

兼容多种交流供电制式的不间断电源研究

石学雷

(厦门大学嘉庚学院 机电工程与自动化学院,福建 漳州 363105)

摘要:在“源随荷动”的电网调度模式下,市场存在不同交流供电制式的需求。为满足市场需求,设计了一种兼容多种交流供电制式的不间断电源系统。系统中通过切换装置进行制式选择,根据选定的制式进行不同的驱动控制,从而实现多种交流供电制式的兼容。为提高不间断电源系统的可靠性,还提出了一种制式兼容的容错机制。最后通过一台40 kV·A/36 kW样机进行实验,结果表明该系统能够兼容多种交流供电制式,验证了设计的正确性。

关键词:交流制式兼容;制式检测;不间断电源

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25371

Research on an Uninterruptible Power Supply System Compatible with Various AC Power Supply Modes

SHI Xuelei

(School of Mechanical and Electrical Engineering & Automation, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, Fujian, China)

Abstract: Under the power grid dispatch mode of "source follows load", different AC power supply modes are required in the market. To meet market demand, an uninterruptible power supply (UPS) system compatible with various AC power supply modes was designed. The modes of the system were selected by switching devices. According to the selected mode, different methods of driving control were carried out, and thus the compatibility of various AC power supply modes was realized. To improve the reliability of uninterruptible power supply, a fault-tolerant mechanism with compatible modes was also proposed. Finally, an experiment was conducted on a 40 kV·A/36 kW prototype. Experimental results demonstrate that the system can be compatible with various AC power supply modes, by which the correctness of the design was verified.

Key words: AC mode compatibility; standard detection; uninterrupted power supply (UPS)

当前电网调度基本采用“源随荷动、只调整集中式发电”的传统高度模式,负荷和储能未纳入调度范畴。随着新能源和直流的快速发展,以及储能等新技术的不断涌现,电网特性日趋复杂,传统“源随荷动”的调度模式已难以为继,面临一系列问题^[1]。

“源”中除了传统火电、抽蓄、核电等常规电源信息接入,还增加了集中式、分布式风电、光伏、虚拟电厂等能源。随着分布式能源渗透率的不断攀升,现有的电网调控法对小容量的分布式能源进行统一控制和调度,分布式能源发电的间歇性、波动性对电力系统的供需实时平衡控制带来巨大挑战。因此,微电网技术及其应用迎来了

蓬勃发展的重大机遇,其中,单三相混联结构微电网群因其在低压侧、用户侧通过多个单相和三相微电网的互联互通,以运行方式灵活、促进资源优化配置的优势成为微电网群系统发展的主流模式之一^[2]。

“荷”中除了电网、居民用电负荷,还将电动汽车、负载聚合商、智能楼宇、非工空调、工业大用户等多种负荷资源接入监控聚合。随着科学技术的发展,农村、牧区及电气化铁路沿线等单相供电地区存在将单相电转供为三相电的需求^[3]。因此,市场上存在不同交流制式的“源”,以及在不同交流制式工作下的“荷”。

不间断电源(uninterrupted power supply, UPS)

作为一种保障供电可靠性、抑制电压暂降的重要手段,其在精密加工、半导体制造、数据中心等对电压暂降极为敏感的行业或者场合得到了广泛应用^[4]。目前UPS系统种类和功能繁多,特定的场合需要哪种类型和配置的UPS系统被广泛关注^[5]。

实际应用中,UPS系统共有4种工作制式:33制式(三相输入、三相输出)、31制式(三相输入、单相输出)、11制式(单相输入、单相输出)、13制式(单相输入、三相输出)。在不间断电源行业内,为满足不同客户的交流制式需求,需要开发对应的方案和产品,造成产品型号繁多,不利于客户选择,也不利于产品开发、生产以及维护。

文献[6]中,浙江万安亿创公司提出一种单/三相输入电压兼容的磁集成三相无桥PFC(power factor correction)方案,包含输入端磁集成变压器、三相无桥PFC拓扑结构和三个兼容不同输入的三极管,优点在于实现单/三相输入兼容,缺点在于磁集成变压器结构复杂,不易实现,推广性较差;文献[7]中,深圳威迈斯提出一种兼容单/三相交流电的充电控制电路,围绕三相电压型PWM整流器,在输入侧加入开关组及驱动模块,通过接触器的动作实现单相输入和三相输入的模式转换。该方案侧重点在于输入侧开关组的结构,整流模块仍然存在桥臂直通的问题,控制相对较复杂;文献[8]中,提出了一种利用继电器实现的兼容单/三相输入的VIENNA整流方案,通过连接在网侧及VIENNA整流电路主体部分之间的第一级检测模块、第二级切换模块与第三级兼容模块,利用三极管控制继电器动作,实现兼容不同供电制式的目的。缺点在于,提出通过第三级兼容模块的改进,实现单相输入下两路交错并联VIENNA电路的工作模式。单相模式下仅使用三相电路中的两路,单相模式下的输出功率小于三相模式下的输出功率,器件利用率低。

