(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2017 年 2 月 16 日 (16.02.2017)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2017/024596 A1

(51) 国际专利分类号:
H02P 21/12 (2016.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2015/086955

(22) 国际申请日: 2015 年 8 月 14 日 (14.08.2015)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201510478313.2 2015 年 8 月 7 日 (07.08.2015) CN

(71) 申请人: **东北大学 (NORTHEASTERN UNIVERSITY)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **沈阳工业大学 (SHENYANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市经济技术开发区沈辽西路 111 号, Liaoning 110178 (CN)。

(72) 发明人: **张化光 (ZHANG, Huaguang)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **闫士杰 (YAN, Shijie)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **张炳义 (ZHANG, Bingyi)**; 中国辽宁省沈阳市经济技术开发区沈辽西路 111 号, Liaoning 110178 (CN)。 **闫伟航 (YAN, Weihang)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **王旭 (WANG, Xu)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **刘秀翀 (LIU, Xiuchong)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **褚恩辉 (CHU, Enhui)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。 **许晓敏 (XU, Xiaomin)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。

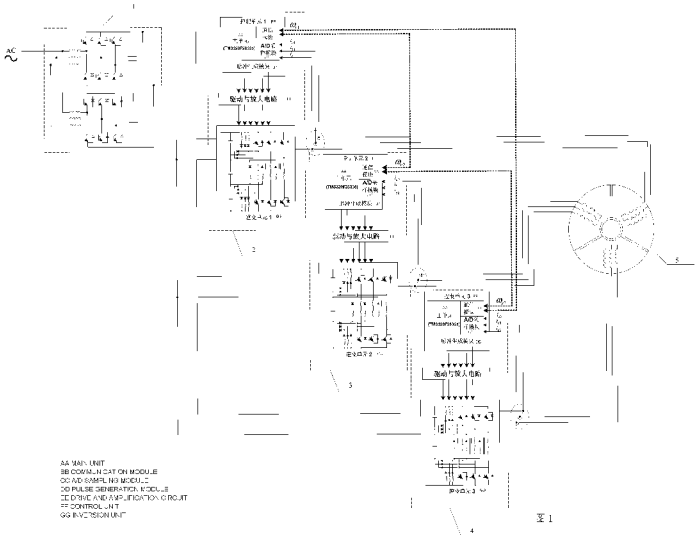
(74) 代理人: **沈阳东大知识产权代理有限公司 (SHENYANG DONGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD)**; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号, Liaoning 110819 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR,

[见续页]

(54) **Title**: INTELLIGENT COOPERATIVE CONTROL SYSTEM AND METHOD FOR MULTI-UNIT PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

(54) **发明名称** : 一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统及方法



(57) **Abstract**: An intelligent cooperative control system for a multi-unit permanent magnet synchronous motor, comprising a double parallel PWM rectification circuit (1), a first permanent magnet motor cooperative control unit (2), a second permanent magnet motor cooperative control unit (3), a third permanent magnet motor cooperative control unit (4) and a multi-unit permanent magnet synchronous motor (5), wherein the first permanent magnet motor cooperative control unit (2), the second permanent magnet motor cooperative control unit (3) and the third permanent magnet motor cooperative control unit (4) cooperatively control three stator units of the multi-unit permanent magnet synchronous motor (5) in a parallel connection manner. By means of the system, the problems of energy loss and reactive power loss of a hard switching circuit in a large power electric drive system can be solved, the problems of multi-unit cooperative control and fault tolerant control can be solved, the problems of difficult motor installation, transport and maintenance can be solved, the total energy is optimized, and the purpose of improving the utilization efficiency of the electric energy is achieved.

(57) **摘要**:

[见续页]

WO 2017/024596 A1

CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) **指定国** (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

— 关于申请人有权申请并被授予专利(细则 4.17(ii))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

— 包括经修改的权利要求及声明(条约第 19 条(1))。

一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统，包括双并联 PWM 整流电路（1）、第一永磁电机协同控制单元（2）、第二永磁电机协同控制单元（3）、第三永磁电机协同控制单元（4）和多单元永磁同步电机（5），第一永磁电机协同控制单元（2）、第二永磁电机协同控制单元（3）和第三永磁电机协同控制单元（4）通过并联连接的方式协同控制多单元永磁同步电机（5）的三个定子单元。上述系统能够解决大功率电气传动系统中硬开关电路能量损耗和无功损耗问题、解决多单元协调控制和容错控制问题、解决电机安装运输和维护困难问题、实现优化整体能量、实现提高电能的利用效率的目的。

一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统及方法

技术领域

本发明属于电力电子与电力传动技术领域，具体涉及一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统及方法。

背景技术

大功率电气传动系统在工业生产中占有重要的地位，广泛应用于大型矿井提升、大型船舶主推进、兆瓦级风力发电等方面。目前，现有的大功率电气传动系统存在很多问题，主要为：在系统结构方面，大功率电气传动系统多采用单一支路结构，电压等级高，系统无冗余，可靠性低。在整流方面，系统整流部分多采用不可控整流模式，功率因数较低，存在较大的无功功率传输损耗，在不平衡供电网络环境下易产生低频次谐波，难以实现无功功率的优化控制。在逆变方面，系统逆变部分多采用硬开关工作模式，存在大量的开关损耗，特别是在功率器件开关频率增大和功率增大时更为突出。在电机控制方面， 多采用机械传感器来检测电机转子位置，系统成本高，可靠性低，维护工作量大。在电机制造方面，传统永磁电机定子制造多采用整体加工方法，带来高压电机制造、运输、安装和维护困难，变频器成本高、可靠性低等问题。

发明内容

针对现有技术的不足，本发明提出一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统及方法，以解决大功率电气传动系统中硬开关电路能量损耗和无功损耗问题、解决多单元协调控制和容错控制问题、解决电机安装运输和维护困难问题、实现优化整体能量、实现提高电能的利用效率的目的。

一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统，包括双并联 PWM 整流电路，还包括第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元、第三永磁电机协同控制单元和多单元永磁同步电机，其中，第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元通过并联连接的方式协调控制多单元永磁同步电机的三个定子单元。

所述的第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元结构相同，均包括驱动与放大电路、控制单元和逆变单元，所述的控制单元通过相互通信实现多单元永磁同步电机的协同控制。

所述的控制单元包括分布式协同控制器和电流控制与速度估算单元，其中，

电流控制与速度估算单元：

用于采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，根据采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，获得的转子速度估计值同时发送至每个控制单元的分布式协同控制器中；并

接收分布式协同控制器的输出值，根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号，将获得的 PWM 信号通过驱动与放大电路发送至逆变单元中；

分布式协同控制器：

用于采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述，根据所构建的无向图获得各个控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、设置的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数，设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，求得分布式协同控制器的输出值。

所述的多单元永磁同步电机，其定子为 27 槽 30 极分瓣式结构，每单元为 9 槽 10 极，各定子单元共享一个转子；其转子为永磁内置切向式；每单元电机绕组采用节距为 1 的双层分数槽绕组，各单元电机内部绕组采用星形连接方式。

采用多单元永磁同步电机智能协同控制系统进行的控制方法，包括以下步骤：

步骤 1、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号；

步骤 2、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时根据所采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，协调控制获得 PWM 信号；

步骤 3、根据 PWM 信号改变输出定子电压的频率和幅值，实现各单元电机转速的协同控制。

步骤 2 所述的协调控制，包括以下步骤：

步骤 2-1、根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得转子速度估计值，并同时发送至每个控制单元中实现三个控制单元的相互通信；

步骤 2-2、采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述；

步骤 2-3、根据所构建的无向图获得控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、用户设定的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数；

步骤 2-4、设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，获得输出值；

步骤 2-5、根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号。

步骤 2-1 所述的根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得的转子速度估计值，包括以下步骤：

步骤 2-1-1、将接收到的电流检测信号进行模数转换，并根据转子初始相角值对转换后的 A 相、B 相、C 相电流信号进行 Clark 坐标变换和 Park 坐标变换，获得两相旋转坐标系下的

直轴电流和交轴电流；

步骤 2-1-2、将交轴电流通过带通滤波处理获得交轴电流高频分量，将上述交轴电流高频分量与正弦高频信号相乘，获得可分离相角误差信号交轴电流高频分量，并将其通过低通滤波处理获得仅含相角误差的电流信号；

步骤 2-1-3、采用 PI 控制算法获得转子速度估计值，将上述转子速度估计值通过积分运算获得转子相角估计值。

步骤 2-3 所述的通信关联矩阵为对称矩阵，该矩阵的行数和列数均为 3，矩阵中的元素取值为 0 或 1，当控制单元两两之间能够通信时，元素值为 1，否则为 0；所述的误差函数为：某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，加上该控制单元转子速度估计值与设定的转子给定速度值之间差值乘以系数；所述的某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，该系数为通信关联矩阵中的元素。

