

一种串联电机的控制方法

技术领域

本发明涉及电机控制技术领域，且更具体地涉及一种串联电机的控制方法。

背景技术

轴串联电机控制是一种独立于机械传动系统而实现电机的加速、减速和定位控制的技术。其控制方式是将电机按照负载特性分成若干段，通过控制每段电机的转速和转矩来最终实现整个机械系统的控制。

轴串联电机控制是为了满足现代工业系统对于更高的运动控制精度和性能的要求而提出的。相比于传统的机械传动控制，轴串联电机控制更加灵活，可以通过控制每个电机的转速和扭矩来实现更精细的运动控制，并且具有更高的控制精度和稳定性。

但是，轴串联电机控制也存在一定的弊端。首先，其控制的成本相对较高，因为需要较多的电机和电机控制器。其次，电机之间的配合需要更好的协调和设置，否则容易出现电机之间的干涉和振荡问题。最后，由于每个电机都需要独立的控制器，系统的电磁干扰和抗干扰能力也需要更高的要求。

发明内容

针对上述技术的不足，本发明公开一种串联电机的控制方法，本发明通过混合控制算法保持期望电压输出矢量，通过反闭环转速算法实现轴串联的各个电机转速同步，通过能耗均衡算法使轴串联各个电机的负载和能耗保持均衡，通过权益选择算法组合选取故障解决处理方案，大大提高了电机协作能力，提高了故障的检测和应对能力，降低了资源消耗成本。

有鉴于此，本发明提供了一种串联电机的控制方法，包括如下步骤：

步骤 1、将 n 台电机的轴线串联连接，采集每台电机基本参数；

通过旋转变压器获取每台电机基本参数，所述基本参数包括转轴角位移、角速度、转速和相电流；

步骤 2、将获取的电机基本参数合成电压空间矢量参考值；

通过计算模块进行电压空间矢量参考值的计算；

步骤 3、通过混合控制算法与电压空间矢量参考值得到期望电压输出矢

量；

采用逆变换模块获取期望电压输出矢量；

步骤 4、实现轴串联各个电机的转速同步和负载均衡；

采用同步均衡模块实现轴串联的各个电机保持同步转速和均衡负载；所述同步均衡模块包括转速同步单元和节能负载单元，所述转速同步单元采用反闭环转速算法实现轴串联的各个电机转速同步，所述节能负载单元采用能耗均衡算法根据每台电机的基本参数使轴串联各个电机的负载和能耗保持均衡，所述转速同步单元的输出端连接节能负载单元的输入端；

步骤 5、实时监测轴串联各个电机的工作过程并及时应对突发状况；

采用监测回馈模块实现轴串联各个电机的实时监测和故障应对策略。

作为本发明进一步的实施例，所述计算模块包括变换单元和调节单元，所述变换单元将获取的电机相电流实际值坐标变换为电机各轴的电流分量，所述调节单元采用 PID 算法将电机各轴的电流分量与零值的误差转换为电机各轴的电压分量，所述变换单元的输出端连接调节单元的输入端。

作为本发明进一步的实施例，所述监测回馈模块包括故障诊断单元、策略防护单元、紧急制动单元和能量回馈单元，所述故障诊断单元采用异常检测算法将获取的每台电机基本参数和期望电压输出矢量值进行检测，所述策略防护单元通过权益选择算法进行故障解决处理方案的组合选取，所述紧急制动单元通过抱闸处理将故障电机进行紧急制动，所述能量回馈单元采用基于 FOC 和 MPPT 的混合回馈算法将紧急制动后的能量进行恢复和再利用，所述故障诊断单元的输出端连接策略防护单元的输入端，所述策略防护单元的输出端连接紧急制动单元的输入端，所述紧急制动单元的输出端连接能量回馈单元的输入端。

作为本发明进一步的实施例，所述逆变换模块包括旋转静止单元和幅相定位单元，所述旋转静止单元通过 $6/2$ 和 $2s/2r$ 将电机各轴的电压分量旋转逆变换到两相静止坐标系中的坐标轴分量，所述幅相定位单元采用混合控制算法计算两相静止坐标系中参考值的幅值和相位，并根据相位确定扇区和所需电压空间矢量，所述旋转静止单元的输出端连接幅相定位单元的输入端。

