

电力电子变压器公共冗余结构及容错控制策略

韩杰祥,张哲,徐可寒,尹项根

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:电力电子变压器(PET)包含大量电力电子器件,其子模块故障率相对较高,严重影响了供电可靠性。为提高级联H桥型PET的可靠性及容错能力,针对级联H桥的结构及运行特点,提出了一种双子模块公共冗余结构。该结构通过双向开关切换阵列灵活切换2个冗余子模块之间的连接方式,能够在PET内部任意单子模块和双子模块故障情况下实现备用功能。基于该新型冗余结构,提出相应的容错控制策略及运行模式切换逻辑,并对比了PET采用不同冗余结构时的运行可靠性和制造成本。

关键词:电力电子变压器;级联H桥;冗余结构;容错控制;可靠性

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112016

0 引言

近年来,交直流混合配电网因其良好的分布式能源消纳能力和直流负荷匹配性能而受到广泛关注^[1]。电力电子变压器(PET)是交直流混合配电网中的关键互联设备。与传统工频变压器相比,PET能有效减小设备体积和重量,并具备电能变换、交直流互联、潮流控制、无功补偿、电能质量调节等功能^[2-5]。但是,由于PET采用了大量电力电子器件,其内部故障概率相对较高^[6]。PET子模块(SM)故障不但会威胁其自身安全,而且会对交直流混合配电网造成谐波污染和功率振荡,严重劣化电能质量,影响电网运行稳定性与供电可靠性。

冗余结构设计和容错控制策略能够在子模块故障期间维持PET可靠运行,是突破PET脆弱性瓶颈、更好满足工程化应用要求的重要措施。PET根据结构特点,可以划分为基于模块化多电平换流器(MMC)和级联H桥(CHB)这2种基本结构类型^[7]。MMC型PET具备中压直流母线,主要用于构建中压直流配电网,其子模块结构简单,实现全局冗余热备用运行时设备利用率高,成本增加不明显^[8]。CHB型PET直接面向用户,级联子模块数较少,子模块故障将造成PET结构严重不对称,极大劣化整体运行性能。另外,CHB型PET的子模块构造复杂,采用分相冗余设计成本高,且冗余模块利用率低。因此,如何通过合理的冗余结构设计和容错控制提高CHB型PET的可靠性受到了更多关注。文献[9-10]研究了CHB子模块故障造成三相桥臂结构不对称时的容错控制策略,但是三相桥臂需按照分相冗余设计,增加了设备制造成本。文献[11]提出了单相CHB型PET的

冗余结构和容错控制策略,但是将该结构拓展应用于三相PET时,也相当于分相冗余设计,无法满足经济性要求。文献[6,12]提出了单子模块公共冗余结构及容错控制策略,但是该结构仅能应对单子模块故障,容错能力有限。文献[13]将单子模块公共冗余结构用于CHB型PET,但是冗余子模块运行于冷备用状态,在切换过程中可能产生较大的暂态冲击。文献[14]针对CHB型PET,提出单子模块和双子模块2种冗余结构,但是冗余子模块与主电路子模块在前级变换器拓扑结构方面存在差异,冗余模块切换操作较复杂,且不利于设备制造和故障更换。

针对CHB型PET在冗余结构设计和容错控制策略研究中存在的不足,本文提出一种双子模块公共冗余结构及相应的容错控制策略,并从可靠性和经济性角度,与采用其他冗余结构的PET进行对比分析。本文所提冗余结构在PET发生任意单子模块故障和双子模块故障情况下均可实现备用功能。在控制成本的前提下,冗余子模块利用率和PET运行可靠性得到显著提高。最后,通过仿真实验验证了该冗余结构和容错控制策略的正确性和有效性。

1 CHB型PET基本原理

CHB型PET拓扑结构见图1。图中, L_m 为滤波电感; SM_{aj} 、 SM_{bj} 和 SM_{cj} ($j=1,2,\dots,N$)分别为A相、B相和C相的第 j 个子模块, N 为各相级联子模块数。PET交流侧采用星形连接的CHB结构,直流侧三相子模块统一并联形成直流端口。图2为PET子模块拓扑结构。图中,子模块旁路开关可用于旁路故障子模块;前级H桥(HB)可实现双向AC/DC变换;中间级双有源桥(DAB)采用谐振型双向DC/DC变换器,其双侧HB通过高频变压器(HFT)互联,将直流电压调制成高频方波,经谐振环节实现功率传递^[15]。

PET一般采用双闭环控制,根据不同应用需求,采用有功/电压外环,工作于定功率或定电压2种

收稿日期:2021-02-26;修回日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089)

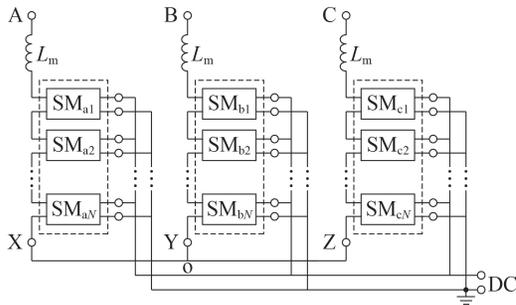


图1 CHB型PET拓扑结构

Fig.1 Topology of CHB typed PET

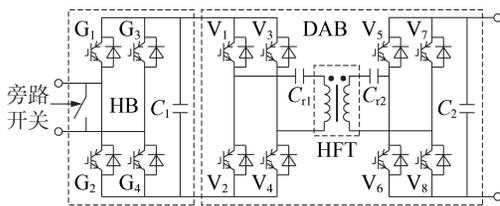


图2 PET子模块拓扑结构

Fig.2 Topology of PET's SM

控制模式,实现交直流电网之间的潮流控制或直流配电网电压调节^[16]。在2种控制模式下,PET均可实现功率双向流动,根据交直流配电网功率供求状况进行快速灵活调节。电流内环通过前馈控制实现 dq 解耦,给定调制电压指令值。

2 公共冗余结构及容错控制策略

冗余结构设计是应对PET子模块故障的有效措施,但是单子模块公共冗余结构容错能力有限,分相冗余结构制造成本过高。本文从兼顾设备可靠性和经济性的角度,提出双子模块公共冗余结构及相应的容错控制策略。

