_{31}/2-T_{32}/2-T_{33}-T_{32}/2-T_{31}/2$
IV (1)	$T_{11}/2-T_{13}/2-T_{12}-T_{13}/2-T_{11}/2$
IV (2)	$T_{21}/2-T_{23}/2-T_{22}-T_{23}/2-T_{21}/2$
V (1)	$T_{11}/2-T_{12}/2-T_{13}-T_{12}/2-T_{11}/2$
V (2)	$T_{21}/2-T_{22}/2-T_{23}-T_{22}/2-T_{21}/2$
VI	$T_{31}/2-T_{33}/2-T_{32}-T_{33}/2-T_{31}/2$

$$\begin{cases} T_{11} = T_s - 2mT_s \sin \theta - \\ \quad \sqrt{3} mT_s \sin(\pi/6 - \theta) \\ T_{12} = \sqrt{3} mT_s \sin(\pi/6 - \theta) \\ T_{13} = 2mT_s \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

计算 I (2) 扇区矢量时间得到:

$$\begin{cases} T_{21} = T_s - 2mT_s \sin(\pi/3 - \theta) - \\ \quad \sqrt{3} mT_s \sin(\pi/6 - \theta) \\ T_{22} = 2mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_{23} = -\sqrt{3} mT_s \sin(\pi/6 - \theta) \end{cases} \quad (2)$$

计算 III 扇区矢量时间得到:

$$\begin{cases} T_{31} = T_s - 2mT_s \sin \theta - \\ \quad mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_{32} = mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_{33} = mT_s \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$m = \sqrt{3} U_{\text{ref}} / U_{\text{dc}} \quad (4)$$

式中: m 为调制比; U_{ref} 为参考电压; U_{dc} 为直流母线电压。

扇区 I 的 1,2 号小扇区矢量顺序分别为 NNN-PNN-PON-PNN-NNNNNN-PON-PPN-PON-NNN, 开关时序如图 6 所示。采用双调制波单载

波方法生成脉冲序列, T 型三电平逆变器每相包含 4 个开关管, 其中 S_{x1} 、 S_{x3} 管互补, S_{x2} 、 S_{x4} 管互补。当前, 由于 C 相失去了输出 O 电平状态的能力, 在单相容错调制策略在控制 C 相开关管时, 可将 S_{C1} 、 S_{C2} 看作一个开关管 S_1 , 将 S_{C3} 、 S_{C4} 看作开关管 S_2 , 并且 S_{C1} 、 S_{C2} 控制信号相同, S_{C3} 、 S_{C4} 控制信号相同, 而 S_1 、 S_2 的控制信号互补。

从图 6 中可以看出, I 大扇区有 N 到 P 的电平状态跳变, 当调制波和载波进行比较时, 需要将 N 到 P 电平跳变的 S_{x1} 、 S_{x2} 管的开关时序进行分解, 同时得到如图 7 所示的调制波高度。图 7 中载波选择用中间对齐向上计数的方式, 高度取为 $T_s/2$, 当载波大于调制波时, 高电平有效。

将各大小扇区下调制波高度归纳为表 4, 其中:

$$\begin{cases} T_A = T_1/2 \\ T_B = T_1/2 + T_2/2 \end{cases} \quad (5)$$

由于载波采用中心对称的计数形式, 调制波高度为 $T_s/2$, 图 7 中构成等腰直角三角形, 调制波高度即开关管状态切换时的时间点, 因此调制波赋给的高度和开关管的切换点时间是互相等价的。