作为本发明进一步的实施例，：所述反闭环转速算法的工作方法为：首先根据反电动势、电机电感和电阻建立电机的数学模型，然后使用电机的反电动势预

测电机的输出特性，并用于电流控制环，接着在电流控制环的基础上增加速度控制环，最后通过速度控制回路实时调整电机的输出转速。

作为本发明进一步的实施例，所述混合控制算法的工作方法为：首先将实际电流值与目标电流值进行比较得到电流误差信号并作为 PWM 参考信号，然后将电源电压进行比较和采样以获取参考电压值和实际电压值的差值，再将该差值通过三角波进行调制形成 PWM 载波信号，最后将 PWM 参考信号和 PWM 载波信号进行比较和调节，使电流值始终保持在误差范围内。

作为本发明进一步的实施例，所述能耗均衡算法的工作方法为：

首先将获取的每台电机基本参数化为矩阵形式，

$$X^* = U \sum G = U \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_m \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中， X^* 表示参数矩阵式， U 表示干扰矩阵， G 表示组合系数矩阵， σ 表示主系数， G_m 表示组合效应值， m 表示列数；

将参数数据表面特征通过数据转换函数转化为深度特征，所述数据转换函数为：

$$Y^\# = \sqrt{X^* B + H T} \quad (2)$$

式(2)中， $Y^\#$ 表示数据深度特征， X^* 表示数据表面特征， B 表示转换参数， H 表示数据维度参数， T 表示误差调整参数；

将获取的数据深度特征经过 180 次的迭代训练以获取基本模型权重参数，并根据实时数据进行预测识别，识别函数表示为：

$$E^V = T H \left(Y^\# - X^* \sqrt{G B} \right)^V + Y^\# X^* B \quad (3)$$

式(3)中， E^V 表示实时数据与预测数据之间的关联性， V 表示调整周期；

为避免训练过程中造成过拟合，对训练流程参数进行限制，限制函数表示为：

$$\hat{B} = \left(X^V X^* \right)^{-3} \sqrt{X^T + H Y^\#} - \sqrt{X^T H Y^\#} \quad (4)$$

式(4)中， $\hat{B}$ 表示训练流程参数限制变量， X^V 表示训练周期内对训练流程捕

捉信息， X^T 表示训练周期内数据动态信息；

通过对比两个相邻周期内负载和能耗的变化规律，判断训练流程参数权重是否达到最优，对比结果表示为：

$$\|\hat{X}^t - \hat{X}^{t-1}\|_F^V < \sqrt[t]{\varepsilon} \|\hat{X}^{t-1}\|_F^H \quad (5)$$

式(5)中， $\hat{X}^t$ 表示训练周期获取的参数信息， $\hat{X}^{t-1}$ 表示相邻周期收集的参数信息， ε 表示两个相邻周期差异系数。

作为本发明进一步的实施例，所述权益选择算法的工作方法为：首先将初次故障难度值设置为 0，以便于节点产生新解决措施，然后节点通过计算故障答案来获取添加新解决措施的权利，新解决措施的哈希值满足电机正常运行要求，在检测到信任节点发现异常就通过多次协商达成一致并在短时间内完成，以确认添加新解决措施，接着在收集到足够的新解决措施之后，节点必须在这些新解决措施之间进行选择，最后根据每一次权益选择结果以及权益选择时间的长短调整后续的故障难度值。

本发明区别于现有技术积极有益效果在于：

本发明通过混合控制算法保持期望电压输出矢量，通过反闭环转速算法实现轴串联的各个电机转速同步，通过能耗均衡算法使轴串联各个电机的负载和能耗保持均衡，通过权益选择算法组合选取故障解决处理方案，大大提高了电机协作能力，提高了故障的检测和应对能力，降低了资源消耗成本。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图，其中，