步骤 2-4 所述的输出值，求解方式为：误差函数乘以实数矩阵和实数项，再与设定的转子给定速度值求和；所述的实数矩阵为一个1×2的实数向量。

步骤 2-5 所述的根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，包括以下步骤：

步骤 2-5-1、将输出值作为交轴电流参考量；

步骤 2-5-2、将获得的直轴电流和交轴电流通过低通滤波处理获得基波直轴电流和基波交轴电流；

步骤 2-5-3、将基波交轴电流与交轴电流参考量比较作差，获得交轴电流误差值，将基波直轴电流与直轴电流参考量比较作差，获得直轴电流误差值；

步骤 2-5-4、采用 PI 控制算法分别对交轴电流误差值和直轴电流误差值进行计算，获得交轴电压参考值和直轴电压参考值，并将直轴电压参考值与高频电压信号值求和，获得含高频信号的直轴电压参考值；

步骤 2-5-5、根据电机转子相角估计值，对交轴电压参考值和含高频信号的直轴电压参考值进行 Park 反坐标变换，获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号。

本发明优点：

本发明一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统，本发明采用低压多永磁电机协同控制单元并联结构，实现低压大功率、低速大转矩控制和系统冗余控制；在整流方面，采用双

并联 PWM 整流电路结构，当系统处于不平衡供电网络环境下，两组 PWM 整流器分别用于控制正、负序电流，通过对正、负序电流的闭环控制，减小了无功损耗和谐波损耗；逆变单元采用谐振极型三相软开关逆变电路，提高了直流母线电压的利用率，在高频时大大减小器件的开关损耗；在永磁电机控制方面采用电流控制与速度估算单元，能够准确估算出转子的速度和相角信息，成本低且可靠性高；被控对象为多单元永磁同步电机，解决大功率电气传动系统中电机安装、运输和维护困难等问题。

附图说明

图 1 为本发明一种实施例的多单元永磁同步电机智能协同控制系统结构框图；

图 2 为本发明一种实施例的双并联 PWM 整流电路原理图；

图 3 为本发明一种实施例的第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元内部结构框图；

图 4 为本发明一种实施例的谐振极型软开关逆变电路图；

图 5 为本发明一种实施例的控制单元内部结构示意图；

图 6 为本发明一种实施例的多单元永磁同步电机结构示意图；

图 7 为本发明一种实施例的 27 槽 30 极整体永磁电机与 9 槽 10 极单元永磁电机槽电势星型图，其中，图（a）为 27 槽 30 极整体永磁电机槽电势星型图，图（b）为 9 槽 10 极单元永磁电机槽电势星型图；

图 8 为本发明一种实施例的 27 槽 30 极多单元永磁同步电机绕组展开图；

图 9 为本发明一种实施例的采用多单元永磁同步电机智能协同控制方法流程图；

图 10 为本发明一种实施例的多单元永磁同步电机无传感器控制系统框图；

图 11 为本发明一种实施例的构建的无向图；

图 12 为本发明的一种实施例的各协同控制单元速度估算值曲线图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明一种实施例做进一步说明。

本发明实施例中多单元永磁同步电机智能协同控制系统，如图 1 所示，包括双并联 PWM 整流电路 1、第一永磁电机协同控制单元 2、第二永磁电机协同控制单元 3、第三永磁电机协同控制单元 4 和多单元永磁同步电机 5，其中，第一永磁电机协同控制单元 2、第二永磁电机协同控制单元 3 和第三永磁电机协同控制单元 4 通过并联连接的方式协调控制多单元永磁同步电机 5 的三个定子单元；

本发明实施例中，双并联 PWM 整流电路 1 用于将 380V 交流电转换为电压可调的直流电，其电路图如图 2 所示，采用两组三相电压型 PWM 整流器结构，以交流电源中性点为参考点，

建立正、负序电流分量与电网电压及有功功率的对应关系，通过正、负序瞬时有功分量和无功分量的解耦控制，并依据零序环流对电压低频分量的影响，补偿零序环流，形成正负序电流、电压及功率的一体化控制方案，解决了不平衡供电网络环境下并联 PWM 整流结构的控制难题；

本发明实施例中，第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元结构相同，如图 3 所示，均包括驱动与放大电路、控制单元和逆变单元，所述的控制单元通过相互通信实现多单元永磁同步电机的协同控制；

本发明实施例中，所述的控制单元以 TMS320F28335 型号的 DSP 为核心，外加通信模块、A/D 采样模块及脉冲生成模块，逆变单元采用谐振极型三相软开关逆变电路（见申请号为 200910010240.9 专利），如图 4 所示，三相电路中都分别具有各自的谐振电感，这一设计能够提高直流母线电压的利用率，减小器件的开关损耗，降低生产成本；

本发明实施例中，如图 5 所示，控制单元包括分布式协同控制器和电流控制与速度估算单元，其中，电流控制与速度估算单元用于采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，根据采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，获得的转子速度估计值同时发送至每个控制单元的分布式协同控制器中；并接收分布式协同控制器的输出值，根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号，将获得的 PWM 信号通过驱动与放大电路发送至逆变单元中；分布式协同控制器用于采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述，根据所构建的无向图获得各个控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、设置的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数，设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，求得分布式协同控制器的输出值。

本发明实施例中，采用节距为 1 的双层分数槽绕组结构的多单元永磁同步电机，极大地提高了电机的槽满率，更加适用于工业生产中机械型自动绕线，并且由于转子的极对数较多，在转子磁路采用了内置切向形式，这些都为多极少槽永磁同步电机的实现提供了可能。多单元永磁同步电机的结构示意图如图 6 所示，采用 27 槽 30 极的三相永磁同步电机；图中 Cell1 表示定子单元 1、Cell2 表示定子单元 2、Cell3 表示定子单元 3；

本发明实施例中，通过下面所述内容将其分为多单元模块永磁电机；

I　计算整体电机的拆分单元数及单元电机槽极数；

整体电机定子槽数 $Z=27$，转子极对数 $p=15$，它们的最大公约数 $t=3$；整体电机定子槽数与极对数的最大公约数即为可以分成的单元电机的个数；由此可知整体电机是由 3 个完

全相同的单元电机组成的，各单元均使用同一个转子，各单元电机内部仍然采用星型连接的方式；

各单元电机的槽数和极对数分别为：$Z_0 = Z/t = 9$， $p_0 = p/t = 5$； 因此得出，27 槽 30 极的三相永磁同步电机可以拆分成 3 单元 9 槽 10 极三相永磁同步电机；

II 确定整体电机及单元电机的槽电势星型图

计算槽距角 α 和每极每相槽数 q 分别为：

$$\alpha = \frac{180° \times 2p_0}{Z_0} = 200°，\quad q = \frac{Z_0}{2mp_0} = \frac{3}{10} = \frac{b}{c}；$$

其中，m 为电机定子绕组相数，b 和 c 分别为 q 的分子和分母；

再根据下面内容获得分数槽绕组的最佳排列方式：

①首先根据每极每相槽数 q，依次算出 iq 的值（$i = 1, 2, \cdots$），直至得出整数为止，其分别为 $\frac{3}{10}$，$\frac{3}{5}$，$\frac{9}{10}$，$\frac{6}{5}$，$\frac{3}{2}$，$\frac{9}{5}$，$\frac{21}{10}$，$\frac{12}{5}$，$\frac{27}{10}$，3；

②求取最优循环数列；

取 0 值作为第一个数，将上述求出的所有分数的整数部分加 1 依次排列在后，最后一个整数即取整数，其依次为 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3；再将所得数列中的后一项减去前一项，所得数列即为求取的最优循环数列，其为 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0；

③将最优循环数列重复多次，通常按照 60° 相带来划分，将绕组 *AcBaCb* 依次重复分配给最优循环数列，直至循环到起始状态；

1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0
A c B a C b A c B a C b A c B a C b A c B a C b A c B a C b

④将 1 下面的绕组取出，这一绕组序列即为分数槽绕组的第一层绕组，排列为：*AaACcCBbB*；

其中，a、b 和 c 代表将线圈反向嵌放；采用双层绕组时，将第一层绕组右移一个槽后取反向即可得到第二层绕组的排列；

最终得出 27 槽 30 极整体永磁电机及 9 槽 10 极单元永磁电机的槽电势星型图如图 7 中图（a）和图（b）所示；

III 画出单元电机的绕组展开图

规定顺时针方向为正方向，大写字母代表正方向，小写字母代表反方向，则 27 槽 30 极

多单元永磁同步电机绕组展开图如图 8 所示；

本发明实施例中，采用多单元永磁同步电机智能协同控制系统进行的控制方法，方法流程图如图 9 所示，包括以下步骤：

步骤 1、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号；

本发明实施例中，采用三个电流传感器同时采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流信号，并将电流信号发送至第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元中；

步骤 2、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时根据所采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，协调控制获得 PWM 信号，包括以下步骤：

本发明实施例中，图 10 为多单元永磁同步电机无传感器控制系统框图，结合图 10，以第一永磁电机协同控制单元内部控制过程为例，进行说明步骤 2 中协同控制的具体步骤：

步骤 2-1、根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号 i_{a1}、i_{b1}、i_{c1} 获得转子速度估计值 $\hat{\omega}_{r1}$，并同时发送至每个控制单元（第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元）中实现三个控制单元的相互通信；

步骤 2-1-1、将接收到的电流检测信号 i_{a1}、i_{b1}、i_{c1} 进行模数转换，并根据转子初始相角值对转换后的 A 相、B 相、C 相电流信号进行 Clark 坐标变换和 Park 坐标变换，获得两相旋转坐标系 $d-q$ 下的直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q；