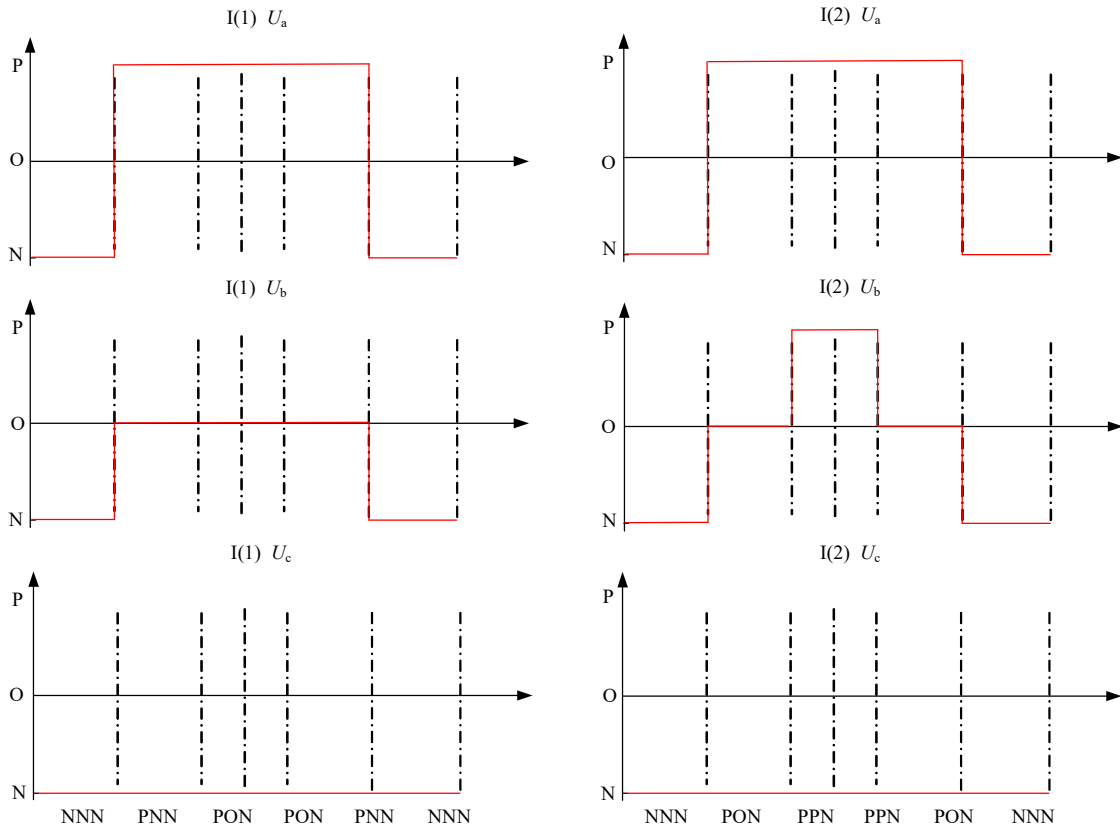


图6 开关时序图

Fig. 6 Switch timing diagram

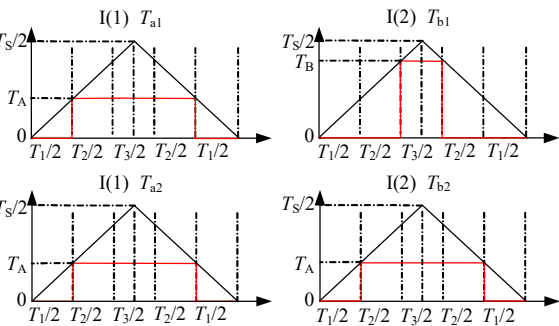


图 7 开关时序分解

Fig. 7 Switching timing decomposition

表 4 调制波高度表

Table 4 Modulated wave height		
大扇区	小扇区	调制波高度: $T_{a1}, T_{a2}, T_{b1}, T_{b2}, T_{c1}, T_{c2}$
I	1	$T_A, T_A, T_S/2, T_B, T_S/2, T_S/2$
	2	$T_A, T_A, T_B, T_A, T_S/2, T_S/2$
II	1	$T_B, T_A, T_A, T_A, T_S/2, T_S/2$
	2	$T_S/2, T_B, T_A, T_A, T_S/2, T_S/2$
III	—	$T_S/2, T_S/2, T_A, T_A, T_B, T_B$
IV	1	$T_S/2, T_S/2, T_B, T_A, T_A, T_A$
	2	$T_S/2, T_S/2, T_S/2, T_B, T_A, T_A$
V	1	$T_S/2, T_B, T_S/2, T_S/2, T_A, T_A$
	2	$T_B, T_A, T_S/2, T_S/2, T_A, T_A$
VI	—	$T_A, T_A, T_S/2, T_S/2, T_B, T_B$