图 1 为本发明流程图；

图 2 为本发明基本架构图；

图 3 为监测回馈模块架构图；

图 4 为同步均衡模块架构图；

图 5 为逆变换模块架构图。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。应该理解，这些描述只是示例性的，而并非要限制本发明的范围。此外，在以下说明中，省略了对公知结构和技术的描述，以避免不必要地混淆本发明的概念。

如图1所示，一种串联电机的控制方法，包括如下步骤：

步骤1、将n台电机的轴线串联连接，采集每台电机基本参数；

通过旋转变压器获取每台电机基本参数，所述基本参数包括转轴角位移、角速度、转速和相电流；

步骤2、将获取的电机基本参数合成电压空间矢量参考值；

通过计算模块进行电压空间矢量参考值的计算；

步骤3、通过混合控制算法与电压空间矢量参考值得到期望电压输出矢量；

采用逆变换模块获取期望电压输出矢量；

步骤4、实现轴串联各个电机的转速同步和负载均衡；

采用同步均衡模块实现轴串联的各个电机保持同步转速和均衡负载；所述同步均衡模块包括转速同步单元和节能负载单元，所述转速同步单元采用反闭环转速算法实现轴串联的各个电机转速同步，所述节能负载单元采用能耗均衡算法根据每台电机的基本参数使轴串联各个电机的负载和能耗保持均衡，所述转速同步单元的输出端连接节能负载单元的输入端；

步骤5、实时监测轴串联各个电机的工作过程并及时应对突发状况；

采用监测反馈模块实现轴串联各个电机的实时监测和故障应对策略。

所述旋转变压器的输出端连接计算模块的输入端，所述计算模块的输出端连接逆变换模块的输入端，所述逆变换模块的输出端连接同步均衡模块的输入端，所述同步均衡模块的输出端连接监测反馈模块的输入端。

进一步地，所述计算模块包括变换单元和调节单元，所述变换单元将获取的电机相电流实际值坐标变换为电机各轴的电流分量，所述调节单元采用PID算法将电机各轴的电流分量与零值的误差转换为电机各轴的电压分量，所述变

换单元的输出端连接调节单元的输入端。

进一步地，所述监测回馈模块包括故障诊断单元、策略防护单元、紧急制动单元和能量回馈单元，所述故障诊断单元采用异常检测算法将获取的每台电机基本参数和期望电压输出矢量值进行检测，所述策略防护单元通过权益选择算法进行故障解决处理方案的组合选取，所述紧急制动单元通过抱闸处理将故障电机进行紧急制动，所述能量回馈单元采用基于 FOC 和 MPPT 的混合回馈算法将紧急制动后的能量进行恢复和再利用，所述故障诊断单元的输出端连接策略防护单元的输入端，所述策略防护单元的输出端连接紧急制动单元的输入端，所述紧急制动单元的输出端连接能量回馈单元的输入端。

在具体实施例中，所述监测回馈模块的工作原理为：通过异常检测算法对每台电机的基本参数和期望电压输出矢量值进行检测，并输出检测结果。如果出现故障，将会输出相应的故障信息。根据故障诊断单元的输出结果，使用权益选择算法从故障解决处理方案中选取最优的方案。选定方案后，输出供下一单元处理。接收策略防护单元输出的方案，通过抱闸处理将出现故障的电机进行紧急制动。这样可以避免电机出现更严重的故障，最后采用基于 FOC 和 MPPT 的混合回馈算法，将紧急制动后的能量进行恢复和再利用。

进一步地，所述逆变模块包括旋转静止单元和幅相定位单元，所述旋转静止单元通过 $6/2$ 和 $2s/2r$ 将电机各轴的电压分量旋转逆变到两相静止坐标系中的坐标轴分量，所述幅相定位单元采用混合控制算法计算两相静止坐标系中参考值的幅值和相位，并根据相位确定扇区和所需电压空间矢量，所述旋转静止单元的输出端连接幅相定位单元的输入端。