2.1 拓扑结构设计

变压器有载调压的无触点连接方式对冗余结构设计具有一定的参考作用。有载调压利用电力电子开关实现调压绕组的投切,从而灵活调节变压器有效匝数^[17]。然而,有载调压系统的各相分接头连接开关需独立设计,调压绕组无需在三相之间进行切换;在各相绕组内部,不同调压绕组的接入方式也相对固定。与采用有载调压的分接头连接方式相比,冗余结构设计的难点在于冗余子模块在三相之间公共备用功能的实现,以及各冗余子模块之间连接方式的灵活变换。

利用公共冗余结构实现任意单子模块和双子模块故障情况下的备用功能,需要解决以下关键问题:①单子模块故障时,实现冗余子模块在各相间的公共备用功能;②同相双子模块故障时,实现2个冗余子模块的串联备用功能;③异相双子模块故障时,实现2个冗余子模块的分相备用功能;④控制灵活方便,运行稳定可靠,易于更换维修。

为此,本文提出一种双子模块公共冗余拓扑结构,如图3所示。图中, RM_1 和 RM_2 为冗余子模块,其结构与图2所示的PET主电路子模块拓扑结构相同,能够在容错运行期间保证PET三相级联结构对称,以简化控制策略,且易于冗余模块的制造和更换。

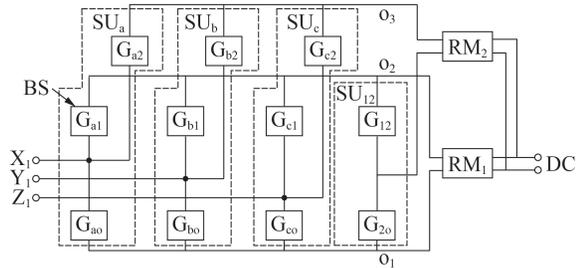


图3 双子模块公共冗余拓扑结构

Fig.3 Topology of dual-SM communal redundant

RM_1 和 RM_2 的投退及其在三相之间的切换通过图3中的开关组(SU)实现。 SU_a 、 SU_b 和 SU_c 分别为A相、B相和C相开关组。每个开关组包含3个可控双向开关(BS),即 G_{a0} 、 G_{a1} 和 G_{a2} ($x=a,b,c$)。这3个BS采用星形连接,其公共连接点接于PET三相级联桥臂,其他3个端口分别接于 RM_1 、 RM_2 和中性点。图3中, G_{a0} 、 G_{b0} 和 G_{c0} 为各相中性点连接控制开关,可用于调节冗余子模块的投退; G_{a1} 、 G_{b1} 和 G_{c1} 为 RM_1 投入各相的控制开关, G_{a2} 、 G_{b2} 和 G_{c2} 为 RM_2 投入各相的控制开关,控制开关能够灵活调节冗余子模块投入相应级联桥臂,实现冗余模块的公共备用功能。

2个冗余子模块连接方式的切换通过图3中的 SU_{12} 控制。其中, G_{20} 为 RM_2 中性点连接控制开关,控制 RM_2 独立投入级联桥臂,实现双子模块的分相备用功能; G_{12} 为 RM_1 和 RM_2 的串联控制开关,实现 RM_1 和 RM_2 的串联备用功能。

需要指出的是,图3中的冗余结构具有良好的可拓展性。以上述设计原则为指导,可以得到多子模块冗余结构如附录A图A1所示,图中包含 q 个冗余子模块。对于双子模块冗余的情况,即只存在 RM_1 和 RM_2 ,图A1与图3中的结构相同。当冗余结构拓展到 n 个冗余子模块时,只需要增加子模块投入开关 G_{a_q} 、 G_{b_q} 和 G_{c_q} ,同时,在 RM_q 和 RM_{q-1} 之间增加中性点连接控制开关 G_{q0} 以及串联控制开关 $G_{q-1,q}$ 。

鉴于3个及以上子模块同时发生故障的概率较低,从兼顾设备成本和运行可靠性角度,本文重点以双子模块公共冗余结构为例进行研究,相关结论同样可拓展应用于多子模块冗余结构。采用图3所示双子模块公共冗余结构的PET拓扑结构见图4。图中,冗余模块交流端口 X_1 、 Y_1 和 Z_1 分别接入PET三相桥臂,冗余模块直流端口与PET直流端口并联。

冷备用子模块在投入运行过程中存在软启动、暂态过流等问题。此外,冗余子模块因其公共备用

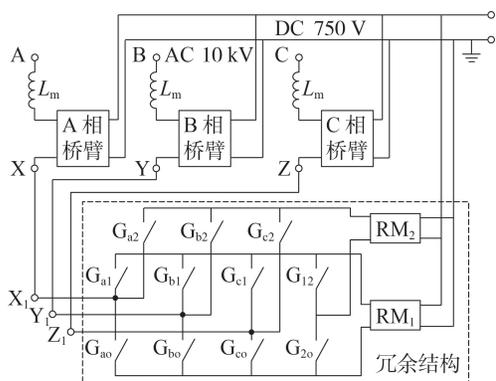


图4 双子模块公共冗余PET拓扑结构

Fig.4 Topology of dual-SM communal redundant PET

功能而不能直接投入主电路以热备用状态运行。为此,在PET正常运行时,RM₁和RM₂的前级HB闭锁,DAB正常触发,将其电容电压维持在额定值附近。因此,当冗余子模块投入主回路并收到HB触发信号时,可迅速进入工作状态,从而避免运行模式切换过程中的暂态冲击。

2.2 冗余结构工作模式控制

通过调节图3所示的双子模块公共冗余结构中BS的状态,可控制其工作于正常运行模式、单子模块投入模式、双子模块同相串联投入模式和双子模块分相投入模式这4种模式。

1)模式1:正常运行模式。

当PET三相主电路子模块正常运行时,触发三相中性点控制开关G_{a0}、G_{b0}和G_{c0},为三相级联桥臂提供中性点,其余BS断开。BS状态如附录A表A1中S₁对应的状态所示。表中,“1”表示开关导通,“0”表示开关断开。当中性点控制开关发生故障时,亦可触发G_{a1}、G_{b1}、G_{c1}或G_{a2}、G_{b2}、G_{c2},以图3中o₂或o₃为中性点,从而提高可靠性,相应的BS状态如表A1中S₂和S₃对应的状态所示。