对两相或者三相故障,先根据表 1 判断容错调制策略的可行性。若容错调制策略可行,则仿

照单相故障容错调制策略制订符合当前故障类型的容错调制策略。由于电压空间矢量的损失,所制订的容错调制策略会导致 P、N 电平状态之间发生跳变,有可能使开关管的端电压从 $U_{dc}/2$ 跳变为 U_{dc} ,因此增加了开关管的损耗和故障概率。同时,部分故障类型损失了大中矢量后,在 SVPWM 模式下,容错 T 型三电平逆变器能够输出的最大不失真圆形旋转电压为小六边形的内切圆,此时逆变器是降额工作状态,因此驱动能力会明显下降,需要适当下调负载转矩。

3 仿真与实验验证

T 型三电平逆变器永磁同步电机容错控制系统采用 $i_d=0$ 的矢量控制方式,其系统的控制框图如图 8 所示。

首先,根据电流采样的三相电流 i_{abc} 判断当前逆变器开关管是否发生故障。若未发生故障,则继续使用传统的 SVPWM 调制策略;若判断开关管发生故障,则需要进一步判断故障类型和位置。若为开路故障,则继电器不动作;若为短路故障,相应位置的继电器动作,切除短路开关管避免情况恶化。其次,根据故障类型评估容错调制策略的可行性,若容错调制策略可行,则将原有调制策略切换为当前故障类型的容错 SVPWM 调制策略,确保系统在容错状态下继续运行。

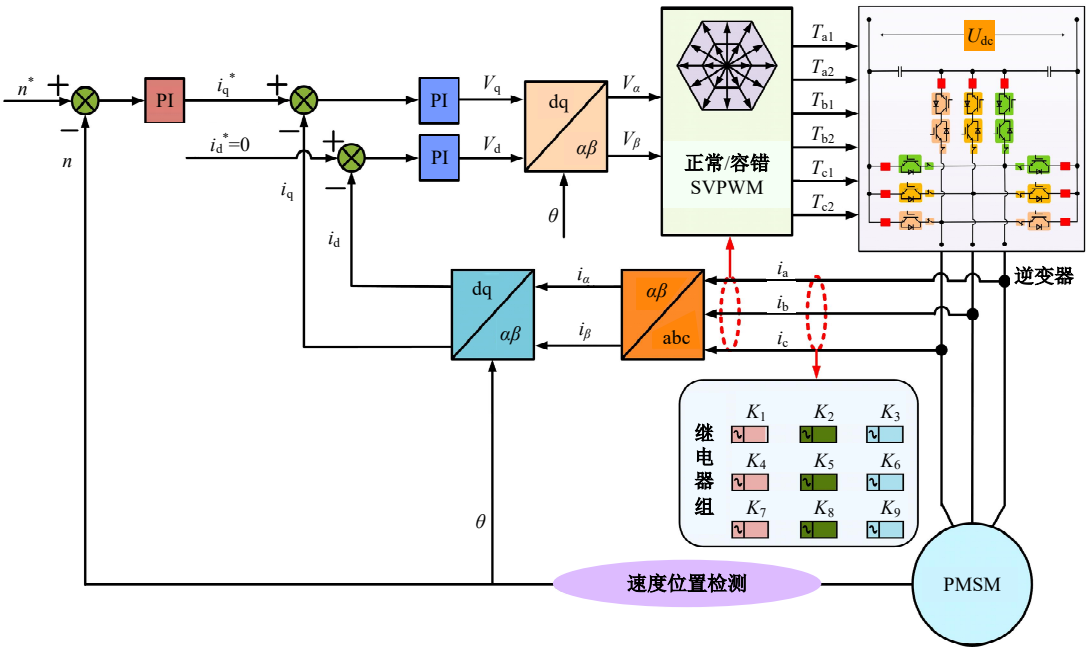


图 8 基于 T 型三电平逆变器永磁同步电机容错控制系统框图

Fig. 8 Block diagram of fault-tolerant control system for PMSM based on T-type three-level inverter