进一步地，所述反闭环转速算法的工作方法为：首先根据反电动势、电机电感和电阻建立电机的数学模型，然后使用电机的反电动势预测电机的输出特性，并用于电流控制环，接着在电流控制环的基础上增加速度控制环，最后通过速度控制回路实时调整电机的输出转速。

在具体实施例中，所述反闭环转速算法的工作原理为：建立电机的数学模型，包括反电动势以及电机电感、电阻等参数。通过数学模型对电机性能做出准确的分析，为控制算法的建立奠定基础。在控制过程中，使用电机的反电动势来预测电机的输出特性，并将其用于电流控制回路中，实现电机控制的预测性。在电流

控制环的基础上，增加速度控制环，实现双闭环控制。通过速度控制回路，实时调整电机的输出转速，保证电机输出转速与目标转速的精确匹配，通过调整控制参数，对电机系统进行优化，以实现更为准确无误的控制结果。需要根据电机的实际情况进行多次实验和调整，直至控制效果达到最佳状态，如表 1 所示。

表 1 转速调节控制表

算法/因素	目标转速 /(r/min)	调节时间/ms	同步率/%	实际转速 /(r/min)
反电动势	3000	186	81.3	2439
双闭环	3000	152	89.6	2688
反闭环转速	3000	27	98.7	2961

从上表可以看出，三种转速调节控制算法分别是反电动势、双闭环和反闭环转速。它们的目标转速均为 3000r/min，但调节时间、同步率、实际转速等方面存在着一定的差异。

1. 反电动势调节控制：调节时间较长，为 186ms。同步率为 81.3%，说明控制效果较一般。实际转速为 2439r/min，距离目标转速还有一定差距。
2. 双闭环调节控制：调节时间相对较短，为 152ms。同步率为 89.6%，说明控制效果较好。实际转速为 2688r/min，较接近目标转速。
3. 反闭环转速调节控制：调节时间最短，为 27ms。同步率最高，达到了 98.7%，说明控制效果最优秀。实际转速最接近目标转速，为 2961r/min。

综合来看，反闭环转速调节控制相比于其他两种控制算法，在调节时间、同步率和实际转速等方面都具有优势。

进一步地，所述混合控制算法的工作方法为：首先将实际电流值与目标电流值进行比较得到电流误差信号并作为 PWM 参考信号，然后将电源电压进行比较和采样以获取参考电压值和实际电压值的差值，再将该差值通过三角波进行调制形成 PWM 载波信号，最后将 PWM 参考信号和 PWM 载波信号进行比较和调节，使电流值始终保持在误差范围内。

在具体实施例 中，所述混合控制算法的原理为：首先进行电流滞环控制，即对电流进行高频调节，使其始终保持在一定范围内，不会产生跳跃和震荡。具体操作是将实际电流值与目标电流值进行比较，得到误差信号后，通过控制器输出

相应的控制信号，使电流值始终保持在误差范围内。通过 PWM 方式，对电机驱动的交流电源进行控制。具体操作是将电源电压进行比较和采样，获取参考电压值和实际电压值的差值，然后将该差值通过三角波进行调制，形成 PWM 载波信号，控制电流的大小和流动方向。将电流滞环控制和 PWM 载波控制相结合，形成混合控制策略，从而实现更为精确的电机控制。混合控制方法是将电流滞环控制的误差信号作为 PWM 控制器的参考信号，这样可以实现在误差范围内的精确电机驱动。通过控制系统实现混合控制策略，控制电机的运行。实现方式可以是使用嵌入式单元或是 DSP 处理器，通过编程实现电流滞环控制和 PWM 载波控制混合控制算法，驱动电机电源输出电压和电流的精确控制，如表 2 所示。

表 2 电机参数调节表

算法/因素	电流/A	电压/V	期望电压/V	调节时间/ms
电流滞环	24.6	30.5	30	113
PWM	28.4	30.7	30	84
混合控制	20.8	30.1	30	28