本文提出一种兼容单/三相交流制式的方案,特点在于各相电路独立工作、控制简单、容易实现、器件利用率高,且电路中桥臂不易共导,可靠性高。

1 系统设计原理

系统设计框图如图1所示,系统包括:输入制式切换装置100、三相交流-直流模块200、三相直流-交流模块300、输出制式切换装置400、三相旁

路模块500和旁路制式切换装置600。图1中, U, V, W, N 是旁路输入; A, B, C, N 是市电输入; A', B', C', N 是负载输出。输入制式切换装置100作用在于:控制三相交流-直流模块200的输入制式为三相或单相;输出制式切换装置400作用在于:控制三相直流-交流模块300的输出制式为三相或单相;旁路制式切换装置600作用在于:控制三相旁路模块500的输入制式与三相直流-交流模块300的输出制式相同。

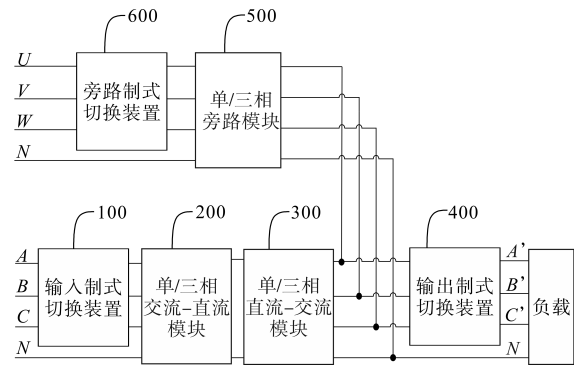


图1 系统设计框图

Fig.1 Design block diagram of system

1.1 单/三相交流-直流模块设计

单/三相交流-直流模块设计原理图如图2所示。

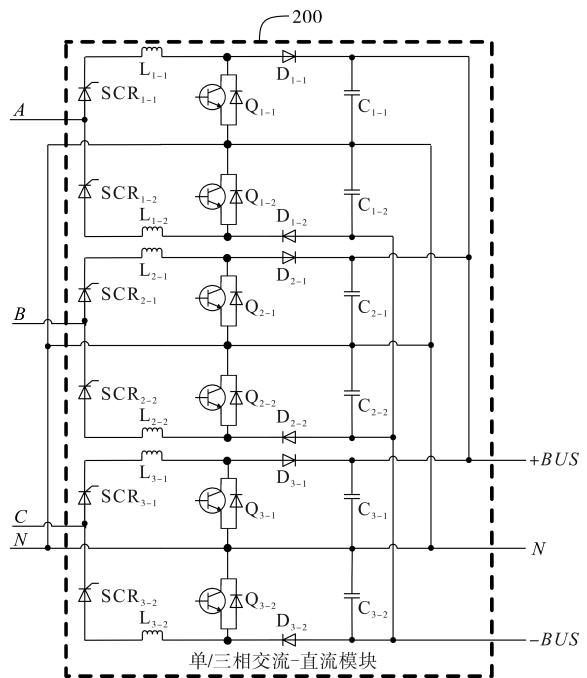


图2 单/三相交流-直流模块原理图

Fig.2 Schematic diagram of single/three-phase AC-DC module

图2中, A, B, C, N 为市电输入; $+BUS, N, -BUS$ 为交流-直流模块的输出。交流-直流模块由三路双Boost拓扑电路并联组成,每路电路独

立工作,控制简单。每路双 Boost 拓扑电路的工作原理如图 3 所示。

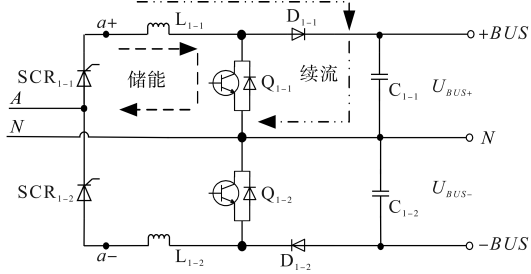


图3 单路交流-直流模块原理图

Fig.3 Schematic diagram of single circuit AC-DC module

市电供电时,三相进行独立 PFC 控制。以 A 相为例,当市电正弦波输入正半周时, Q_{1-1} 高频开关动作、 Q_{1-2} 常闭。 Q_{1-1} 开通时,电感储能; Q_{1-1} 关断时,电感给正母线续流充电。当市电正弦波输入负半周时, Q_{1-2} 高频开关动作、 Q_{1-1} 常闭。 Q_{1-2} 开通时,电感储能; Q_{1-2} 关断时,电感给负母线续流充电。具体控制驱动逻辑如图 4 所示。