在 Matlab 环境下搭建仿真模型,对容错 T 型逆变器拓扑及容错调制策略的正确性进行验证。仿真模型参数如表 5 所示。

若 C 相 0.2 s 时开关管 S_{C2} 、 S_{C3} 故障,故障持续 0.1 s,切换为单相容错调制策略。仿真结果如图 9 所示。

表 5 仿真模型参数

Table 5 Simulation model parameters

参数	取值
定子电阻 R_s/Ω	0.958
直轴电感 L_d/mH	5.25
交轴电感 L_q/mH	12
固定磁链 Ψ/Wb	0.187 2
直流侧电压 U_{dc}/V	1 000
给定转速 $V_{\text{ref}}/\text{rpm}$	1 000
负载转矩 $T_L/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	10

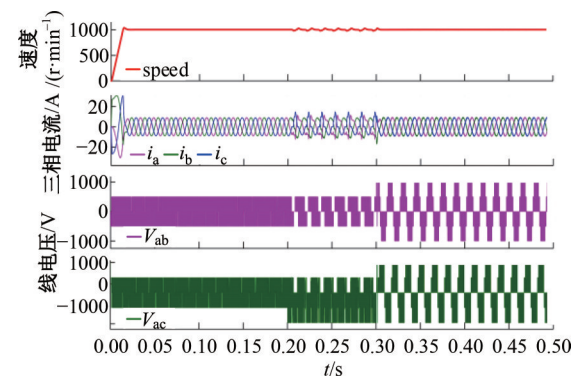


图 9 C 相故障特性

Fig. 9 Fault characteristics of phase C

开关管出现故障后三相电流、速度、线电压均出现畸变,当单相容错调制策略生效后三相电流、速度均恢复至稳定状态,3 种线电压由原来的三电平状态变化为五电平状态,图 9 中省略了线电压 V_{bc} 。

若 B、C 两相 0.2 s 时开关管 S_{B2} 、 S_{B3} 、 S_{C2} 、 S_{C3} 出现故障,故障持续 0.1 s,切换为两相容错调制策略,仿真结果如图 10 所示。三相电流与速度的变化趋势均与图 9 相似,3 种线电压由畸变状态也恢复至稳定状态,线电压 V_{bc} 呈现三电平结构,其余两种线电压均是五电平结构,图 10 中省略了线电压 V_{ac} 。

若 A、B、C 三相 0.2 s 时开关管 S_{A2} 、 S_{A3} 、 S_{B2} 、 S_{B3} 、 S_{C2} 、 S_{C3} 出现故障,故障持续 0.1 s,切换为三相容错调制策略,仿真结果如图 11 所示。切换为三相容错调制策略后,三相电流、速度与线电压均快

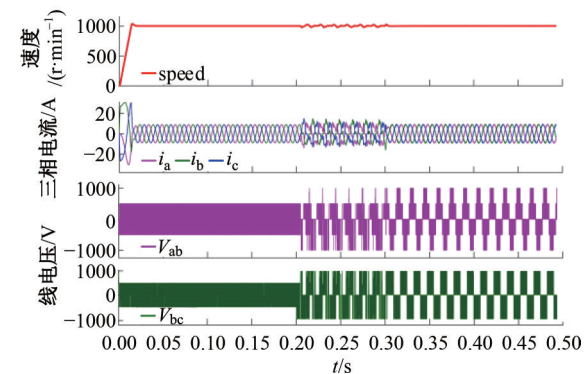


图 10 B、C 相故障特性

Fig. 10 Fault characteristics of phase B, C

速恢复至稳定状态。由于 A、B、C 相都失去了输出中点 O 电平状态的能力,实际上每相都退化为两电平的输出能力,但依然采用三电平调制和发波策略,只是 S_{x1} 、 S_{x2} 的驱动信号相同, S_{x3} 、 S_{x4} 的驱动信号相同,即把开关管 S_{x1} 、 S_{x2} 当作一个开关管,开关管 S_{x3} 、 S_{x4} 当作一个开关管,把两电平的思想应用于三电平的容错工作状态。因此,此时 3 种线电压均呈现三电平结构,图 11 中省略了线电压 V_{bc} 。