从上表可以看出，三种电机参数调节控制算法分别是电流滞环、PWM 和混合控制。它们在电流、电压、期望电压等方面存在着一定的差异。

1. 电流滞环调节控制：该算法的电流为 24.6A，电压为 30.5V，期望电压为 30V，调节时间为 113ms。

2. PWM 调节控制：该算法的电流为 28.4A，电压为 30.7V，期望电压为 30V，调节时间为 84ms。

3. 混合控制调节控制：该算法的电流为 20.8A，电压为 30.1V，期望电压为 30V，调节时间为 28ms。

综合来看，混合控制算法在电流、电压和期望电压等方面均表现出优异的结果，并且调节时间最短，为 28ms。

进一步地，所述能耗均衡算法的工作方法为：

首先将获取的每台电机基本参数化为矩阵形式，

$$X^* = U \sum G = U \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_m \end{pmatrix} \tag{1}$$

式(1)中, X^* 表示参数矩阵式, U 表示干扰矩阵, G 表示组合系数矩阵, σ 表示主系数, G_m 表示组合效应值, m 表示列数;

将参数数据表面特征通过数据转换函数转化为深度特征, 所述数据转换函数为:

$$Y^\# = \sqrt{X^* B + HT} \quad (2)$$

式(2)中, $Y^\#$ 表示数据深度特征, X^* 表示数据表面特征, B 表示转换参数, H 表示数据维度参数, T 表示误差调整参数;

将获取的数据深度特征经过 180 次的迭代训练以获取基本模型权重参数, 并根据实时数据进行预测识别, 识别函数表示为:

$$E^V = TH \left(Y^\# - X^* \sqrt{GB} \right)^V + Y^\# X^* B \quad (3)$$

式(3)中, E^V 表示实时数据与预测数据之间的关联性, V 表示调整周期;

为避免训练过程中造成过拟合, 对训练流程参数进行限制, 限制函数表示为:

$$\hat{B} = \left(X^V X^* \right)^{-3} \sqrt{X^T + HY^\#} - \sqrt{X^T HY^\#} \quad (4)$$

式(4)中, $\hat{B}$ 表示训练流程参数限制变量, X^V 表示训练周期内对训练流程捕捉信息, X^T 表示训练周期内数据动态信息;

通过对比两个相邻周期内负载和能耗的变化规律, 判断训练流程参数权重是否达到最优, 对比结果表示为:

$$\left\| \hat{X}^t - \hat{X}^{t-1} \right\|_F^V < \sqrt[3]{\varepsilon} \left\| \hat{X}^{t-1} \right\|_F^H \quad (5)$$

式(5)中, $\hat{X}^t$ 表示训练周期获取的参数信息, $\hat{X}^{t-1}$ 表示相邻周期收集的参数信息, ε 表示两个相邻周期差异系数。

在具体实施例中, 所述能耗均衡算法的工作原理为: 系统会对各个电机的能耗进行检测和记录, 包括实时能耗和历史平均能耗值等。当系统中某个电机的能耗值超出了设定值或者产生了过载等异常情况时, 能耗均衡算法会将多余的能量通过电容等方式传递至其他未超过设定值的电机上。能耗均衡算法通过对能耗情况的监测和分析, 采取不同的方案对系统能耗进行管理和调整, 以实现系统的能

耗均衡。在实际的应用中，能耗均衡算法通常会对系统的总能耗进行设定，当系统中某个电机的能耗超过设定值时，能耗均衡算法会将多余的能量传递至其他电机上，以达到系统能耗平衡的目的，如表 3 所示。

表 3 能耗分配对比表

算法/指标	A	B	C	D	Frag/份	效果/%
无	202	173	127	186	75	81.4
能耗均衡	204	198	208	194	14	99.7

从上表可以看出，比较了无能耗分配和能耗均衡两种情况下，不同算法对系统能耗的分配情况。其中，A、B、C、D 表示四个电机的能耗值，Frag/份表示每份碎片的大小，效果/%表示能耗均衡算法相对于无能耗分配的效果提升率。