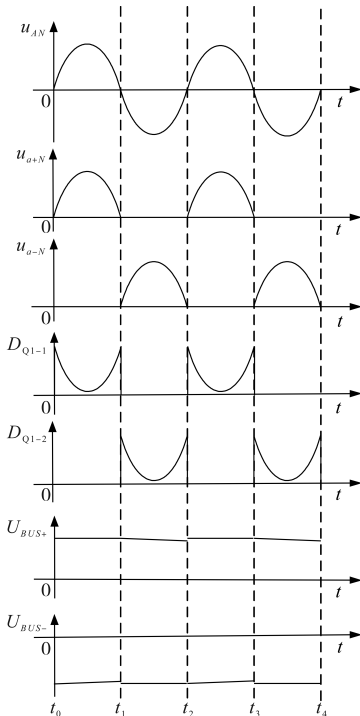


图4 单路交流-直流模块控制逻辑图

Fig.4 Control logic diagram of single circuit AC-DC module

图 4 中, u_{AN} 为图 3 电路中的 A 相市电输入电压, u_{a+N} 和 u_{a-N} 分别为 u_{AN} 整流后的正半周电压和负半周电压, D_{Q1-1} 和 D_{Q1-2} 为双 Boost 电路的 2 个升压主管 Q_{1-1} 和 Q_{1-2} 的驱动包络, U_{BUS+} 和 U_{BUS-} 分别为图 3 电路中输出侧的正母线电压和负母线电压。双 Boost 电路升压公式如下所示:

$$\begin{cases} U_{BUS+} = \frac{1}{1 - D_{Q1-1}} \cdot u_{a+N} \\ U_{BUS-} = -\frac{1}{1 - D_{Q2-1}} \cdot u_{a-N} \end{cases} \quad (1)$$

图 4 中,输入电压 u_{AN} 在波形过零点时,电压瞬时值最低, D_{Q1-1} 和 D_{Q1-2} 占空比最大; u_{AN} 在电压波形峰值时,电压瞬时值最高, D_{Q1-1} 和 D_{Q1-2} 占空比最小,因此升压驱动包络为倒正弦。在 t_0-t_1, t_2-t_3 期间,通过升压主管 Q_{1-1} 的驱动控制,使 U_{BUS+} 稳定在给定目标电压,在 t_1-t_2, t_3-t_4 期间, U_{BUS+} 由 C_{1-1} 供能;在 t_1-t_2, t_3-t_4 期间,通过升压主管 Q_{1-2} 的驱动控制,使 U_{BUS-} 稳定在给定目标电压,在 t_0-t_1, t_2-t_3 期间, U_{BUS-} 由 C_{1-2} 供能。

由于 Q_{1-1} 和 Q_{1-2} 分别工作于市电工频周期的正半周和负半周,只要设定 Q_{1-1} 和 Q_{1-2} 在市电正弦波过零点的死区,桥臂就不会发生共导现象。

不同输入制式时,交流-直流模块控制逻辑如图 5 所示。

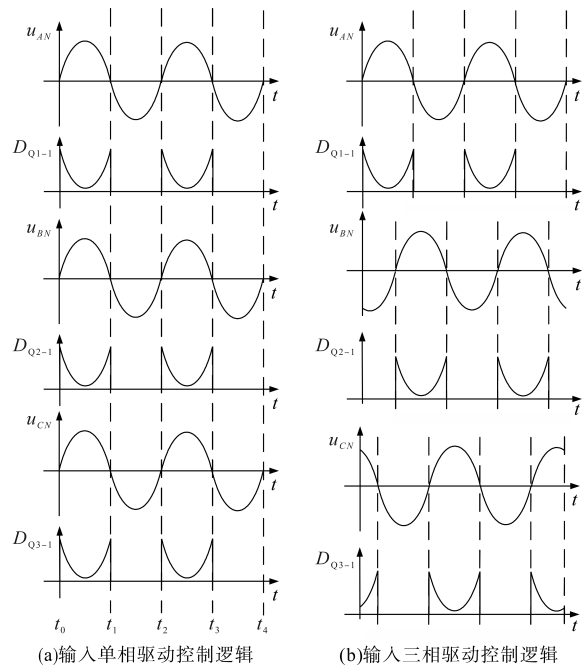


图5 不同输入制式时交流-直流模块控制逻辑图

Fig.5 Control logic diagram of AC-DC module under different input modes

市电输入制式为单相时,3路双 Boost 拓扑的驱动相位一致;市电输入制式为三相时,3路双 Boost 拓扑的驱动相位相差 120° 。

1.2 单/三相直流-交流模块设计

单/三相直流-交流模块设计原理图如图 6 所示。

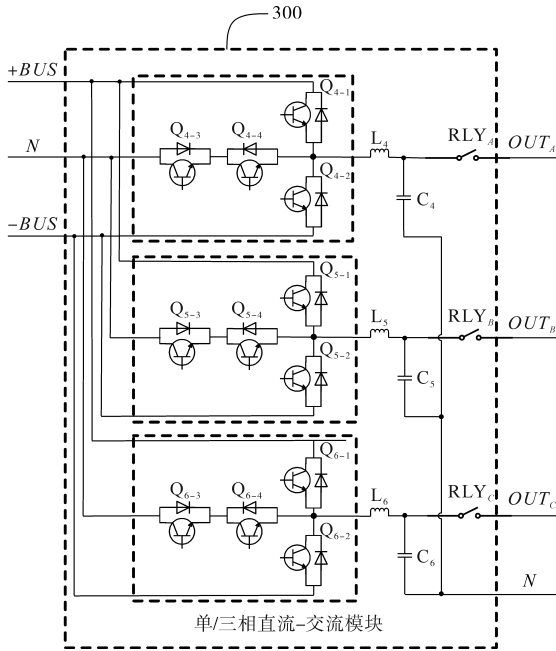


图6 单/三相直流-交流模块原理图

Fig.6 Schematic diagram of single/three-phase DC-AC module

图6中, +BUS, N, -BUS为母线输入, OUT_A , OUT_B , OUT_C 为直流-交流模块的输出。单/三相直流-交流模块也是由三路传统T型三电平电路拓扑组成,每路电路独立工作,控制简单。该T型三电平优点在于:器件少、效率高、控制简单、可靠性高^[9],本设计中无创新,在此不再赘述。