2)模式2:单子模块投入模式。

PET某一相单个子模块发生故障情况下,应隔离故障子模块并投入冗余子模块,维持PET整体系统可靠运行。单子模块投入运行模式下,需闭合RM₁投入控制开关,并断开故障相中性点连接控制开关。以A相为例,闭合G_{a1},断开G_{a0},将RM₁投入A相桥臂,BS状态如表A1中S₄对应的状态所示。在RM₁故障情况下,亦可将RM₂投入A相,作为后备,以提高运行可靠性。S₄的后备方案所对应的BS状态如表A1中S₅—S₈对应的状态所示。

3)模式3:双子模块同相串联投入模式。

当某一相发生双子模块故障时,需要将2个冗余子模块串联投入故障相。闭合RM₂投入控制开关和子模块串联控制开关,断开故障相中性点连接控制开关,即可运行于双子模块同相串联投入模式。以A相为例,闭合G_{a2}和G₁₂,断开G_{a0},则RM₁和RM₂

串联投入A相桥臂,BS状态如表A1中S₉对应的状态所示。该状态下BS发生故障时,可由表A1中S₁₀对应的状态作为后备。

4)模式4:双子模块分相投入模式。

PET不同相的子模块发生故障时,需要将RM₁和RM₂分别投入故障子模块所在相。在双子模块分相投入模式下,应闭合其中一相的RM₁投入控制开关,并闭合另一相的RM₂投入控制开关及中性点连接控制开关G₂₀,然后断开2个故障相的中性点控制开关。以A相和B相子模块故障为例,闭合G_{a1}、G_{b2}和G₂₀,断开G_{a0}和G_{b0},则RM₁和RM₂分别投入A相和B相桥臂,BS状态如表A1中S₁₁对应的状态所示。S₁₂对应的状态为S₁₁开关组故障下的后备状态。

以表A1中4种工作模式的S₁、S₄、S₉和S₁₁对应的主工作状态为例,其工作电路见附录A图A2。由图可见,双子模块公共冗余结构能够在任意单子模块和双子模块发生故障时实现公共备用和灵活投切。

2.3 容错控制策略

PET故障子模块的检测与定位是容错控制的前提,目前已有研究学者开展了较全面的研究^[18-19]。故障子模块定位后,首先闭合故障子模块旁路开关并闭锁DAB,将故障子模块从系统中隔离。然后,结合冗余结构的运行状态,进行运行模式切换及控制。

1)容错控制流程。

双子模块公共冗余型PET的容错控制流程如附录A图A3所示。PET的工作状态正常时,冗余结构中中性点连接开关导通,其他开关断开,运行于正常模式;检测到某个子模块故障时,根据故障定位结果,导通故障相RM₁投入控制开关,并断开故障子模块所在相的中性点连接控制开关,冗余结构从正常运行模式切换至单子模块投入模式运行。

模式切换开关控制不当可能会引起过电压。以A相为例,PET的单相数学模型为:

$$u_{sa} - \sum u_{aj} = L_m di_a / dt \quad (1)$$

式中: u_{sa} 为系统电压; u_{aj} 为PET的A相第j个子模块的输出电压; i_a 为A相电流。

在模式切换过程中,如果首先断开中性点控制开关,则电流通路将被截断。由式(1)可知,此时电感可能产生过电压。因此,BS需要遵循一定的开关顺序,即冗余子模块投入BS首先导通,然后将待关断的BS断开。此时,已经闭合的BS就能够和冗余子模块的续流二极管一起提供续流通路,以子模块电容构成吸收电路,避免回路电感产生过电压。切换完成后,触发冗余子模块,进入正常工作状态。以上述RM₁投入过程为例,其切换过程及续流通路如附录A图A4所示。

在单子模块投入工作模式下,如果PET子模块再次发生故障,则冗余结构切换至双子模块投入模

式。如果故障子模块与首次发生故障的子模块同相,则冗余结构切换至双子模块同相串联投入模式。此时,应导通故障相 RM_2 控制投入开关和子模块串联控制开关,关断故障相 RM_1 投入控制开关,在 RM_1 投入运行的基础上,将 RM_2 串入故障桥臂。如果故障子模块与首次发生故障的子模块异相,则冗余结构切换至双子模块分相投入模式。此时,应导通 RM_2 中性点连接控制开关及其投入控制开关,并关断故障相中性点连接控制开关,将 RM_2 投入故障相运行。

在双子模块投入运行状态下,如果PET再次发生子模块故障,则由控制及保护系统发出停机指令,隔离故障PET。

2) 容错运行策略。

PET容错运行策略如附录A图A5所示。在不同的工作模式下,将冗余子模块测量信号通过不同通道输入PET的控制与保护系统,由PET控制系统对其运行状态进行统一调节。同时,根据故障定位结果和冗余结构运行状态,结合控制系统给出的基本载波和调制波信号,确定冗余子模块的载波和调制波,产生HB触发脉冲,实现冗余子模块与正常子模块的协调配合运行。

CHB型PET一般采用载波移相调制,同一相的子模块载波依次移相 π/N ,然后与调制波比较得到子模块触发脉冲。根据PET故障定位结果,冗余子模块在基本载波基础上的移相值 $\Delta\phi_c$ 为:

$$\Delta\phi_c = (p-1)\pi/N \quad (2)$$

式中: $p=1,2,\dots,N$,表示故障子模块位置。

根据故障子模块所在相的检测结果,冗余子模块的调制波为:

$$u_{r1} = k_{r1}u_{rp}, \quad u_{r2} = k_{r2}u_{rp} \quad (3)$$

式中: u_{r1} 和 u_{r2} 分别为 RM_1 和 RM_2 的调制波; k_{r1} 和 k_{r2} 分别为 RM_1 和 RM_2 的调制波系数; u_{rp} ($\varphi=a,b,c$)为冗余结构投入相的调制波信号。 $k_{r1}, k_{r2} \in \{1, 0, -1\}$,正常运行时,取值为0。对于 k_{r1} ,在 o_1 做中性点的状态下,取值为1;在 o_2 做后备中性点的状态下,取值为-1,对调制波做反相处理。对于 k_{r2} ,在 o_1 或 o_2 做中性点的状态下,取值为1;在 o_3 做后备中性点的状态下,取值为-1,对调制波做反相处理。