本发明实施例中，初始时，采用第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元获得电机各单元内部定子绕组阻感值及转子初始相角值，设置转子给定速度值 ω^* 并注入高频电压信号值 $V_{inj}\cos\omega_h t$；

步骤 2-1-2、将交轴电流 i_q 通过带通滤波处理获得交轴电流高频分量 $\hat{i}_{qh}$，将上述交轴电流高频分量 $\hat{i}_{qh}$ 与正弦高频信号 $\sin\omega_h t$ 相乘，获得可分离相角误差信号交轴电流高频分量 $\hat{i}'_{qh}$，并将 $\hat{i}'_{qh}$ 通过低通滤波处理获得仅含相角误差的电流信号 ε；

具体计算公式如下：

$$\hat{i}_{qh} \approx \frac{2V_{inj}L_1 \sin\omega_h t}{\omega_h(L_1^2 - L_0^2)}\Delta\theta \tag{1}$$

$$\tilde{i}_{qh}^{\gamma}=\frac{V_{inj}L_1\Delta\theta}{\omega_h(L_1^2-L_0^2)}(1-\cos 2\omega_h t) \tag{2}$$

$$\varepsilon=\frac{V_{inj}L_1}{\omega_h(L_1^2-L_0^2)}\Delta\theta=K\Delta\theta \tag{3}$$

其中，V_{inj}表示注入高频电压信号的幅值，ω_h表示注入高频电压信号的频率；L_0表示半差电感，其值为q轴等效电感与d轴等效电感差值的一半；L_1表示平均电感，其值为q轴等效电感与d轴等效电感和值的一半；$\Delta\theta$表示相角误差信号；

步骤 2-1-3、采用 PI 控制算法获得转子速度估计值$\hat{\omega}_{r1}$，将上述转子速度估计值通过积分运算获得转子相角估计值$\hat{\theta}_1$；

步骤 2-2、采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述；

本发明实施例中，第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元均采用全双工通讯模式，因此采用无向图来对分布式控制器通信结构进行描述，如图 11 所示，将系统中第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元分别定义为三个节点v_1、v_2、v_3；

步骤 2-3、根据所构建的无向图获得控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、用户设定的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数；

建立无向图$G=(V,\varepsilon,\Lambda)$，其中$V=\{v_1,v_2,v_3\}$表示三个节点的集合，$\varepsilon\subseteq V\times V$代表图上所有边的集合，$\Lambda=[a_{ij}]\in R^{3\times3}$为无向图的邻接矩阵（控制单元整体的通信关联矩阵），$i,j=1,2,3$，a_{ij}为 0 或 1 值，Λ为3×3 的实数对称矩阵，当第i个节点能够接收到第j个节点的信息时，$a_{ij}=1$；否则$a_{ij}=0$，因各个节点并不自己构成信息环，所以$a_{ii}=0$；

系统的邻接矩阵为：

$$\Lambda=\begin{bmatrix}0 & a_{12} & a_{13}\\ a_{12} & 0 & a_{23}\\ a_{13} & a_{23} & 0\end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，Λ表示控制单元两两之间的通信关联矩阵，即为无向图的邻接矩阵；a_{ij}表示第i个控制单元与第j个控制单元之间的通信关系，当第i个控制单元能接收到第j个控制单元的信息时，$a_{ij}=1$，否则$a_{ij}=0$，$i,j=1,2,3$；

对于第 i 个节点，构建输出向量 $\omega_i=\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{ri}\\ \dot{\hat{\omega}}_{ri}\end{bmatrix}$，则误差可以写为：

$$e_i=\sum_{j=1}^{3}a_{ij}(\omega_i-\omega_j)+g_i(\omega_i-\omega_0) \tag{5}$$

矩阵 $\omega_i=\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{ri}\\ \dot{\hat{\omega}}_{ri}\end{bmatrix}$，$\hat{\omega}_{ri}$ 表示第 i 个控制单元获得的转子速度估计值，$\dot{\hat{\omega}}_{ri}$ 表示第 i 个控制单元获得的转子速度估计值的导数，矩阵 $\omega_0=\begin{bmatrix}\omega^*\\ \dot{\omega}^*\end{bmatrix}$，$\omega^*$ 表示转子给定速度值，$\dot{\omega}^*$ 表示转子给定速度值的导数，即为加速度，g_i 取值为 0 或 1，当第 i 个控制单元能接收到控制单元给定值 ω^* 时，$g_i=1$，否则 $g_i=0$。

则系统误差函数为：

$$\begin{cases}e_1=a_{12}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r1}-\hat{\omega}_{r2}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r1}-\dot{\hat{\omega}}_{r2}\end{bmatrix}+a_{13}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r1}-\hat{\omega}_{r3}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r1}-\dot{\hat{\omega}}_{r3}\end{bmatrix}+g_1\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r1}-\omega^*\\ \dot{\hat{\omega}}_{r1}-\dot{\omega}^*\end{bmatrix}\\ e_2=a_{12}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r2}-\hat{\omega}_{r1}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r2}-\dot{\hat{\omega}}_{r1}\end{bmatrix}+a_{23}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r2}-\hat{\omega}_{r3}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r2}-\dot{\hat{\omega}}_{r3}\end{bmatrix}+g_2\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r2}-\omega^*\\ \dot{\hat{\omega}}_{r2}-\dot{\omega}^*\end{bmatrix}\\ e_3=a_{13}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r3}-\hat{\omega}_{r1}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r3}-\dot{\hat{\omega}}_{r1}\end{bmatrix}+a_{23}\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r3}-\hat{\omega}_{r2}\\ \dot{\hat{\omega}}_{r3}-\dot{\hat{\omega}}_{r2}\end{bmatrix}+g_3\begin{bmatrix}\hat{\omega}_{r3}-\omega^*\\ \dot{\hat{\omega}}_{r3}-\dot{\omega}^*\end{bmatrix}\end{cases} \tag{6}$$

步骤 2-4、设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，获得输出值；

$$u_i=\omega^*+cKe_i \tag{7}$$

其中，u_i 表示第 i 个控制单元内部分布式协同控制器的输出值，c 为实数值，K 为一个 1×2 的实数向量；

所述的 $c\geq\frac{1}{\lambda_{\min}(\Lambda_G)}$，$\lambda_{\min}(\Lambda_G)$ 表示矩阵 Λ_G 的特征值最小值的实部，矩阵 Λ_G 为：

$$\Lambda_G=\begin{bmatrix}g_1+a_{12}+a_{13} & -a_{12} & -a_{13}\\ -a_{12} & g_2+a_{12}+a_{23} & -a_{23}\\ -a_{13} & -a_{23} & g_3+a_{13}+a_{23}\end{bmatrix} \tag{8}$$

所述的向量 K 计算步骤如下：

①建立性能指标函数 $J=\int(e_i^TNe_i+u_i^TRu_i)dt$，求得性能指标函数最小时对应的最优矩阵 N 和矩阵 R；其中，令矩阵 N 和矩阵 R 均为 2×2 正定对称矩阵，初始时矩阵 N 和矩阵 R 均设为单位矩阵；

②将求得的矩阵 N 和矩阵 R 代入方程 $D^TM+MD+N-MBR^{-1}B^TM=0$ 中，求出矩阵 M。

其中，矩阵 $D=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{bmatrix}$，矩阵 $B=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$；

③将求出的矩阵 M 代入公式 $K=R^{-1}B^{T}M$，即可求得向量 K。

步骤 2-5、根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号，包括以下步骤：

步骤 2-5-1、将输出值 u_i 作为交轴电流参考量 i_{qref}；

步骤 2-5-2、将获得的直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 通过低通滤波处理获得基波直轴电流 i_{db} 和基波交轴电流 i_{qb}；

步骤 2-5-3、将基波交轴电流 i_{qb} 与交轴电流参考量 i_{qref} 比较作差，获得交轴电流误差值 i_{qe}，将基波直轴电流 i_{db} 与直轴电流参考量 i_{dref}（取值为 0）比较作差，获得直轴电流误差值 i_{de}；

步骤 2-5-4、采用 PI 控制算法分别对交轴电流误差值 i_{qe} 和直轴电流误差值 i_{de} 进行计算，获得交轴电压参考值 u_{qref} 和直轴电压参考值 u_{dref}，并将直轴电压参考值 u_{dref} 与高频电压信号值 $V_{inj}\cos\omega_h t$ 求和，获得含高频信号的直轴电压参考值 u_{dh}；

步骤 2-5-5、根据电机转子相角估计值 $\hat{\theta}_1$，对交轴电压参考值 u_{qref} 和含高频信号的直轴电压参考值 u_{dh} 进行 Park 反坐标变换，获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值 $u_{\beta ref}$ 和交轴电压参考值 $u_{\alpha ref}$，将 $u_{\alpha ref}$ 和 $u_{\beta ref}$ 输入 SVPWM 模块，其产生的 PWM 信号；