不同输出制式时,单/三相直流-交流模块控制逻辑如图7所示。输出制式为单相时,3路双Boost拓扑的驱动相位一致;输出制式为三相时,3

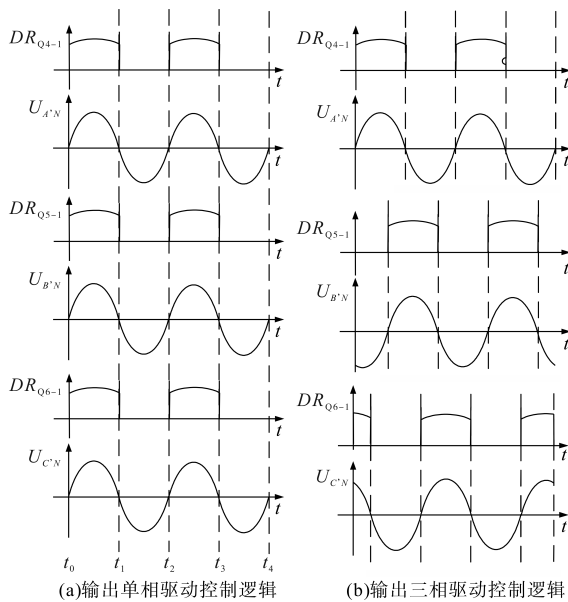


图7 不同输出制式时直流-交流模块控制逻辑图

Fig.7 Control logic diagram of DC-AC module under different output modes

路双Boost拓扑的驱动相位相差 120° 。

1.3 单/三相旁路模块设计

单/三相旁路模块设计原理图如图8所示。

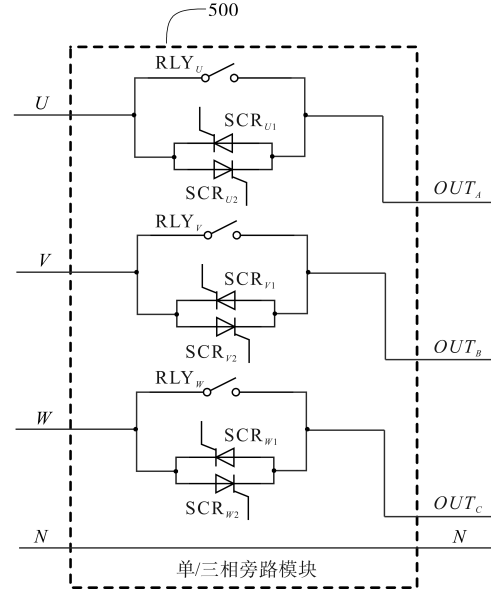


图8 单/三相旁路模块原理图

Fig.8 Schematic diagram of single/three-phase bypass module

旁路模块由继电器和晶闸管 (silicon controlled rectifier, SCR) 组成,旁路供能时,继电器闭合;逆变供能时,继电器断开。在旁路与逆变切换过程中,SCR工作,以补偿切换过程中继电器切换的动作时间。

1.4 系统制式切换装置模块设计

制式切换装置原理图如图9所示。

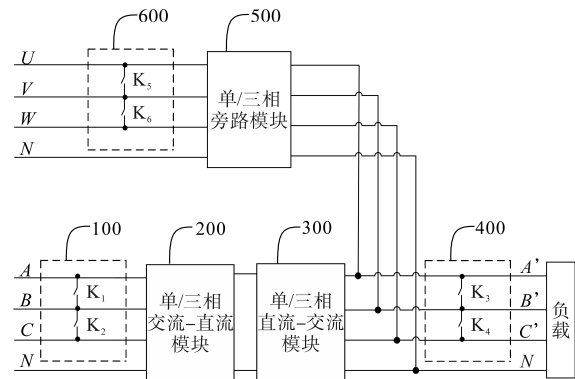


图9 制式切换装置原理图

Fig.9 Schematic diagram of the switching device

输入制式切换装置由开关 K_1 和 K_2 组成;输出制式切换装置由开关 K_3 和 K_4 组成;旁路制式切换装置由开关 K_5 和 K_6 组成。

市电输入制式为单相时, K_1 和 K_2 闭合;市电输入制式为三相时, K_1 和 K_2 断开。旁路输入制式为单相时, K_5 和 K_6 闭合;旁路输入制式为三相时, K_5 和 K_6 断开。负载输出制式为单相时, K_3 和 K_4 闭

合;负载输出制式为三相时, K_3 和 K_4 断开。不间断电源行业中,旁路制式应与输出制式一致,否则,单相交流电与三相交流电连接会产生大电流,可能导致系统损坏。