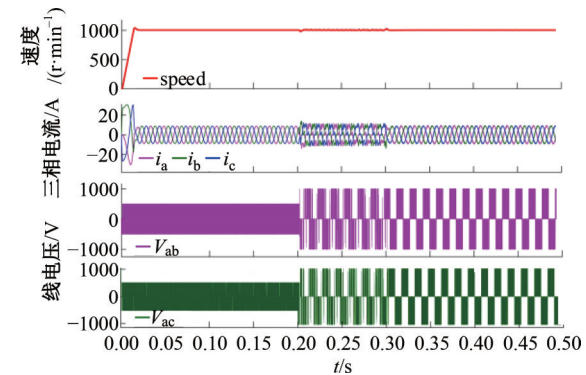


图 11 三相故障特性

Fig. 11 Fault characteristics of three phases

使用如表 6 所示的实验平台参数验证容错 T 型逆变器拓扑及容错调制策略的正确性。

系统的中断频率为 10 kHz,即每 0.1 ms 更新一次状态。中断程序中包含电流、电压检测和故障判断功能,因此系统能够在 0.1 ms 内判断是否存在故障,并明确其类型。所选电机的额定电流为 2.8 A,最大工作电流为额定电流的 1.2 倍,即 3.36 A,在最大工作电流下电机可以持续工作而不会损坏。

在负载转矩固定为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 且系统闭环稳定运行时,三相电流维持在约 0.75 A。把故障判断阈值设定为 3 A,当检测到电流超过此阈值时,系

表 6 实验平台参数	
Table 6 Experimental platform parameters	
参数	取值
定子电阻 R_s/Ω	1.15
直轴电感 L_d/mH	2.1
交轴电感 L_q/mH	2.1
固定磁链 Ψ/Wb	0.020 669
额定电压 U/V	48
额定电流 I/A	2.8
额定转速 $V/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
直流侧电压 U_{dc}/V	48
分压电容 $C_1、C_2/\mu\text{F}$	330
开关频率 f/kHz	10
给定转速 $V_{\text{ref}}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 000
负载转矩 $T_L/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.5
继电器动作时间 T_J/ms	<10
熔断器动作时间 T_F/ms	15~20
中断更新时间 T_I/ms	0.1

统会自动判断故障位置并控制继电器的常闭触点动作。根据继电器的特性参数,动作时间小于 10 ms。选择的熔断器额定电流为 3.15 A,根据其时间电流特性曲线,熔断器的动作时间为 15~20 ms。在毫秒级的动作时间范围内,保护元件的机械结构反应延迟不会导致系统进一步损伤,并且能够及时将故障部分与整个系统隔离。

因此,当系统检测到电流异常时,会首先控制相应位置的继电器触点动作,然后将故障点与系统隔离。如果继电器未能动作,则熔断器会随后动作。这样,在确保系统保护单元依次动作的同时,保护元件也不会出现失效或误动作的情况。

实验平台如图 12 所示,其中包含永磁同步电机、扭矩速度传感器、磁粉制动器、示波器、张力控制器、直流稳压电源各 1 台,主控芯片为 STM32F407 的控制板、IRF2101 预驱动芯片,NCE6080K 场效应管作为开关管组成的 T 型三电平逆变器,搭配继电器常闭触点作为驱动板,熔断器、继电器组成的容错板各 1 套。

当 C 相开关管 S_{C2} 、 S_{C3} 出现故障,该故障类型符合单相容错调制策略,在给定转速和负载转矩不变的情况下,测得各个阶段的速度、三相电流、线电压及输出转矩特性如图 13 所示。