3 可靠性及成本分析

良好的冗余结构设计需要兼顾设备运行可靠性和经济性的要求。本节根据采用冗余结构的PET的运行特点,从一般性角度,给出了其可靠性和制造成本的评估计算方法。以此为基础,对所提出的冗余结构设计方案的可靠性和经济性进行了分析,并与其他采用不同冗余结构的PET进行了对比,以验证所提方案的合理性。

3.1 PET可靠性及成本分析

设备可靠性一般按式(4)进行计算。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中: λ 为设备故障率; t 为运行时间。

图2所示的PET子模块可靠性 R_{sm} 为:

$$R_{sm} = R_{igt}^{12} R_c^2 R_{hft} \quad (5)$$

式中: R_{igt} 、 R_c 和 R_{hft} 分别为IGBT单元、电容和高压变频器的可靠性。

对于冗余系统,通常采用k/n(G)模型进行可靠性分析,具体为^[20]:

$$R = \sum_{i=0}^k C_w^i R_{sm}^{w-i} (1-R_{sm})^i \quad (6)$$

式中: w 为系统子模块数; k 为系统维持运行所允许的最多故障子模块数; i 为故障子模块数。

在式(4)~(6)的基础上,对本文提出的双子模块公共冗余结构可靠性进行评估。具备该结构的PET包含无子模块故障、单子模块故障和双子模块故障状态这3种运行状态。

无子模块故障状态下,PET可靠性为:

$$R_1 = R_{sm}^{3N} [1 - (1 - R_{sm}^3)^3] \quad (7)$$

单子模块故障状态下,PET可靠性为:

$$R_2 = C_{3N}^1 (1 - R_{sm}) R_{sm}^{3N-1} R_{bp} \left\{ R_{sm} [1 - (1 - R_{bs}^3)^2] + (1 - R_{sm}) R_{sm} [1 - (1 - R_{bs}^4)^3] \right\} \quad (8)$$

双子模块故障状态下,其可靠性为:

$$R_3 = C_{3N}^2 (1 - R_{sm})^2 R_{sm}^{3N-2} R_{bp}^2 R_{sm}^2 [1 - (1 - R_{bs}^4)^2] \quad (9)$$

式中: R_{bp} 和 R_{bs} 分别为旁路开关和BS的可靠性。

在可靠性计算过程中(式(7)~(9))考虑了2.2节所提的状态切换开关组的后备功能。综上,图4所示的双子模块公共冗余型PET的可靠性为:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (10)$$

图4所示的双子模块公共冗余型PET一次设备制造总成本为:

$$C = (3N+2)C_{sm} + 3NC_{bp} + 11C_{bs} \quad (11)$$

式中: C_{sm} 、 C_{bp} 和 C_{bs} 分别为子模块、旁路开关和BS的成本。

子模块成本为:

$$C_{sm} = 12C_{igt} + 2C_c + C_{hft} \quad (12)$$

式中: C_{igt} 、 C_c 和 C_{hft} 分别为IGBT单元、电容和高压变频器成本。

PET主要元件的故障率及成本数据见附录A表A2。表中,IGBT和电容故障率为实际统计数据^[21];高频变压器故障率参考同电压等级PET^[22];旁路开关一般选用高可靠性开关,文献[21]按理想开关处理,本文以略低于IGBT单元的原则对旁路开关的故障率进行合理假设。元件成本按照工程经验选取。

BS故障率取决于开关类型,可以根据运行可靠

性及成本方面的不同需求,选用不同结构的BS。部分BS结构如图5所示。

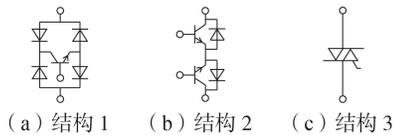


图5 BS拓扑结构

Fig.5 Topologies of BS

图5(a)、(b)中BS采用全控器件构成,控制方便,切换速度快。图5(c)中BS成本较低,且具有良好的可靠性,但只能在电流过零点时自然关断,切换速度和灵活性难以满足应用要求。相较而言,虽然图5(b)所示的BS的开通损耗较小,但其可靠性有所降低,且成本较高。本文综合考虑控制灵活性、制造成本和运行可靠性,选用图5(a)所示的BS作为冗余结构的切换开关,并以此进行可靠性和成本分析。鉴于二极管运行可靠性远高于IGBT,以略高于IGBT单元的原则对图5(a)所示的BS的故障率进行合理假设。

3.2 不同冗余结构下的PET性能对比

在3.1节的基础上,将附录A表A2中的参数代入式(7)~(12),对双子模块公共冗余型PET的可靠性及成本进行评估。同时,对已有不同冗余结构以相同的计算原则和参数进行可靠性和成本分析,用于性能对比。所分析的结构如下:结构I为双子模块公共冗余结构,即本文所提出的结构;结构II为无冗余结构^[15];结构III为单子模块公共冗余结构^[12];结构IV为单子模块分相冗余结构^[10];结构V为双子模块冗余结构^[14];结构VI为双子模块分相冗余结构。以上6种结构的可靠性分析结果如图6所示。

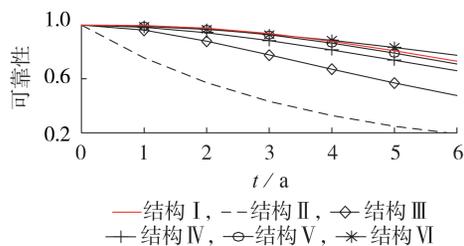


图6 采用不同结构的PET可靠性对比

Fig.6 Reliability comparison of PET among different structures

采用不同结构的PET的成本计算结果与投入运行第1年的可靠性如表1所示,表中还展示了PET的容量、级联子模块数 N 以及各冗余结构下的冗余子模块数 N_r 。需要说明的是,各冗余结构下的可靠性及成本分析结果是针对不同的冗余设计方法,基于相同的PET主电路和容量,通过统一的计算原则和数据得到的。因此,能够反映不同冗余结构的性能

相对关系,基本不受具体数据的影响。

表1 采用不同结构的PET可靠性及成本评估

Table 1 Reliability and cost estimation of PET with different structures

结构	PET额定容量 / (MV·A)	N	N_r	第1年可靠性 / %	成本 / 万元
I	1.5	5	2	99.63	100.386
II	1.5	5	0	75.59	84.870
III	1.5	5	1	96.24	93.228
IV	1.5	5	3	98.37	102.924
V	1.5	5	2	99.49	102.066
VI	1.5	5	6	99.04	120.078