在市场应用中,单相制式交流电接入系统时,通常在UPS系统的接线排处接入两根输入线,即1根火线、1根零线;三相制式交流电接入系统时,通常在UPS系统的接线排处接入4根输入线,即3根火线和1根零线。同理,输出负载为单相制式时,在系统接线排处接入2根线;输出负载为三相制式时,在系统接线排处接入4根线。

系统设计中,接线排制式接入默认有4个输入接口,分别接入3根火线和1根零线。当现场制式为三相制式时,直接在输入接口对应接入4根线即可;当现场制式为单相制式时,采用1个连接片先短接系统接线排处的3根火线输入接口,再接入现场的1根火线输入。采用连接片替代图9中的开关($K_1\sim K_6$),这样既方便接线,同时也提高了UPS系统功率密度、降低了系统成本。另外,现场接线时要保证旁路制式与输出制式一致。

2 制式控制逻辑设计

根据应用现场,在接线排上使用连接片的方式,确定机器的市电输入制式、旁路输入制式、输出制式,与现场应用的交流制式一致。

2.1 单/三相制式检测设计

单/三相制式检测过程如下:

1)制式确定后机器上电,首先检测旁路电压输入(u_{UN}, u_{VN}, u_{WN})和市电输入(u_{AN}, u_{BN}, u_{CN})的幅值、频率是否正常。若检测异常,则重新检测接线是否正确;若检测正常,则进行下一步。

2)检测旁路和市电输入电压其中任一相过零点位置,并在过零点位置计算该相与其它两相间的电压差值,如图10所示。判断计算得到的电压差值的绝对值是否小于阈值,若是,则判定输入为单相接线输入;若否,则判定输入为三相接线输入。其中,阈值的设定要综合考虑检测到的过零点偏差,设计阈值为40V。

完成旁路和市电的检测制式后,因输出制式与旁路制式一致,因此可以确定系统的交流供电制式。如经检测旁路为单相制式,市电为三相制式,系统的交流供电制式为3 ϕ 1制式。

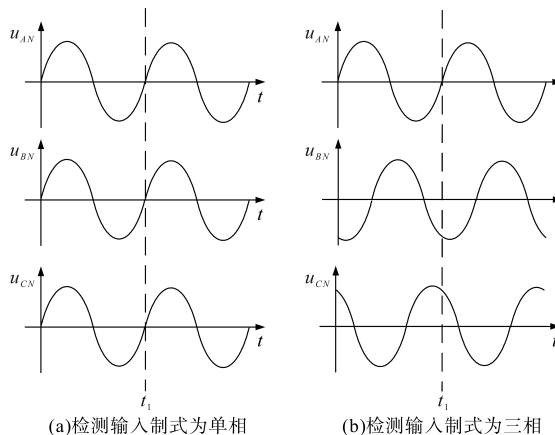


图10 输入制式检测原理

Fig.10 Detection principle of the input mode

2.2 单/三相制式的控制实现

2.2.1 单相制式的控制实现

1)输入单相制式的控制实现。当检测市电输入为单相制式后,控制3路双Boost拓扑的驱动相位一致,此时交流-直流模块为3路双Boost电路并联,完成输入单相制式下的交流-直流功能。

2)输出单相制式的控制实现。当检测旁路输入为单相制式后,控制3路T型三电平拓扑的驱动相位一致,此时直流-交流模块为3路T型三电平电路并联,完成输出单相制式下的直流-交流功能。

2.2.2 三相制式的控制实现

1)输入三相制式的控制实现。当检测市电输入为三相制式后,3路双Boost拓扑的驱动相位相差 120° ,3路驱动占空比独立控制,完成输入三相制式的直流-交流功能。

2)输出三相制式的控制实现。当检测旁路输入为三相制式后,3路T型三电平拓扑的驱动相位相差 120° ,3路驱动占空比独立控制,完成三相制式的直流-交流功能。

2.3 制式兼容容错设计

为保证机器能够在旁路与逆变间切换,旁路制式必须与输出制式一致,否则会导致系统损坏。现场接线为人工接线,存在旁路制式与输出制式不一致的情况发生:如旁路制式接成三相制式,输出制式接成单相制式,系统运行后在切换过程中会产生大电流。为避免这种情况发生,设计了一种制式兼容容错策略,具体如下:

1)现场系统接线完成后,系统上电;

2)市电上电后,控制交流-直流模块的三相PFC电路任一相电路进行升压,系统默认此时控

制A相PFC升压;

3)升压完成后,控制直流-交流模块的三相T型任一相电路进行逆变,系统默认此时控制A相T型三电平进行逆变;

4)控制图6的输出继电器 RLY_A, RLY_B, RLY_C 闭合,对此时的输出电压进行检测,如图11所示。检测此时的A相输出峰值电压,在A相峰值电压处,计算该相与其它两相间的电压差值。判断计算得到电压差值的绝对值是否小于阈值,若是,则判定实际输出接入的是单相制式;若否,则判定实际输出接入的是三相制式。综合考虑检测到的峰值点偏差,设计阈值为40V;