在闭环稳态工作时,速度和输出转矩都能跟随给定速度和负载转矩,三相电流正弦特性明显,线电压是三电平结构。出现故障后,速度、三相电

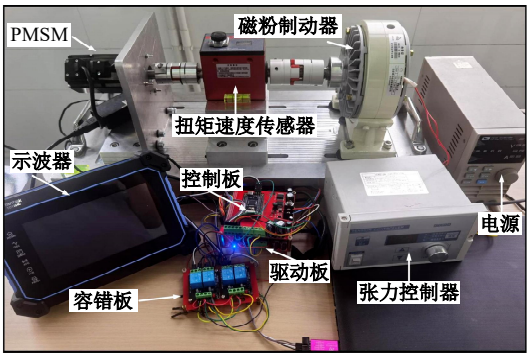


图 12 实验平台

Fig. 12 Experimental platform

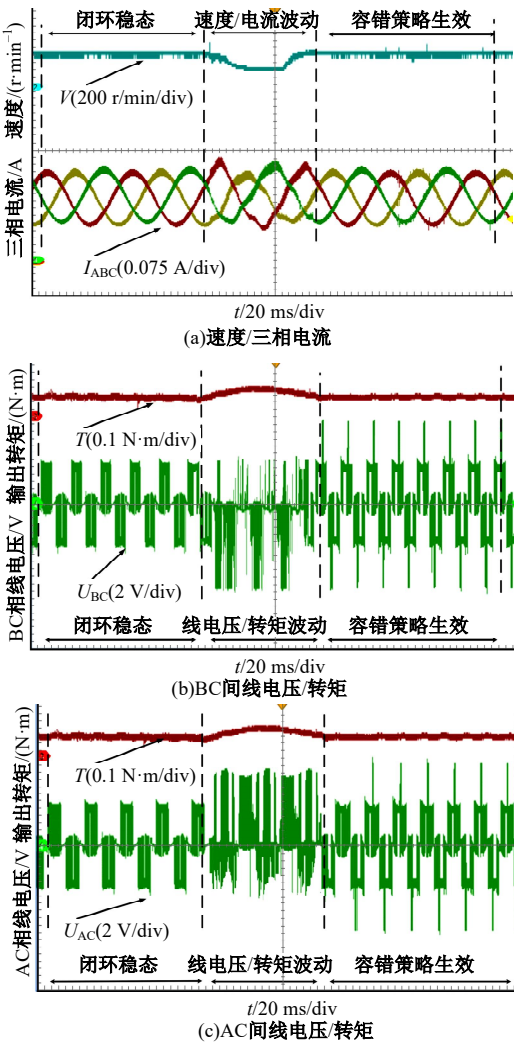


图 13 C 相故障特性

Fig. 13 Fault characteristics of phase C

流、线电压及输出转矩均发生明显波动,当单相容错调制策略生效后,速度、三相电流、线电压及输出转矩均恢复至稳态,并且为跟随给定速度,线电压此时呈现五电平结构。

当 B、C 两相开关管 S_{B2} 、 S_{B3} 、 S_{C2} 、 S_{C3} 出现故

障,该故障类型符合两相容错调制策略,在给定转速和负载转矩不变的情况下,测得各个阶段的速度、三相电流、线电压及输出转矩特性如图14所示。两相容错调制策略生效后三相电流、速度、线电压、输出转矩都恢复至稳定状态,而稳态后BC间线电压呈现三电平结构,AC、AB间线电压稳态后呈现五电平结构。