由图6可见,采用结构II和结构III的PET可靠性远低于其他结构,不能满足工程应用需求。本文提出的双子模块公共冗余结构(结构I)在设备投运初期可靠性最高,长期运行过程中,其可靠性仅次于结构VI,但差别不大。由表1可见,结构VI成本远高于其他结构,因此其性价比远低于结构II之外的其他结构,工程实用性较差。结构I成本略高于结构II和结构III,但是能够大幅提升PET运行可靠性。结构V性能指标略逊于结构I。但需要指出的是,与结构V相比,结构I中冗余子模块结构与PET主电路的子模块结构相同,其触发控制系统、散热装置、机械结构等均可直接沿用主电路子模块的设计方案。结构V中的冗余子模块与主电路子模块结构不同,其触发控制系统、散热装置、机械结构等均需要在主电路子模块基础上进行相应的改动,且不利于检修和故障更换。此外,结构I因采用与主电路子模块相同的结构,可拓展性强,模式切换控制简单。结构V的切换逻辑以及冗余子模块的控制复杂度会随着冗余子模块数量的增加而增加。综上,本文提出的双子模块公共冗余结构能够在控制成本的前提下,有效提升PET的可靠性,较好满足工程应用要求。

4 仿真实验

在PSCAD/EMTDC软件中搭建PET及冗余结构的详细模型,对冗余结构功能及容错控制策略的有效性进行测试。仿真系统关键参数如附录A表A3所示。在仿真测试中,分别考虑定功率和定电压控制模式,以及不同负载水平和外部故障等条件,针对单子模块故障、同相和异相双子模块故障等故障类型进行了测试,以全面分析本文所提出的冗余结构和容错控制策略。

4.1 单子模块故障

PET运行于定功率整流工况,传输功率为额定功率。 SM_{a2} 在0.2s时发生开路故障。故障前后的子模块电压如图7所示,图中 $u_{sm_{a2}}$ 、 u_{m1} 和 u_{m2} 分别为故障子模块 SM_{a2} 电压、 RM_1 和 RM_2 电压,且均为标

么值。由图7可见,单子模块故障下,采用冗余结构的PET能够迅速切换至单子模块投入模式,以 RM_1 替换故障子模块,从而保证整体系统稳定可靠运行。

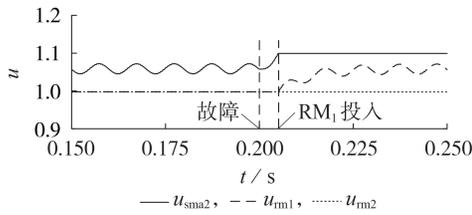


图7 额定负载单子模块故障下的子模块电压
Fig.7 Voltage of SM under single-SM fault in rated load condition

故障子模块及冗余子模块的端口电压及电流如图8所示,图中 u_{a2} 、 i_{a2} 和 u_{rm1} 、 i_{rm1} 分别为故障子模块和 RM_1 的端口电压、电流,且均为标么值。故障发生前,故障子模块投入主电路运行,端口电压为正弦脉宽调制波,电流为桥臂电流, RM_1 运行于旁路状态,端口电压及电流均为0。故障发生后,故障子模块运行于旁路状态, RM_1 投入主回路替代故障子模块。冗余结构下的模式切换过程平滑迅速,不会产生剧烈的暂态冲击。

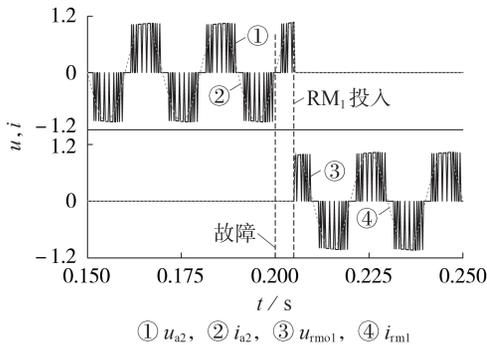


图8 单子模块故障下的子模块端口电压及电流
Fig.8 Voltage and current of SM port under single-SM fault

设初始工况与上文一致,在0.15 s时,BC两相电压跌落至额定值的40%,PET进入低电压穿越状态。在0.2 s时, SM_{a2} 发生短路故障。附录A图A6给出了冗余结构下PET在低电压穿越运行期间的工作情况。由图可见,子模块发生短路故障后电压跌落,冗余结构迅速投入子模块 RM_1 。 RM_2 仍处于备用状态。容错控制系统在PET低电压穿越期间能够可靠工作,冗余结构模式切换对整体运行性能基本不会造成影响。

4.2 同相双子模块故障

PET运行于定电压整流额定负载工况。在0.2 s和0.3 s时, SM_{a2} 和 SM_{a4} 内部分别发生开路故障(故障1)和短路故障(故障2)。图9为无冗余条件下的直流电压 u_{dc} 和交流电流 i_{abc} 波形,图中电压和电流均

为标么值。由图可见,子模块内部发生故障时,将严重影响PET运行性能,双子模块故障情况下运行性能进一步恶化,定电压控制模式下直流母线电压产生波动,影响电能质量。交流侧电流发生严重畸变和过流,威胁PET安全,对电力系统造成谐波污染。

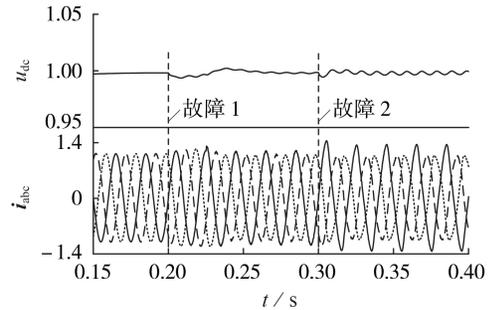


图9 无冗余条件下同相双子模块故障波形
Fig.9 Waveforms of dual-SM fault in same phase without redundancy

采用本文所提出的新型双子模块公共冗余结构,在容错控制策略调节下,同相双子模块故障情况下的直流电压、交流电流和子模块电压波形如图10所示,图中 u_{sma4} 为 SM_{a4} 电压,且图中电压和电流均为标么值。故障子模块及冗余子模块的端口电压和电流波形如附录A图A7所示。