步骤 3、根据 PWM 信号改变输出定子电压的频率和幅值，实现各单元电机转速的协同控制；

本发明实施例中，将 PWM 信号经过驱动与放大电路控制逆变单元 1 输出相应的三相正弦波形，从而控制电机的定子单元 1。

本发明实施例中，如图 12 所示，本实施例设定的转子给定速度值 $\omega^{*}=300rad/s$，图中 $w1$、$w2$、$w3$ 分别代表输入到分布式协同控制器中的三个单元的速度估算值 $\hat{\omega}_{r1}$、$\hat{\omega}_{r2}$、$\hat{\omega}_{r3}$ 对应曲线。由图可知，开始时三个单元的速度估算值为零，在分布式协同控制器的作用下，经过 4s 的时间三个单元的速度估算值趋于一致。各单元通过各自的分布式协同控制器，在不使用速度传感器的情况下，使三个定子单元产生了速度同步的旋转磁场，从而实现了电机转速的一体化协同控制。

权 利 要 求 书

1、一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，包括双并联 PWM 整流电路、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元、第三永磁电机协同控制单元和多单元永磁同步电机，其中，第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元通过并联连接的方式协调控制多单元永磁同步电机的三个定子单元。

2、根据权利要求 1 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，所述的第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元结构相同，均包括驱动与放大电路、控制单元和逆变单元，所述的控制单元通过相互通信实现多单元永磁同步电机的协同控制。

3、根据权利要求 2 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，所述的控制单元包括分布式协同控制器和电流控制与速度估算单元，其中，

电流控制与速度估算单元：

用于采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，根据采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，获得的转子速度估计值同时发送至每个控制单元的分布式协同控制器中；并接收分布式协同控制器的输出值，根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号，将获得的 PWM 信号通过驱动与放大电路发送至逆变单元中；

分布式协同控制器：

用于采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述，根据所构建的无向图获得各个控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、设置的转子给定速度值和控制单元整体的通信关系矩阵，构建误差函数，设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，求得分布式协同控制器的输出值。

4、根据权利要求 1 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，所述的多单元永磁同步电机，其定子为 27 槽 30 极分瓣式结构，每单元为 9 槽 10 极，各定子单元共享一个转子；其转子为永磁内置切向式；每单元电机绕组采用节距为 1 的双层分数槽绕组，各单元电机内部绕组采用星形连接方式。

5、采用权利要求 1 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统进行的控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号；

步骤 2、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时根据所采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，协调控制获得 PWM 信号；

步骤 3、根据 PWM 信号改变输出定子电压的频率和幅值，实现各单元电机转速的协同控制。

6、根据权利要求 5 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2 所述的协调控制，包括以下步骤：

步骤 2-1、根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得转子速度估计值，并同时发送至每个控制单元中实现三个控制单元的相互通信；

步骤 2-2、采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述；

步骤 2-3、根据所构建的无向图获得控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、用户设定的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数；

步骤 2-4、设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，获得输出值；

步骤 2-5、根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号。

7、根据权利要求 6 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-1 所述的根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得的转子速度估计值，包括以下步骤：

步骤 2-1-1、将接收到的电流检测信号进行模数转换，并根据转子初始相角值对转换后的 A 相、B 相、C 相电流信号进行 Clark 坐标变换和 Park 坐标变换，获得两相旋转坐标系下的直轴电流和交轴电流；

步骤 2-1-2、将交轴电流通过带通滤波处理获得交轴电流高频分量，将上述交轴电流高频分量与正弦高频信号相乘，获得可分离相角误差信号交轴电流高频分量，并将其通过低通滤波处理获得仅含相角误差的电流信号；

步骤 2-1-3、采用 PI 控制算法获得转子速度估计值，将上述转子速度估计值通过积分运算获得转子相角估计值。

8、根据权利要求 6 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-3 所述的通信关联矩阵为对称矩阵，该矩阵的行数和列数均为 3，矩阵中的元素取值为 0 或 1，当控制单元两两之间能够通信时，元素值为 1，否则为 0；所述的误差函数为：某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，加上该控制单元转子速度估计值与设定的转子给定速度值之间差值乘以系数；所述的某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，该系数为通信关联矩阵中的元素。

9、根据权利要求 6 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-4 所述的输出值，求解方式为：误差函数乘以实数矩阵和实数项，再与设定的转子给定速度值求和；所述的实数矩阵为一个 1×2 的实数向量。

10、根据权利要求 6 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-5 所述的根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，包括以下步骤：

步骤 2-5-1、将输出值作为交轴电流参考量；

步骤 2-5-2、将获得的直轴电流和交轴电流通过低通滤波处理获得基波直轴电流和基波交轴电流；

步骤 2-5-3、将基波交轴电流与交轴电流参考量比较作差，获得交轴电流误差值，将基波直轴电流与直轴电流参考量比较作差，获得直轴电流误差值；

步骤 2-5-4、采用 PI 控制算法分别对交轴电流误差值和直轴电流误差值进行计算，获得交轴电压参考值和直轴电压参考值，并将直轴电压参考值与高频电压信号值求和，获得含高频信号的直轴电压参考值；

步骤 2-5-5、根据电机转子相角估计值，对交轴电压参考值和含高频信号的直轴电压参考值进行 Park 反坐标变换，获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号。

经修改的权利要求
国际局收到日：2016年5月24日（24.05.2016）

1、一种多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，包括双并联 PWM 整流电路、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元、第三永磁电机协同控制单元和多单元永磁同步电机，其中，第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元通过并联连接的方式协调控制多单元永磁同步电机的三个定子单元，所述的第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元结构相同，均包括驱动与放大电路、控制单元和逆变单元，所述的控制单元通过相互通信实现多单元永磁同步电机的协同控制，所述的控制单元包括分布式协同控制器和电流控制与速度估算单元，其中，

电流控制与速度估算单元：

用于采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，根据采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，获得的转子速度估计值同时发送至每个控制单元的分布式协同控制器中；并接收分布式协同控制器的输出值，根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号，将获得的 PWM 信号通过驱动与放大电路发送至逆变单元中；

分布式协同控制器：

用于采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述，根据所构建的无向图获得各个控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、设置的转子给定速度值和控制单元整体的通信关系矩阵，构建误差函数，设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，求得分布式协同控制器的输出值。

2、根据权利要求 1 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统，其特征在于，所述的多单元永磁同步电机，其定子为 27 槽 30 极分瓣式结构，每单元为 9 槽 10 极，各定子单元共享一个转子；其转子为永磁内置切向式；每单元电机绕组采用节距为 1 的双层分数槽绕组，各单元电机内部绕组采用星形连接方式。

3、采用权利要求 1 所述的多单元永磁同步电机智能协同控制系统进行的控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时采集电机输入端的 A 相、B 相、C 相电流检测信号；

步骤 2、第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时根据所采集的 A 相、B 相、C 相电流检测信号，协调控制获得 PWM 信号，所述的协调控制，包括以下步骤：

步骤 2-1、根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得转子速度估计值，并同时发送至每个控制单元中实现三个控制单元的相互通信；

步骤 2-2、采用构建无向图的方法对三个控制单元的通信结构进行描述；

步骤 2-3、根据所构建的无向图获得控制单元整体的通信关联矩阵，并根据转子速度估计值、用户设定的转子给定速度值和控制单元整体的通信关联矩阵，构建误差函数；

步骤 2-4、设置实数矩阵和实数项，并根据构建的误差函数，获得输出值；

步骤 2-5、根据上述输出值获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号；

步骤 3、根据 PWM 信号改变输出定子电压的频率和幅值，实现各单元电机转速的协同控制。

4、根据权利要求 3 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-1 所述的根据 A 相、B 相、C 相电流检测信号获得的转子速度估计值，包括以下步骤：

步骤 2-1-1、将接收到的电流检测信号进行模数转换，并根据转子初始相角值对转换后的 A 相、B 相、C 相电流信号进行 Clark 坐标变换和 Park 坐标变换，获得两相旋转坐标系下的直轴电流和交轴电流；

步骤 2-1-2、将交轴电流通过带通滤波处理获得交轴电流高频分量，将上述交轴电流高频分量与正弦高频信号相乘，获得可分离相角误差信号交轴电流高频分量，并将其通过低通滤波处理获得仅含相角误差的电流信号；

步骤 2-1-3、采用 PI 控制算法获得转子速度估计值，将上述转子速度估计值通过积分运算获得转子相角估计值。

5、根据权利要求 3 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-3 所述的通信关联矩阵为对称矩阵，该矩阵的行数和列数均为 3，矩阵中的元素取值为 0 或 1，当控制单元两两之间能够通信时，元素值为 1，否则为 0；所述的误差函数为：某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，加上该控制单元转子速度估计值与设定的转子给定速度值之间差值乘以系数；所述的某一控制单元转子速度估计值与其他控制单元转子速度估计值之间的差值乘以系数，该系数为通信关联矩阵中的元素。

6、根据权利要求 3 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-4 所述的输出值，求解方式为：误差函数乘以实数矩阵和实数项，再与设定的转子给定速度值求和；所述的实数矩阵为一个 1×2 的实数向量。

7、根据权利要求 3 所述的控制方法，其特征在于，步骤 2-5 所述的根据上述输出值获得两

相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，包括以下步骤：

步骤 2-5-1、将输出值作为交轴电流参考量；

步骤 2-5-2、将获得的直轴电流和交轴电流通过低通滤波处理获得基波直轴电流和基波交轴电流；

步骤 2-5-3、将基波交轴电流与交轴电流参考量相减，获得交轴电流误差值，将基波直轴电流与直轴电流参考量相减，获得直轴电流误差值；

步骤 2-5-4、采用 PI 控制算法分别对交轴电流误差值和直轴电流误差值进行计算，获得交轴电压参考值和直轴电压参考值，并将直轴电压参考值与高频电压信号值求和，获得含高频信号的直轴电压参考值；

步骤 2-5-5、根据电机转子相角估计值，对交轴电压参考值和含高频信号的直轴电压参考值进行 Park 反坐标变换，获得两相静止坐标系下的直轴电压参考值和交轴电压参考值，再采用空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号。

条约第19条第（1）款的声明

申请人根据 PCT 第 19 条及书面意见修改了原 PCT 申请号为 PCT/CN2015/086955 的权利要求书，具体修改说明如下：

修改了权利要求 1，将权利要求 2,3 并入权利要求 1，删除了权利要求 2 和权利要求 3，修改了权利要求 4，修改了权利要求 5，将权利要求 6 并入权利要求 5，删除了权利要求 6，修改了权利要求 7 至 10.