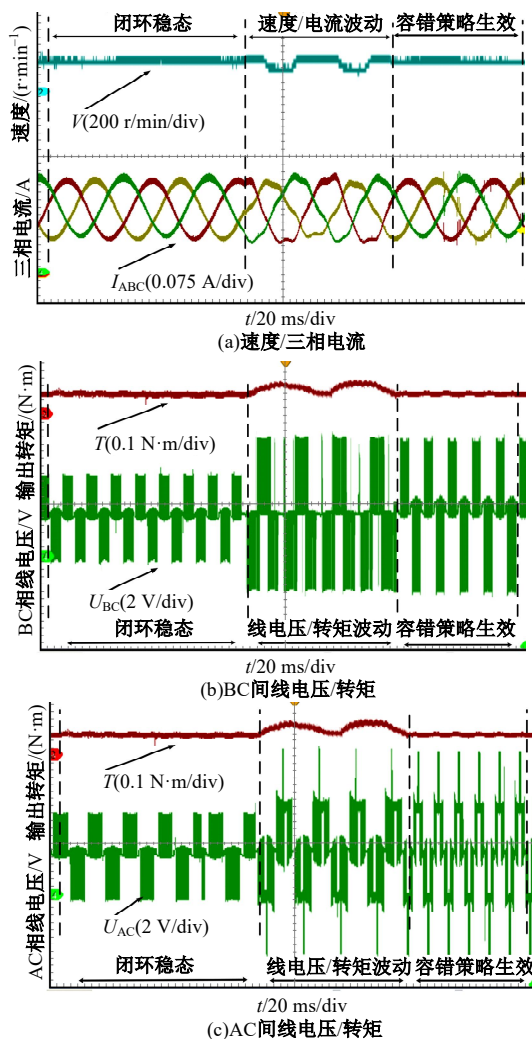


图14 BC相故障特性

Fig. 14 Fault characteristics of phase BC

当三相开关管 S_{A2} 、 S_{A3} 、 S_{B2} 、 S_{B3} 、 S_{C2} 、 S_{C3} 出现故障时,该故障类型符合三相容错调制策略,测得各个阶段的速度、三相电流、线电压及输出转矩特性如图15所示。

三相容错调制策略生效后三相电流、速度、线电压及输出转矩都恢复至正常状态,A、B、C三相都失去O电平状态,因此3种线电压在容错调制策略生效后均呈现三电平结构。

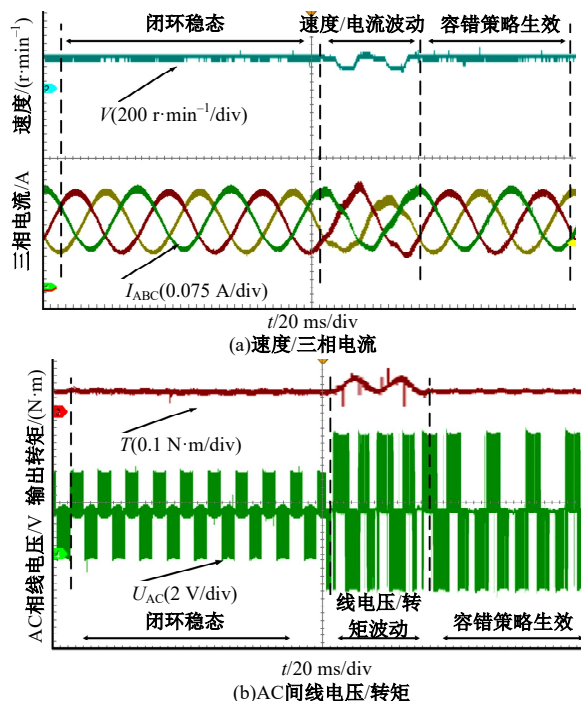


图15 三相故障特性

Fig. 15 Fault characteristics of three phases

4 结束语

本文提出了一种容错T型三电平逆变器的拓扑结构,并分析了各种故障类型的特点,根据故障类型评估了容错调制策略的可行性。在此基础上,提出了基于容错拓扑结构的五段式容错SVPWM调制策略。该策略能够针对符合容错调制策略可行性要求的故障类型进行相应的调制,确保系统能够在故障状态下继续运行,直至故障被解除,而不影响正常生产。仿真与实验结果表明,该策略具有较高的实用价值和可行性。对不符合容错调制策略可行性的故障类型,将作为未来研究的重点内容进行深入探讨和解决。

参考文献:

- [1] 陈丹江,柳玉甜,张少中. 三电平T型逆变器开关控制策略研究[J]. 控制工程, 2022, 29(5): 927-934.
Chen Dan-jiang, Liu Yu-tian, Zhang Shao-zhong. Switch control strategies of three-level T-type inverter[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(5): 927-934.
- [2] 许水清,黄文展,何怡刚,等. 基于自适应滑模观测器的中点钳位型三电平并网逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 1010-1022.
Xu Shui-qing, Huang Wen-zhan, He Yi-gang, et al.