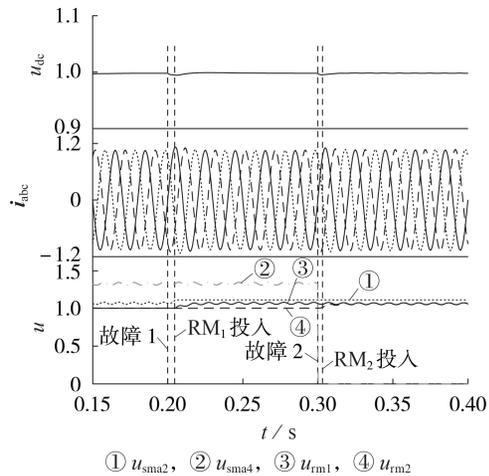


图10 冗余结构下同相双子模块故障波形
Fig.10 Waveforms of dual-SM fault in same phase with redundant structure

由图10和图A7可见, SM_{a2} 发生开路故障时,控制系统旁路故障子模块并投入 RM_1 ,由正常模式切换至单子模块投入模式。该情况下, SM_{a4} 发生短路故障时, RM_2 快速投入,由单子模块投入模式切换至同相双子模块串联投入模式。在冗余结构运行模式切换过程中,冗余子模块能够迅速替代故障子模块运行,不会产生严重的暂态冲击,对PET整体运行性能基本不会造成影响。切换完成后,PET能够实现稳定可靠运行。

4.3 异相双子模块故障

PET运行于定功率逆变状态,传递功率为额定功率,在0.2 s和0.3 s时, SM_{a2} 和 SM_{b5} 分别发生短路和开路故障。附录A图A8为无冗余条件下的功率和交流电流波形。由图可见,发生异相双子模块故障时,也会对PET的运行性能造成较大影响。此时,故障相的级联子模块数减小,由于子模块电压被公共直流母线电压箝位在额定电压附近,PET输出的多电平电压无法达到预定值。因此,交流侧电流将发生畸变和过流,进而导致有功功率及无功功率产生大幅波动。

异相双子模块故障下,具备冗余结构的PET功率、交流电流和子模块电压如附录A图A9所示。故障子模块及冗余子模块的端口电压和电流波形如附录A图A10所示。由图A9和图A10可见, SM_{a2} 发生短路故障时,电压发生严重跌落,控制系统将 RM_1 投入A相运行,冗余结构由正常模式切换至单子模块投入模式。该情况下, SM_{b5} 发生开路故障时,在逆变状态下其子模块电压逐渐跌落,由控制系统将 RM_2 投入B相运行,冗余结构由单子模块投入模式切换至双子模块分相投入模式。这与图10所示效果相同,可见采用冗余结构及相应容错控制策略能够提高PET在子模块故障期间的可靠性,维持其整体运行性能。

5 结论

本文针对CHB型PET提出一种双子模块公共冗余结构和容错控制策略,并与其他冗余结构的可靠性和制造成本进行对比分析,得到如下主要结论。

1)与分相冗余结构相比,公共冗余结构能够降低成本,减小设备体积和重量,并提高冗余模块利用率。与单子模块冗余结构相比,双子模块冗余结构功能丰富,可以实现任意单子模块和双子模块故障备用,增强PET容错能力。

2)容错控制策略实现方便,可以根据故障情况进行冗余结构运行模式的灵活切换,在PET定电压和定功率等不同控制模式以及正常运行和电网故障等多种工况下均能有效实现备用功能。仿真结果验证了其具有良好的性能。

3)可靠性和成本分析结果表明相较于采用其他冗余结构的PET,本文所提出的设计方案可较好兼顾可靠性和经济性要求,更好满足工程应用要求。

本文所提出的冗余结构设计原则具有较强的可拓展性,适用于任意数目冗余子模块的应用场合。此外,该冗余方案和控制策略除能用于PET外,也能为采用CHB结构的有源滤波器、静止同步补偿器等电力电子设备在冗余结构设计和容错控制方面提供参考。

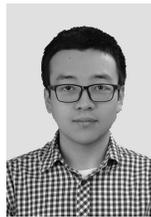
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张凡,高红均,李海波,等. 基于一致性耦合关联的交直流混合配电网协调能量管控[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):23-29,116.
ZHANG Fan,GAO Hongjun,LI Haibo,et al. Energy coordinated management of AC/DC hybrid distribution network based on consistent coupling association[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):23-29,116.
- [2] 黄堃,郝思鹏,宋刚,等. 含三端口电力电子变压器的交直流混合微网分层优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):37-43.
HUANG Kun,HAO Sipeng,SONG Gang,et al. Layered optimization of AC/DC hybrid microgrid with three-port power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):37-43.
- [3] 梁得亮,柳轶彬,寇鹏,等. 智能配电变压器发展趋势分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(7):1-14.
LIANG Deliang,LIU Yibin,KOU Peng,et al. Analysis of development trend for intelligent distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(7):1-14.
- [4] 刘科研,盛万兴,赵鹏杰,等. 信息物理环境下基于电力电子变压器的跨台区光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):66-72,87.
LIU Keyan,SHENG Wanxing,ZHAO Pengjie,et al. Photovoltaic consumption strategy across multiple transformer districts based on PET under cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):66-72,87.
- [5] 李彬彬,张玉洁,张书鑫,等. 具备故障阻断能力的柔性直流输电DC/DC变换器[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):53-59.
LI Binbin,ZHANG Yujie,ZHANG Shuxin,et al. DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(5):53-59.
- [6] ALEENEJAD M,JAFARISHIADEH S,MAHMOUDI H,et al. Reduced number of auxiliary H-bridge power cells for post-fault operation of three phase cascaded H-bridge inverter[J]. IET Power Electronics,2019,12(11):2923-2931.
- [7] BRIZ F,LOPEZ M,RODRIGUEZ A,et al. Modular power electronic transformers:modular multilevel converter versus cascaded H-bridge solutions[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2016,10(4):6-19.
- [8] 薛英林,徐政,张哲任,等. 子模块故障下C-MMC型高压直流系统的保护设计和容错控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):89-97.
XUE Yinglin,XU Zheng,ZHANG Zheren,et al. Protection design and fault-tolerant control of C-MMC based HVDC system under sub-module failure condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):89-97.
- [9] NEYSHABOURI Y,IMAN-EINI H. A new fault-tolerant strategy for a cascaded H-bridge based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(8):6436-6445.
- [10] SUN L,WU Z X,XIAO F,et al. Suppression of real power back flow of nonregenerative cascaded H-bridge inverters operating under faulty conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(7):5161-5175.
- [11] LIU J Q,ZHAO N. Improved fault-tolerant method and control strategy based on reverse charging for the power electronic traction transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(3):2672-2682.
- [12] 桑子夏,郑旭,颜炯,等. 基于级联多电平变换器的固态变压器冗余设计的容错控制研究[J]. 电源学报,2019,17(5):31-38.