5)检测到的输出制式与之前检测到的旁路制式进行比较。如果制式一致,则系统进入正常模式进行升压逆变;如果制式不一致,系统报警,对系统接线排进行接线检查。

通过以上制式兼容容错策略,可保证旁路制式与输出制式一致,避免因旁路制式与输出不一致导致机器损坏,提高了产品的可靠性。

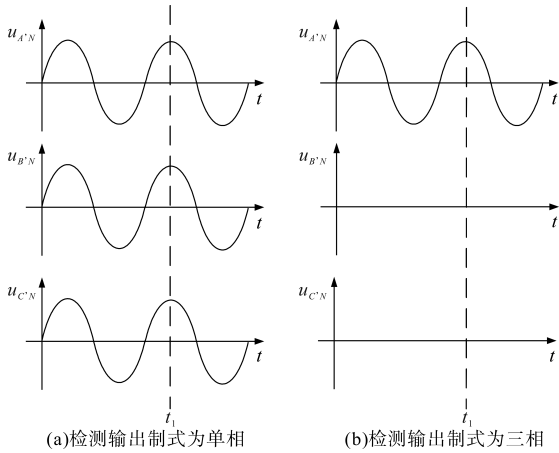


图11 输出制式检测原理

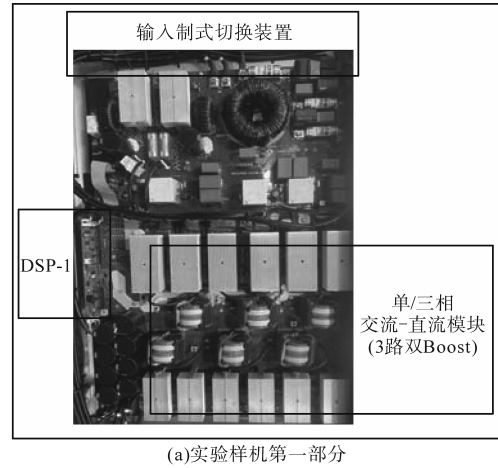
Fig.11 Detection principle of the output mode

3 实验验证

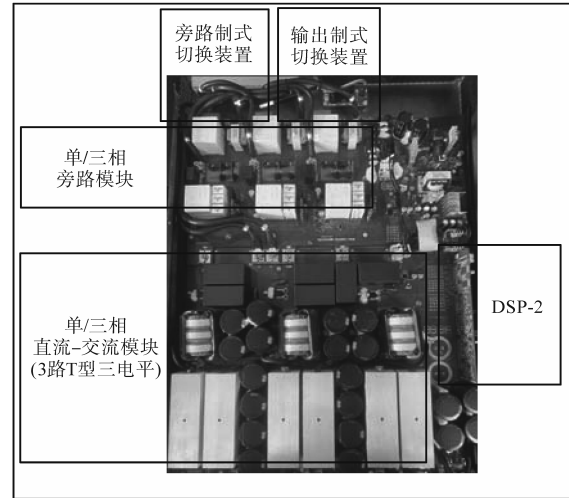
3.1 样机详细参数

为进一步验证设计的正确性,研制了一台40kV·A/36kW样机。研制的样机分为2部分,如图12a和图12b所示。图12a是实验样机的第一部分,由输入制式切换装置和单/三相交流-直流模块组成;图12b是实验样机的第二部分,由旁路制式切换装置、输出制式切换装置、单/三相旁路模块和单/三相直流-交流模块组成。

样机主控芯片采用2片TMS320F28335,分别作为实验样机第一部分和第二部分的控制芯片,



(a)实验样机第一部分



(b)实验样机第二部分

图12 实验样机平台

Fig.12 Experimental prototype platform

双Boost拓扑电路、T型三电平拓扑电路主功率管采用IGBT,开关频率均为19.2kHz。具体参数为:双Boost电感 $L_{1-1}=L_{1-2}=L_{2-1}=L_{2-2}=L_{3-1}=L_{3-2}=96\mu\text{H}$,输出电容 $C_{1-1}=C_{1-2}=C_{2-1}=C_{2-2}=C_{3-1}=C_{3-2}=3280\mu\text{F}$;T型三电平逆变器电感 $L_4=L_5=L_6=125\mu\text{H}$,输出电容 $C_4=C_5=C_6=60\mu\text{F}$ 。

3.2 样机功能验证

3.2.1 制式容错机制验证

为了验证制式容错机制的正确性,使样机分别处于旁路、输出接入制式一致及接入制式不一致的环境中进行实验。实际旁路和输出均接入三相制式,模拟制式一致;旁路接入三相制式、输出接入单相制式,模拟制式不一致。具体实验波形如图13、图14所示。

图13、图14中,mode-byp,mode-out分别表示旁路、输出接入的制式检测结果(检测变量分别为 M_1, M_2):低电平0V代表检测结果为三相制式,高电平3.3V代表检测结果为单相制式。mode-