1 修改的基准：书面意见中指出原权利要求项 3、6-10 具有创造性，原权利要求项 1、2、4、5 不具有创造性。现将原权利要求 2,3 都合并入原权利要求 1，合并后新的权利要求 1 具有了创造性；根据说明书中第 1 页第 25 至第 2 页第 8 行，即将原来的权利要求 2,3 并入到权利要求 1 中。

2 修改的基准：原权利要求 4 变成新权利要求 2，新的权利要求 2 为新权利要求 1 的从属权利要求，所以也具有创造性；根据说明书中第 2 页第 9 至 11 行，即将原权利要求 4 变成新权利要求 2。

3 修改的基准：原权利要求 6 与原权利要求 5 合并形成新的权利要求 3，由于原权利要求 6 具有创造性，所以新的权利要求 3 也具有了创造性；根据说明书中第 2 页 12 至 26 行，即将原权利要求 6 与原权利要求 5 合并形成新

的权利要求 3。

4 修改的基准：原权利要求 7、8、9、10 变成新的权利要求 4、5、6、7，由于这四条新的权利要求属于新的权利要求 3 的从属权利要求，所以也具有创造性。根据说明书中第 2 页 27 行至第 3 页第 6 行，第 3 页第 7 行至第 12 行，第 3 页第 12 行至第 14 行，即将原权利要求 7、8、9、10 变成新的权利要求 4、5、6、7。

5 修改的基准：原权利要求 10 中，即新的权利要求 7 中步骤 2-5-3 将“将基波交轴电流与交轴电流参考量比较作差，获得交轴电流误差值，将基波直轴电流与直轴电流参考量比较作差，获得直轴电流误差值”修改为“将基波交轴电流与交轴电流参考量相减，获得交轴电流误差值，将基波直轴电流与直轴电流参考量相减，获得直轴电流误差值；”。此修改（两处“比较作差”一词改为“相减”）是为了使表达更准确，实则两者并无差别，并没有超出原有的范围。

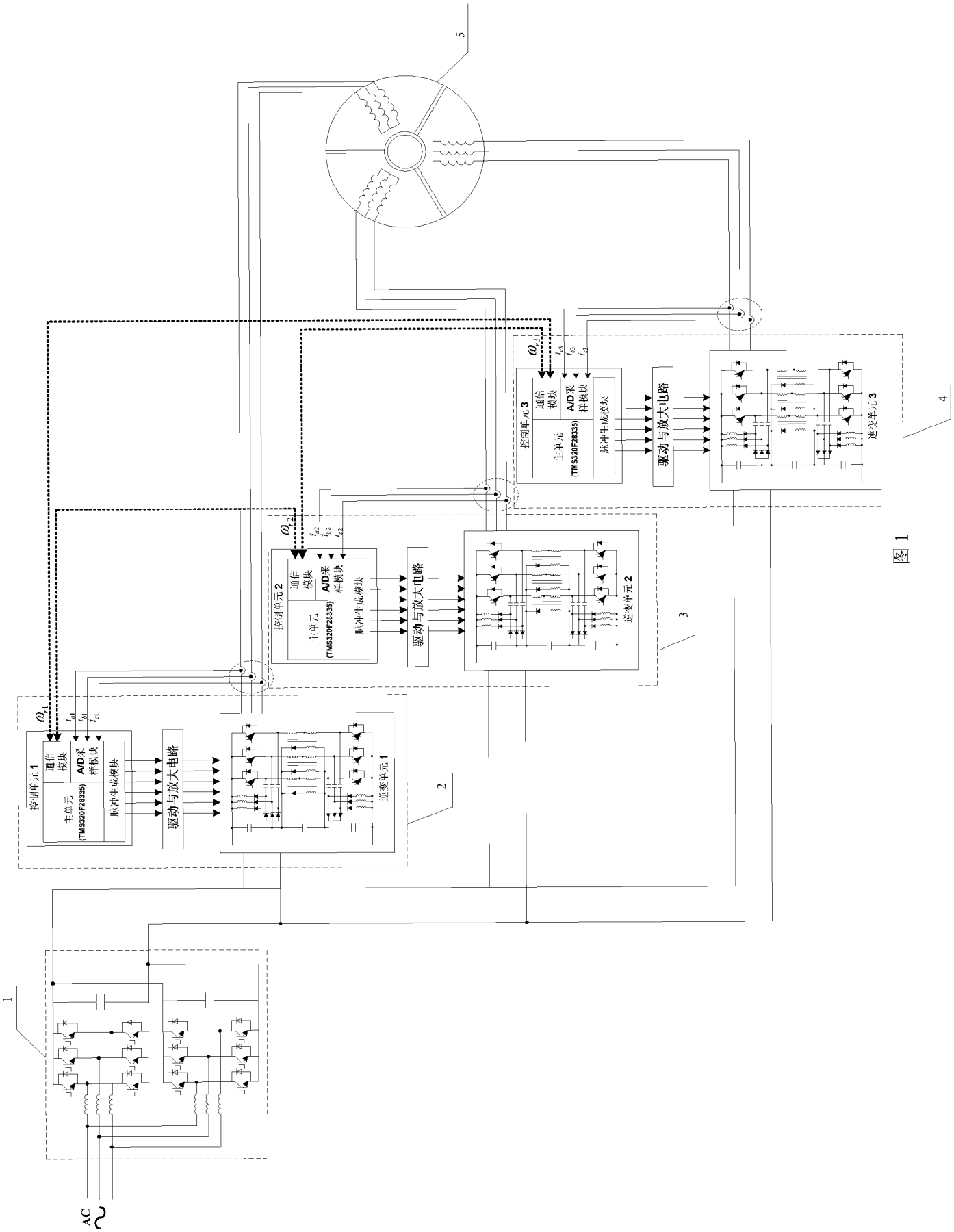

5
4
3
2
1
AC
控制单元 1
通信模块
A/D采样模块
主单元
(TMS320F28335)
脉冲生成模块
驱动与放大电路
逆变单元 1
控制单元 2
上单元
逆变单元 2
控制单元 3
逆变单元 3

图 1

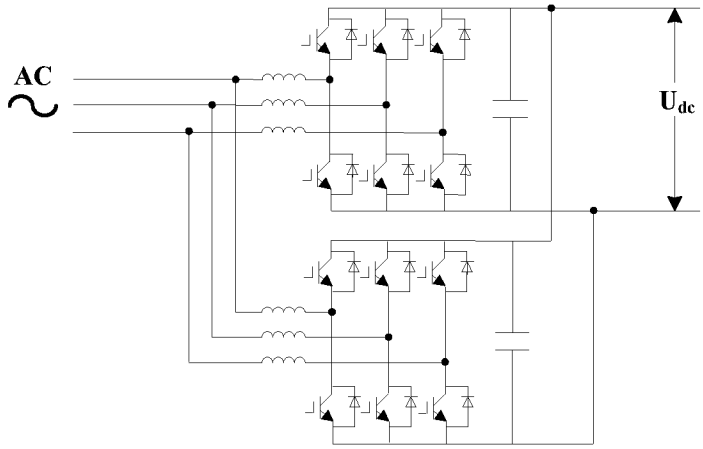

AC
U_{dc}

图 2

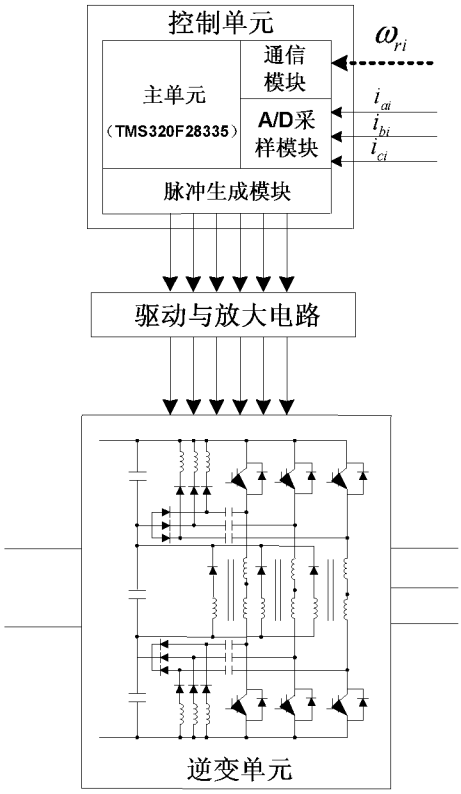

控制单元
ω_{ri}
通信模块
主单元
（TMS320F28335）
A/D采样模块
i_{ai}
i_{bi}
i_{ci}
脉冲生成模块
驱动与放大电路
逆变单元