- SANG Zixia, ZHENG Xu, YAN Jiong, et al. Research on redundancy design for fault-tolerant control of solid-state transformer based on cascaded multi-level converter[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(5): 31-38.
- [13] 汪玉凤, 张影, 李爽, 等. 多电平级联H桥逆变器 $3N+1$ 冗余容错策略的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 208-212.
- WANG Yufeng, ZHANG Ying, LI Shuang, et al. Research on $3N+1$ redundancy fault-tolerance strategy of multilevel cascaded H-bridge inverter[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 208-212.
- [14] TIAN J, MAO C X, WANG D, et al. A short-time transition and cost saving redundancy scheme for medium-voltage three-phase cascaded H-bridge electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9242-9252.
- [15] 刘闯, 支月媚. 混合级联式电力电子变压器拓扑结构及控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 596-603.
- LIU Chuang, ZHI Yuemei. Hybrid cascaded power electronics transformer topology and control scheme[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 596-603.
- [16] 李俊杰, 吕振宇, 吴在军, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合微电网运行模式自适应切换策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 126-131, 138.
- LI Junjie, LÜ Zhenyu, WU Zaijun, et al. Adaptive switching strategy of AC/DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 126-131, 138.
- [17] 周念成, 苏宇, 王强钢, 等. 基于IGBT的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 35-42, 67.
- ZHOU Niancheng, SU Yu, WANG Qianggang, et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 35-42, 67.
- [18] 韩杰祥, 张哲, 尹项根, 等. 级联型电力电子变压器内部开路故障特征及定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6071-6084.
- HAN Jiexiang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and location method for internal open circuit fault of cascaded power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6071-6084.
- [19] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4846-4856.
- [20] RADWAN T, ALRAWASHDEH M J, GHANEM S. An efficient formula for generalized multi-state k-out-of-n:G system reliability[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44823-44830.
- [21] GRINBERG R, RIEDEL G, KORN A, et al. On reliability of medium voltage multilevel converters[C]//5th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA: IEEE, 2013: 4047-4052.
- [22] XU X X, TAI N L, HU Y, et al. Reliability calculation of AC/DC hybrid distribution network with a solid-state transformer[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 3067-3071.

作者简介:



韩杰祥

韩杰祥(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为交直流混合配电网控制及保护技术(E-mail: jiexianghan@163.com);

张哲(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail: zz_mail2002@163.com);

徐可寒(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail: d201880430@hust.edu.cn);

尹项根(1954—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail: xgyin@mail.hust.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Communal redundant structure and fault-tolerant control strategy for power electronic transformer

HAN Jiexiang, ZHANG Zhe, XU Kehan, YIN Xianggen

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: PET(Power Electronic Transformer) contains many power electronic devices, the failure rate of its submodules is relatively high, which seriously affects the reliability of power supply. To improve the reliability and fault-tolerant ability of cascaded H-bridge PET, combining with the structural and operating characteristics of cascaded H-bridge, a dual-submodule communal redundant structure is proposed. This structure switches the connection mode between the two redundant submodules flexibly through bidirectional switches, and can realize the standby function in the case of any single- or dual-submodule fault inside PET. Based on the novel redundant structure, the fault-tolerant control strategy and mode switching logic of the redundant structure are proposed, and the operating reliability and manufacturing cost of PET with different redundant structures are compared.

Key words: power electronic transformer; cascaded H-bridge; redundant structure; fault-tolerant control; reliability

附录 A

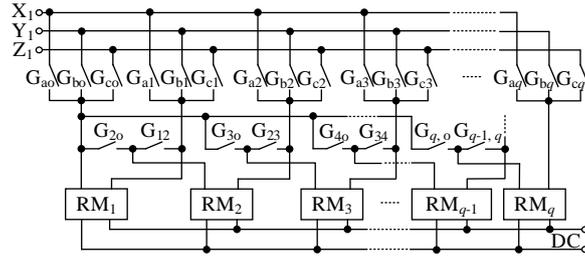


图 A1 多子模块冗余结构示意图

Fig.A1 Topology of multiple submodule redundant structure

表 A1 冗余结构模式切换示例

Table A1 Mode switching example of redundant structure

BS	模式 1			模式 2			模式 3			模式 4		
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂
G _{ao}	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
G _{bo}	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
G _{co}	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
G _{a1}	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
G _{b1}	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
G _{c1}	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
G _{a2}	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
G _{b2}	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
G _{c2}	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
G ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
G _{2o}	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0