- Open-circuit fault diagnosis method of neutral point clamped three-level grid-connected inverter based on adaptive sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1010-1022.
- [3] 苗贝贝, 沈艳霞. NPC 三电平逆变器的开关管开路故障诊断[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 65-72.
Miao Bei-bei, Shen Yan-xia. Diagnosis of open-circuit switch faults in neutral-point-clamped three-level inverter[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(5): 65-72.
- [4] 刘嘉庆, 姜建国. 基于 NPC 三电平的永磁同步电机控制研究[J]. 大电机技术, 2023, 2023(5): 25-31, 37.
Liu Jia-qing, Jiang Jian-guo. Research on PMSM control based on NPC three-level[J]. Large Motor Technology, 2023, 2023(5): 25-31, 37.
- [5] Wang X Q, Wang Z, Xu Z X, et al. Diagnosis and tolerance of common electrical faults in T-type three-level inverters fed dual three-phase PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1753-1769.
- [6] 朱琴跃, 徐璟然, 谭喜堂, 等. 器件共享型三电平逆变器容错控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(7): 107-119.
Zhu Qin-yue, Xu Jing-ran, Tan Xi-tang, et al. Fault-tolerant control of device sharing three-level inverter[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(7): 107-119.
- [7] 陈志远, 陈杰, 邢相洋, 等. T 型三电平逆变器并联系统的故障容错控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7079-7093.
Chen Zhi-yuan, Chen Jie, Xing Xiang-yang, et al. The fault tolerance control method in three-level T-type inverter parallel system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021, 41(20): 7079-7093.
- [8] 张斌, 杨来宝, 刘鑫, 等. 三相八开关容错逆变器驱动 PMSM 系统模型预测直接转矩控制[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1076-1084.
Zhang Bin, Yang Lai-bao, Liu Xin, et al. Model predictive torque control of PMSM system driven by three phase eight switch fault-tolerant inverter[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(4): 1076-1084.
- [9] Chen D J, Zheng L Y. Fault-tolerant control for three-phase three-level T-type inverters with a redundant leg[J]. Archives of Electrical Engineering, 2022, 6: 931-948.
- [10] Pang X Z, Chen A L, Li X Y, et al. Carrier-based fault tolerant control strategies for three-level T-type inverter with unbalanced neutral-point voltage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 4154-4164.
- [11] Kumar B, Peddapati S. An improved T-type multi-phase fault tolerant inverter with preserved rated output[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2024, 5(3): 962-973.
- [12] 马晓军, 李敏裕, 魏曙光, 等. T 型逆变器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2324-2333.
Ma Xiao-jun, Li Min-yu, Wei Shu-guang, et al. Open circuit fault diagnosis of T-type inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2324-2333.
- [13] 张建忠, 耿治, 徐帅. 基于 T 型逆变器的 APF 故障诊断与容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 245-255.
Zhang Jian-zhong, Geng Zhi, Xu Shuai. Fault diagnosis and fault tolerant control for APF based on T-type inverter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(1): 245-255.
- [14] 李善寿, 陶勇, 叶伟, 等. 抑制 T 型三电平逆变器共模电压的调制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2826-2839.
Li Shan-shou, Tao Yong, Ye Wei, et al. Modulation strategy with reduced common mode voltage for T-type three-level inverter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2826-2839.
- [15] Sajitha M, Ramchand R. Space vector PWM scheme for three phase three level T-type NPC inverter[C]// 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2019: 523-528.
- [16] Vu P, Trang N V, Manh N D, et al. Modified space vector modulation technique for three phase three level T-type inverter[J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2021, 11(3): 1230-1237.