图 3

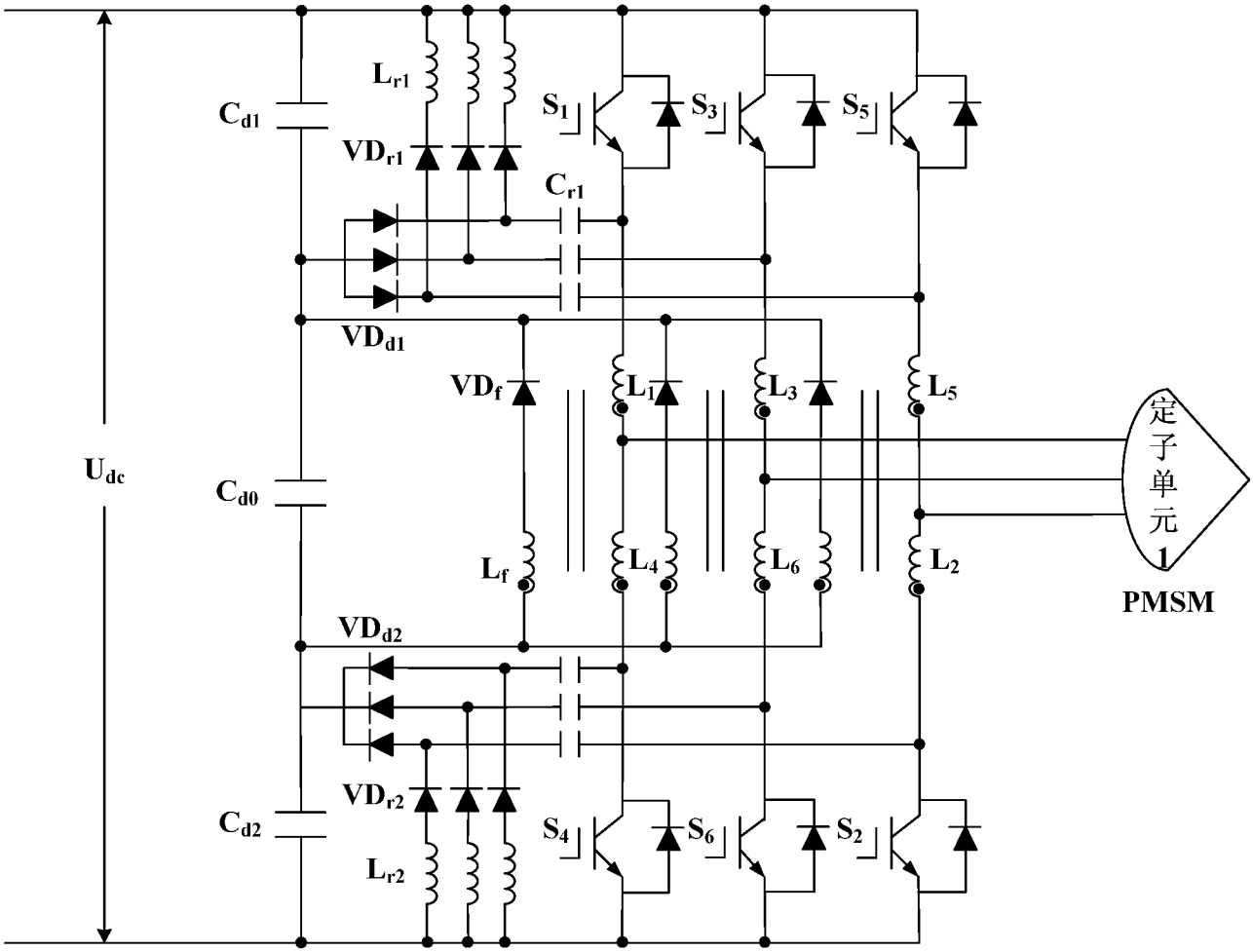

L_{r1}
C_{d1}
VD_{r1}
S_1
S_3
S_5
C_{r1}
VD_{d1}
VD_f
L_1
L_3
L_5
U_{dc}
C_{d0}
L_f
L_4
L_6
L_2
定子单元1
PMSM
VD_{d2}
VD_{r2}
C_{d2}
L_{r2}
S_4
S_6
S_2

图 4

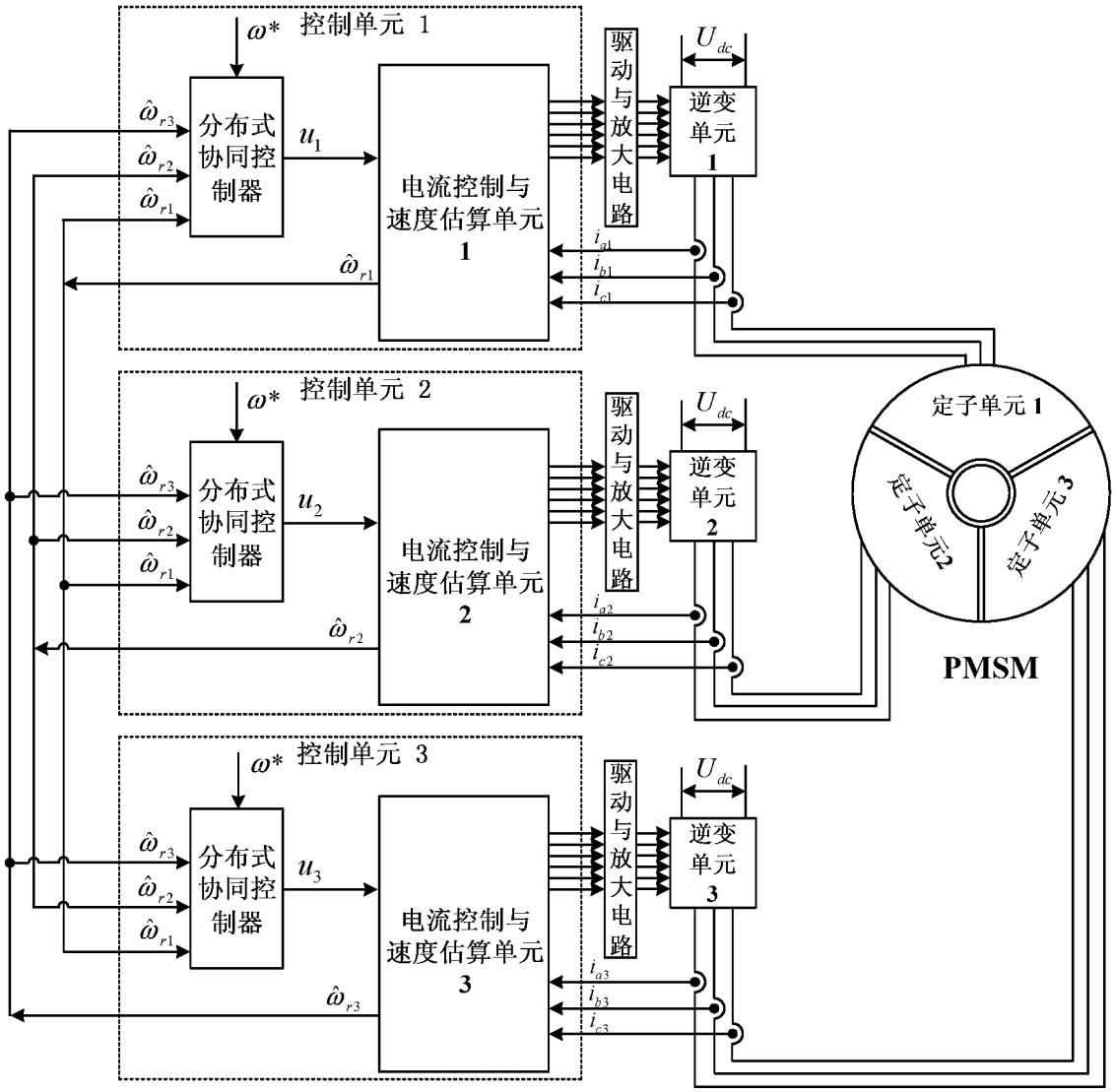

ω* 控制单元 1
分布式协同控制器
电流控制与速度估算单元 1
驱动与放大电路
逆变单元 1
ω* 控制单元 2
分布式协同控制器
电流控制与速度估算单元 2
驱动与放大电路
逆变单元 2
ω* 控制单元 3
分布式协同控制器
电流控制与速度估算单元 3
驱动与放大电路
逆变单元 3
定子单元 1
定子单元2
定子单元3
PMSM