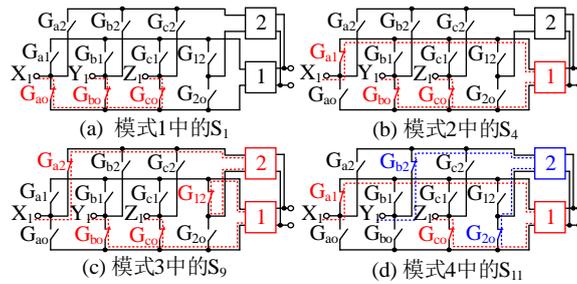


图 A2 冗余结构运行状态示意图

Fig.A2 Operation state diagram of redundant structure

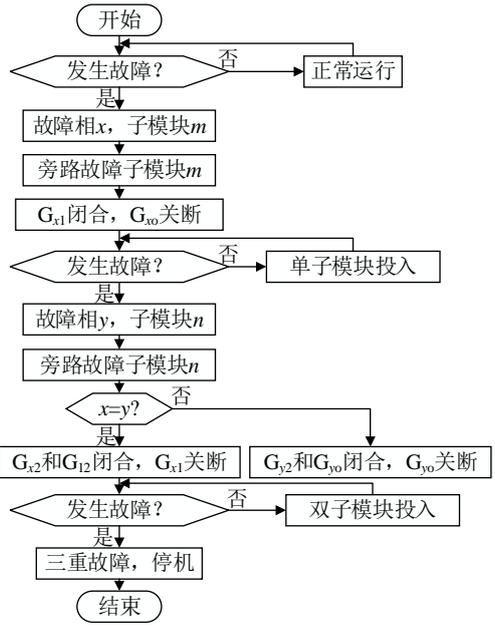


图 A3 PET 容错控制流程

Fig.A3 Fault-tolerant control process of PET

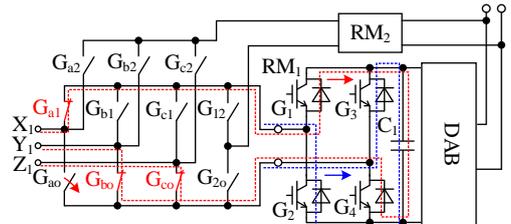


图 A4 冗余结构模式切换及续流通路示意图

Fig.A4 Freewheeling circuits for mode conversion

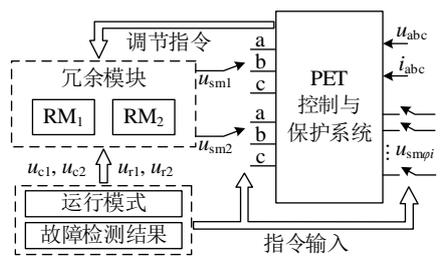


图 A5 PET 容错运行策略

Fig.A5 PET fault-tolerant operation strategy

表 A2 PET 主要元件故障率及成本数据

Table A2 Failure rate and cost data of PET components

元件	故障率/(次·a ⁻¹)	成本/元	V _N /kV	其他参数
IGBT 单元	0.000876	4200	3.3	额定电流为 200 A
稳压电容	0.001752	90	3	电容值为 3000 μF
高频变压器	0.004643	6000	1.9/0.75	额定容量为 0.25 kV·A
旁路开关	0.0006	600	3.3	额定电流为 200 A
BS	0.0012	3000	3.3	额定电流为 200 A

表 A3 仿真系统参数

Table A3 Simulation system parameters

仿真参数	数值	仿真参数	数值
PET 额定容量/(MV·A)	1.5	PET 额定 AC 电压/kV	10
PET 额定 DC 电压/V	750	PET 桥臂滤波电感/H	0.02
每桥臂子模块级联数 N	5	HB 稳压电容/ μ F	3000
高频变压器变比	2.53	DAB 输出电容/ μ F	4000

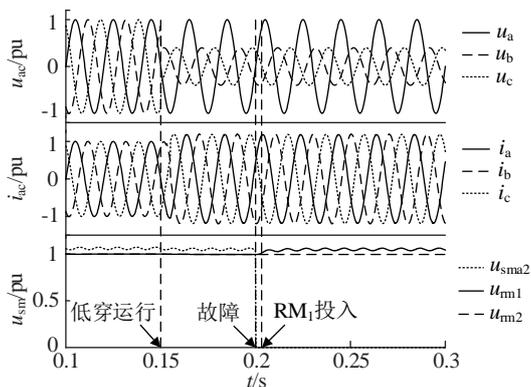
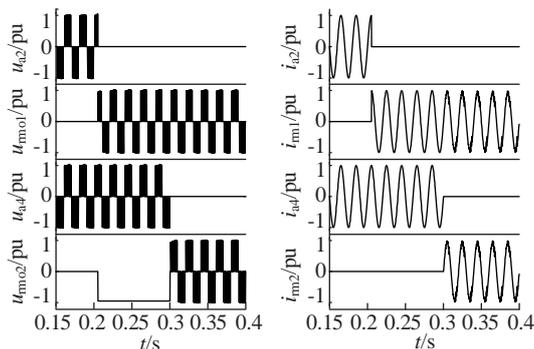


图 A6 低电压穿越运行条件下冗余结构功能

Fig.A6 Redundant module function under low voltage ride through operating conditions



(a) 子模块端口电压

(b) 子模块端口电流

图 A7 同相双子模块故障下子模块端口电压及电流

Fig.A7 Voltage and current of SM port under dual-submodule fault in same phase

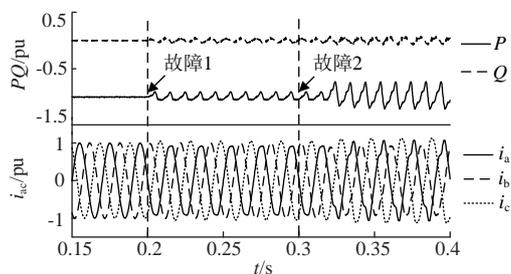


图 A8 无冗余条件下异相双子模块故障

Fig.A8 Dual-submodule fault in different phases without redundancy

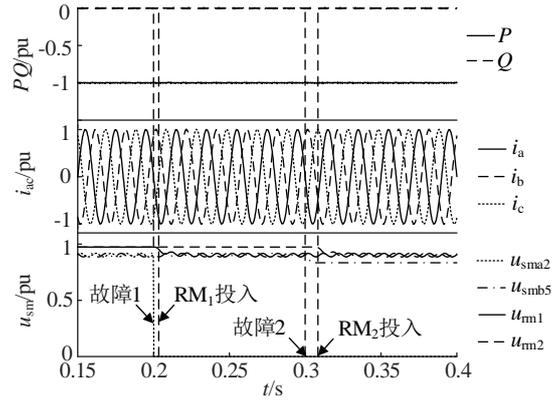
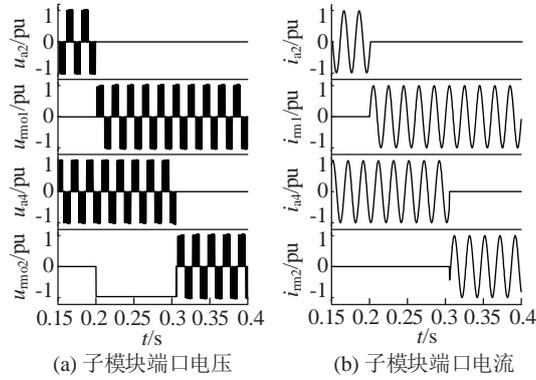


图 A9 异相双子模块故障下冗余子模块功能

Fig.A9 Dual-submodule fault in different phases with redundant structure



(a) 子模块端口电压

(b) 子模块端口电流

图 A10 异相双子模块故障下子模块端口电压及电流

Fig.A10 Voltage and current of SM port under dual-submodule fault in different phases