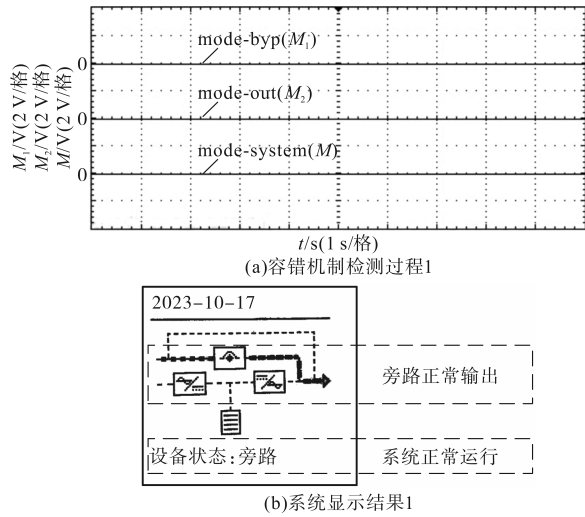


图13 制式一致时容错机制检测实现
Fig.13 The realization of fault-tolerant strategy when the modes are consistent

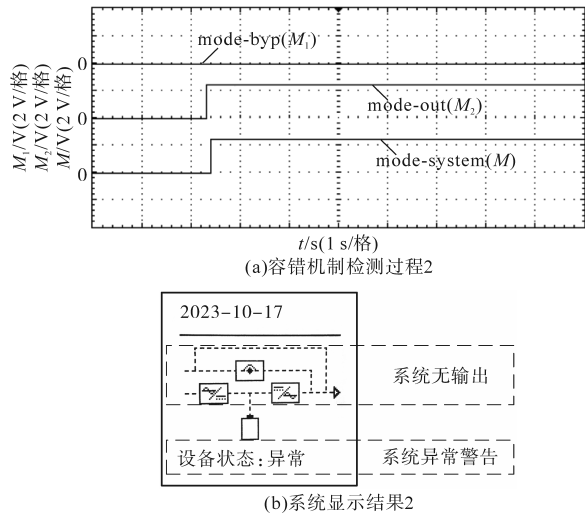


图14 制式不一致时容错机制检测实现
Fig.14 The realization of fault-tolerant strategy when the modes are inconsistent

system 表示系统根据容错机制判定的结果(检测变量为 M):低电平 0 V 代表系统判定制式一致,高电平 3.3 V 代表系统判定制式不一致。

图 13a 中, mode-byp, mode-out 检测信号均为低电平,检测结果为旁路及输出接入的制式均为三相制式。mode-system 检测信号为低电平,系统判定制式一致;图 13b 通过样机液晶,显示了系统的运行状态:旁路正常输出、系统正常运行。

图 14a 中, mode-byp 检测信号为低电平,检测结果为旁路接入的制式为三相。系统上电后, mode-out 检测信号由低电平翻转为高电平,检测结果为输出接入的制式为单相。mode-system 检测信号为高电平,则系统判定制式不一致;图 14b 通过样机液晶,显示了系统状态:系统无输出、系

统状态异常。

以上介绍了容错机制的检测过程,通过样机液晶显示了系统的运行状态,验证了容错机制的正确性,实现了样机制式容错功能。

3.2.2 兼容多种交流制式功能验证

样机实验环境为:样机输入侧接入 230.0 V 交流电,样机输出接入阻性负载。在不同交流供电制式条件下,样机满载(负载 36 kW)工况运行,实验波形如图 15 所示。

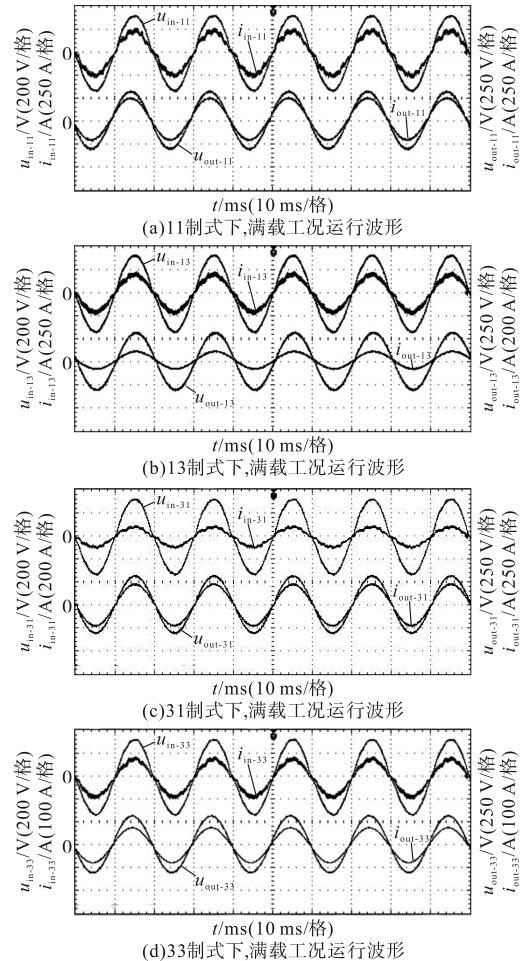


图15 不同交流制式下的样机满载运行波形图

Fig.15 Waveforms of full load under different AC modes

图 15a 中, u_{in-11}, i_{in-11} 为 11 制式下的输入电压和输入电流波形; u_{out-11}, i_{out-11} 为 11 制式下的输出电压和输出电流波形。由波形可知, 11 制式下样机满载运行, 输入电压 u_{in-11} 有效值为 230.0 V, 输入总电流 i_{in-11} 有效值为 167.1 A; 输出电压 u_{out-11} 为 220.0 V, 输出总电流 i_{out-11} 有效值为 164.7 A。实验样机实现了 11 制式功能, 满载效率为 94.3%。