图 5

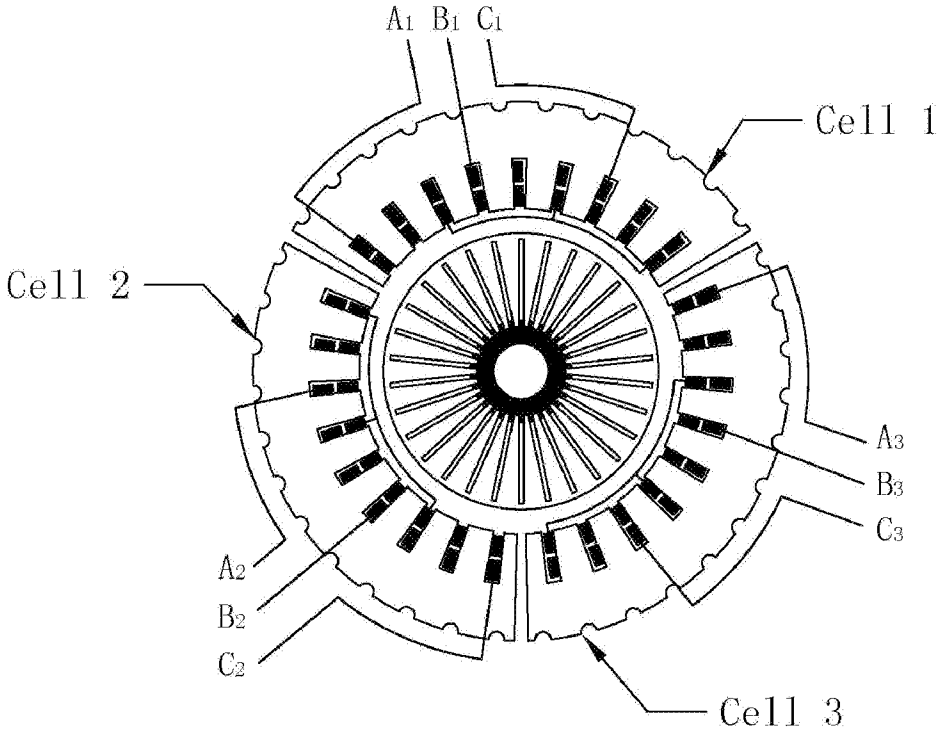


图 6

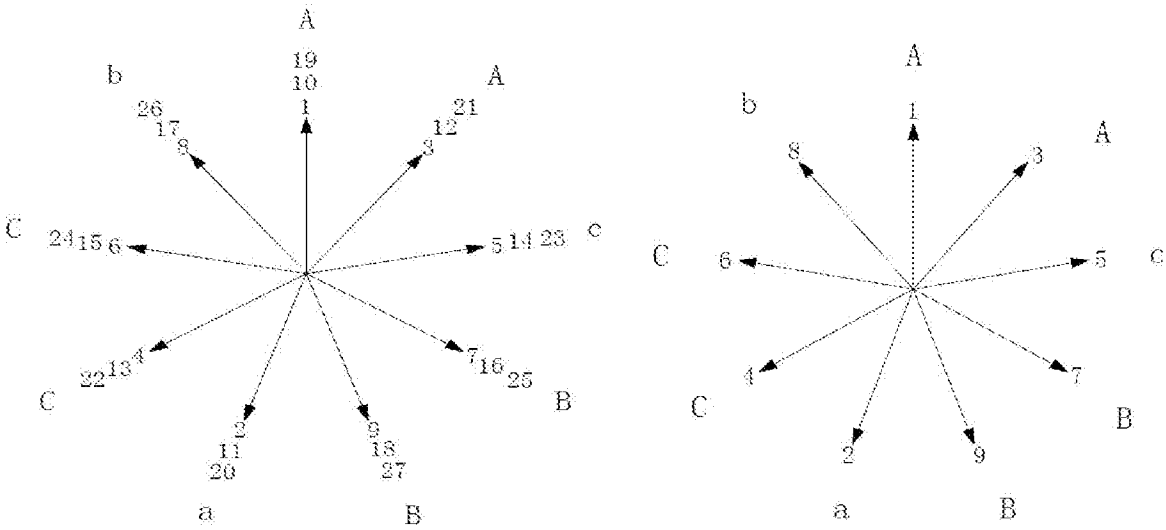


图 7

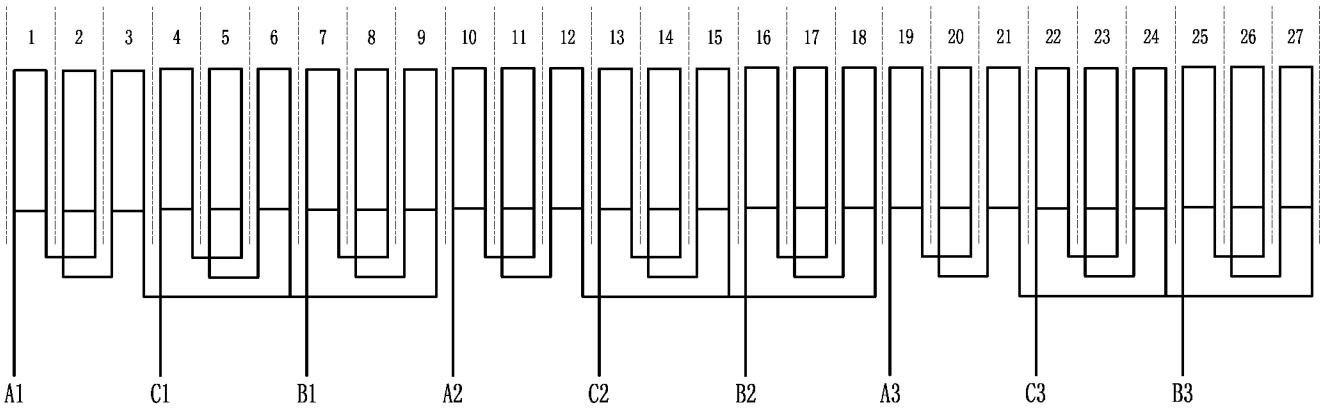

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
A1
C1
B1
A2
C2
B2
A3
C3
B3

图 8

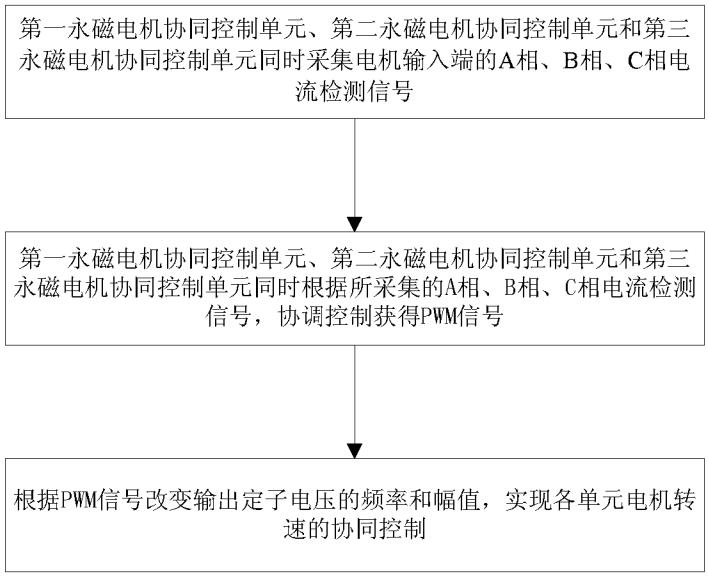

第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时采集电机输入端的A相、B相、C相电流检测信号
第一永磁电机协同控制单元、第二永磁电机协同控制单元和第三永磁电机协同控制单元同时根据所采集的A相、B相、C相电流检测信号，协调控制获得PWM信号
根据PWM信号改变输出定子电压的频率和幅值，实现各单元电机转速的协同控制

图 9

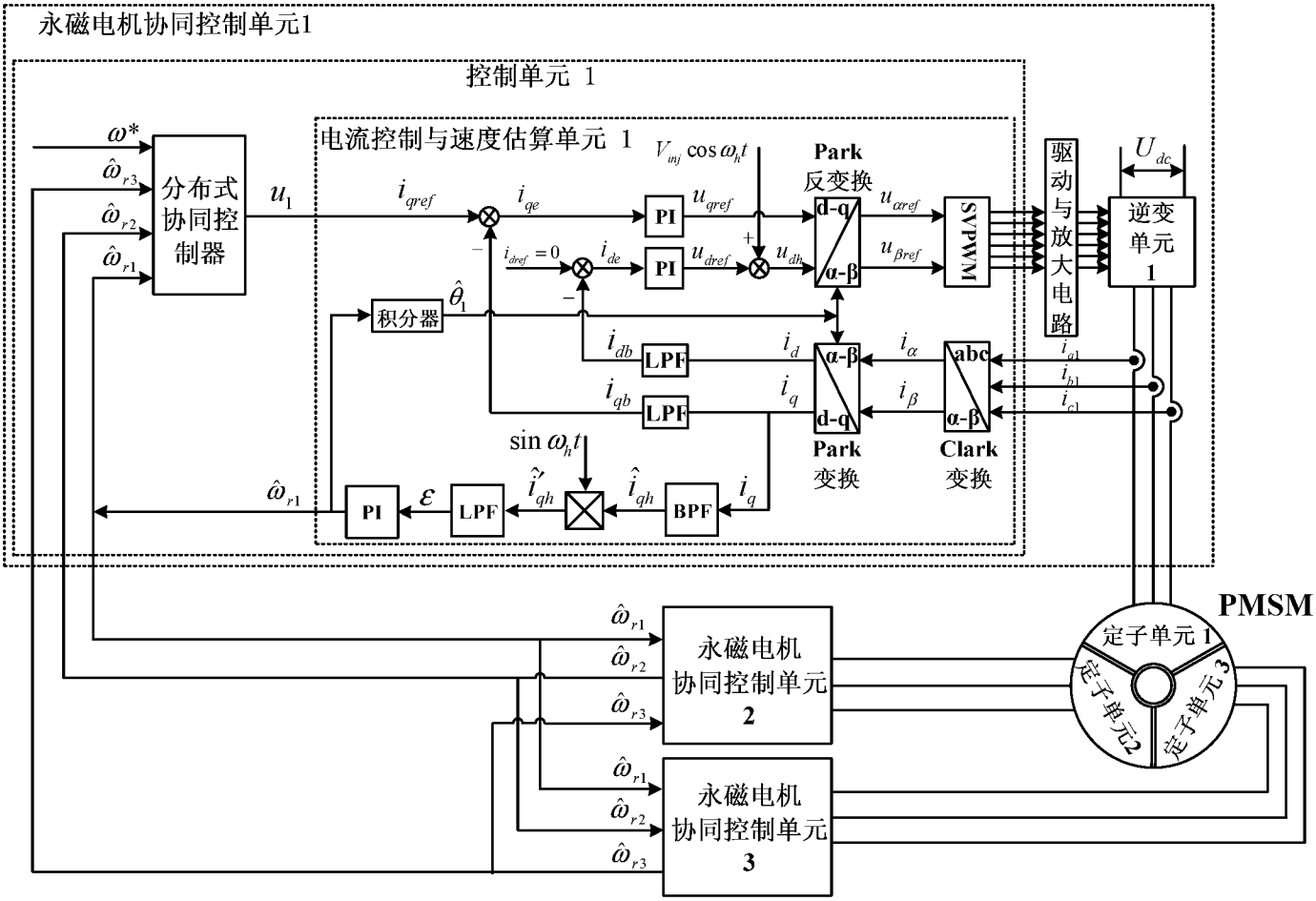

永磁电机协同控制单元1
控制单元 1
电流控制与速度估算单元 1
分布式协同控制器
积分器
PI
LPF
BPF
Park 反变换
Park 变换
Clark 变换
SVPWM
驱动与放大电路
逆变单元 1
PMSM
定子单元 1
定子单元2
定子单元3
永磁电机协同控制单元 2
永磁电机协同控制单元 3

图 10

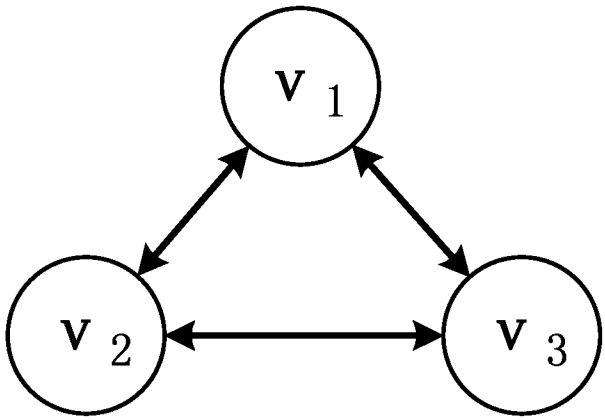

V 1
V 2
V 3

图 11

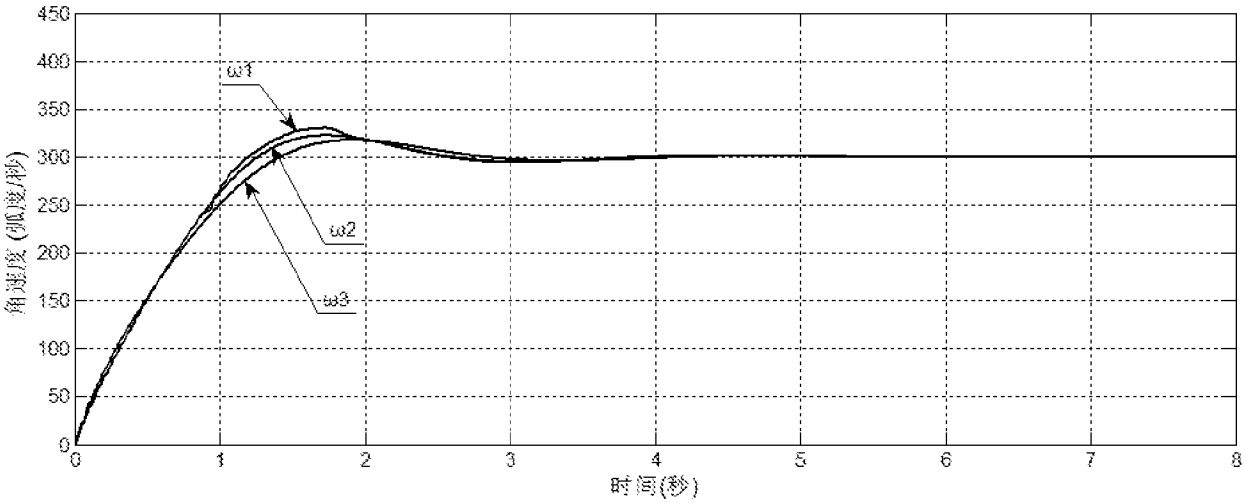

450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
ω1
ω2
ω3
角速度 (弧度/秒)
时间(秒)

图 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/086955

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P 21/12 (2016.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: permanent magnet, electric motor, PWM rectification, cooperative control, coordinated control, multi-unit, multi-phase, multi-branch, PMSM, rectify, cooperative, distributed

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	ZHAO, Pinzhi et al., "Multi-unit Motor Parallel Drive System for Electric Vehicle Application", 2008 IEEE VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE, 05 September 2008 (05.09.2008), sections II and III, and figures 2-4	1, 2, 4, 5
A	NAGAISHI, M. et al., "Failure Characteristics of Motor System Using Distributed Inverter for PMSM", POWER ELECTRICS AND APPLICATIONS, 2009. EPE'09. 13TH EUROPEAN CONFERENCE ON, 10 September 2009 (10.09.2009), the whole document	1-10
A	CN 202261126 U (NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY), 30 May 2012 (30.05.2012), the whole document	1-10
A	CN 103472312 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY), 25 December 2013 (25.12.2013), the whole document	1-10
A	CN 102969860 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY), 13 March 2013 (13.03.2013), the whole document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 April 2016 (13.04.2016)	**27 April 2016 (27.04.2016)**
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer **LI, Xinrui** Telephone No.: (86-10) **53318346**

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/086955

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008067984 A1 (HONEYWELL INTERNATIONAL, INC.), 20 March 2008 (20.03.2008), the whole document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2015/086955

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 202261126 U	30 May 2012	None	
CN 103472312 A	25 December 2013	CN 103472312 B	08 July 2015
CN 102969860 A	13 March 2013	CN 102969860 B	28 January 2015
US 2008067984 A1	20 March 2008	US 7388300 B2	17 June 2008
		EP 1903212 A2	26 March 2008

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2015/086955

A. 主题的分类

H02P 21/12(2016.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02P

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

WPI,EPODOC,CNPAT,CNKI,IEEE:多相,多单元,多分支,多支路,永磁,电机,电动机,马达, PWM整流,协同控制,协调控制,分布;multi-unit,multi-phase,multi-branch,PMSM, rectify,cooperative,distributed

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
X	ZHAO, Pinzhi等. "Multi-unit Motor Parallel Drive System for Electric Vehicle Application" 《2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference》, 2008年 9月 5日 (2008-09-05), 第II节，第III节，图2-图4	1,2,4,5
A	NAGAISHI, Masakazu等. "Failure Characteristics of Motor System Using Dsitributed Inverter for PMSM" 《Power Electrics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conference on》, 2009年 9月 10日 (2009-09-10), 全文	1-10
A	CN 202261126 U (西北工业大学) 2012年 5月 30日 (2012-05-30) 全文	1-10
A	CN 103472312 A (哈尔滨工业大学) 2013年 12月 25日 (2013-12-25) 全文	1-10
A	CN 102969860 A (华中科技大学) 2013年 3月 13日 (2013-03-13) 全文	1-10

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2016年 4月 13日	2016年 4月 27日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 李新瑞 电话号码 (86-10)53318346

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2009年7月)

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	US 2008067984 A1 (HONEYWELL INTERNATIONAL, INC.) 2008年 3月 20日 (2008-03-20) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2015/086955

检索报告引用的专利文件			公布日（年/月/日）	同族专利			公布日（年/月/日）
CN	202261126	U	2012年 5月 30日	无			
CN	103472312	A	2013年 12月 25日	CN	103472312	B	2015年 7月 8日
CN	102969860	A	2013年 3月 13日	CN	102969860	B	2015年 1月 28日
US	2008067984	A1	2008年 3月 20日	US	7388300	B2	2008年 6月 17日
				EP	1903212	A2	2008年 3月 26日