图 15b 中, u_{in-13}, i_{in-13} 为 13 制式下的输入电压和输入电流波形; u_{out-13}, i_{out-13} 为 13 制式下输出电压和单相输出电流波形。由波形可知, 13 制式下样

机输入电压 u_{in-13} 有效值为 230.0 V, 输入总电流 i_{in-13} 有效值为 166.9 A; 输出电压 u_{out-13} 有效值为 220.0 V, 输出单相电流 i_{out-13} 有效值为 55.3 A。实验样机实现了 13 制式功能, 满载效率为 95.1%。

图 15c 中, u_{in-31}, i_{in-31} 为 31 制式下三相输入中的单相输入电压和输入电流波形; u_{out-31}, i_{out-31} 为 31 制式下的输出电压和输出电流波形。由波形可知, 31 制式下样机单相输入电压 u_{in-31} 有效值为 230.0 V, 单相输入电流 i_{in-31} 有效值为 55.9 A; 输出电压 u_{out-31} 有效值为 220.0 V, 总输出电流 i_{out-31} 有效值为 165.6 A。实验样机实现了 31 制式功能, 满载效率为 94.5%。

图 15d 中, u_{in-33}, i_{in-33} 为 33 制式下三相输入的单相输入电压和单相输入电流波形; u_{out-33}, i_{out-33} 为三相输出的单相输出电压和单相输出电流。由波形可知, 33 制式下单相输入电压 u_{in-33} 有效值为 230.0 V, 单相输入电流 i_{in-33} 有效值为 55.6 A; 单相输出电压 u_{out-33} 有效值为 220.0 V, 单相输出电流 i_{out-33} 有效值为 55.4 A, 实验样机实现了 33 制式功能, 满载效率为 95.3%。

4 结论

本文针对“源随荷动”调度模式下不同交流制式的的市场需求, 对 UPS 系统各模块的工作原理、多种交流制式的检测、制式兼容下的容错策略进行了研究和分析, 研究结论如下:

1) 提出的多种交流制式检测及容错设计, 有效地解决了多种制式兼容的问题, 并通过实验样机进行了验证。

2) 拓扑中的 PFC 电路和 INV 电路, 磁件结构简单, 易实现和推广。

3) 提出的 UPS 拓扑结构中, PFC 采用双 Boost 拓扑, 上、下桥臂不易共导, 可靠性高; PFC 电路和 INV 电路中, 每相电路独立工作, 控制简单。

4) 单相工作模式和三相工作模式下, 每个功率电路都在进行能量转换, 2 个工作模式下的 UPS 系统都可输出较高功率, 器件利用率高。

参考文献

[1] 孙惠, 翟海保, 吴鑫. 源网荷储多元协调控制系统的研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3264-3271.

SUN Hui, ZHAI Haibao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control of generation, network, load and storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271.

[2] 刘泽健. 孤岛型单三相混联结构微电网群协同优化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

LIU Zejian. Research on coordinated optimization control of isolated microgrid cluster with single-phase/three-phase hybrid architecture[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[3] 王心仪. 计及光伏接入的新型单/三相变换系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

WANG Xinyi. Research on new single-phase to three-phase conversion system with photovoltaic access[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[4] 蔡久青, 陈昌松, 段善旭, 等. 模块化不间断电源自适应均流控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 153-159.

CAI Jiuqing, CHEN Changsong, DUAN Shanxu, et al. Adaptive current-sharing control technique for modular uninterruptible power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 153-159.

[5] 肖龙. 不间断电源系统选型及其性能评估[J]. 电气技术, 2020, 21(1): 117-120, 125.

XIAO Long. Uninterruptible power supply system selection and performance evaluation[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(1): 117-120, 125.

[6] 杨国勋, 寇秋林, 罗嗣锦. 单三相输入电压兼容的磁集成无桥功率因数装置: 中国, CN110190742A[P]. 2019-08-30.

YANG Guoxun, KOU Qiulin, LUO Sijin. A magnetic integrated bridge less power factor device compatible with single three-phase input voltage: China, CN110190742A[P]. 2019-08-30.

[7] 刘钧, 冯颖颖, 姚顺, 等. 兼容单相三相交流电的充电控制电路: 中国, CN107947309A[P]. 2018-04-20.

LIU Jun, FENG Yingying, YAO Shun, et al. Charging control circuit compatible with single-phase three-phase AC power: China, CN107947309A[P]. 2018-04-20.

[8] 周胜钰. 单/三相兼容 VIENNA 整流器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

ZHOU Shengyu. Research on single and three-phase compatible VIENNA rectifier[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[9] 郝冠斐. 隔离型三相 T 型三电平双向功率变换器控制策略研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.

HAO Guanfei. Research on control strategy of isolated three-phase T-type three-level bidirectional power converter[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

收稿日期: 2023-09-10

修改稿日期: 2023-10-22