1. 无能耗分配情况下，四个电机的能耗值分别为 202、173、127、186，存在一定的不均衡。每份碎片的大小为 75，效果为 81.4%。
2. 能耗均衡情况下，四个电机的能耗值得到均衡分配，分别为 204、198、208、194，能耗均衡效果达到了 99.7%。可以看出，通过能耗均衡算法进行能量的合理分配，可以使得电机的能耗值之间得到更好的平衡，从而提高系统能源的利用效率。

进一步地，所述权益选择算法的工作方法为：首先将初次故障难度值设置为 0，以便于节点产生新解决措施，然后节点通过计算故障答案来获取添加新解决措施的权利，新解决措施的哈希值满足电机正常运行要求，在检测到信任节点发现异常就通过多次协商达成一致并在短时间内完成，以确认添加新解决措施，接着在收集到足够的新解决措施之后，节点必须在这些新解决措施之间进行选择，最后根据每一次权益选择结果以及权益选择时间的长短调整后续的故障难度值。

在具体实施例中，权益选择算法的伪代码实现为：

```
// 将初次故障难度值设置为 0
difficulty = 0
// 节点计算故障答案并产生新解决措施的权利
if (calculate_error() == true) {
    privilege = true
}
```

```
// 信任节点发现异常时，通过多次协商达成一致并在短时间内完成
if (detect_exception() == true) {
    for (i = 0; i < iterations; i++) {
        consensus = negotiate()
        if (consensus == true) {
            new_solution = generate_solution()
        }
    }
    add_solution(new_solution)
}

// 收集到足够的新解决措施之后，节点必须在这些新解决措施之间进行选择
if (collect_solutions() == true) {
    selected_solution = select_solution()
    // 根据每一次权益选择结果以及权益选择时间的长短调整后续故障难度值
    adjust_difficulty(selected_solution, selection_time)
}
```

虽然以上描述了本发明的具体实施方式，但是本领域的技术人员应当理解，这些具体实施方式仅是举例说明，本领域的技术人员在不脱离本发明的原理和实质的情况下，可以对上述方法和系统的细节进行各种省略、替换和改变。例如，合并上述方法步骤，从而按照实质相同的方法执行实质相同的功能以实现实质相同的结果则属于本发明的范围。因此，本发明的范围仅由所附权利要求书限定。

权利要求书

1. 一种串联电机的控制方法，其特征在于：包括如下步骤：
 - 步骤 1、将 n 台电机的轴线串联连接，采集每台电机基本参数；
通过旋转变压器获取每台电机基本参数，所述基本参数包括转轴角位移、角速度、转速和相电流；
 - 步骤 2、将获取的电机基本参数合成电压空间矢量参考值；
通过计算模块进行电压空间矢量参考值的计算；
 - 步骤 3、通过混合控制算法与电压空间矢量参考值得到期望电压输出矢量；
采用逆变模块获取期望电压输出矢量；
 - 步骤 4、实现轴串联各个电机的转速同步和负载均衡；
采用同步均衡模块实现轴串联的各个电机保持同步转速和均衡负载；
所述同步均衡模块包括转速同步单元和节能负载单元，所述转速同步单元采用反闭环转速算法实现轴串联的各个电机转速同步，所述节能负载单元采用能耗均衡算法根据每台电机的基本参数使轴串联各个电机的负载和能耗保持均衡，所述转速同步单元的输出端连接节能负载单元的输入端；
 - 步骤 5、实时监测轴串联各个电机的工作过程并及时应对突发状况；
采用监测反馈模块实现轴串联各个电机的实时监测和故障应对策略。
2. 根据权利要求 1 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述计算模块包括变换单元和调节单元，所述变换单元将获取的电机相电流实际值坐标变换为电机各轴的电流分量，所述调节单元采用 PID 算法将电机各轴的电流分量与零值的误差转换为电机各轴的电压分量，所述变换单元的输出端连接调节单元的输入端。
3. 根据权利要求 1 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述监测反馈模块包括故障诊断单元、策略防护单元、紧急制动单元和能量回馈单元，所述故障诊断单元采用异常检测算法将获取的每台电机基本参数和期望电压输出矢量值进行检测，所述策略防护单元通过权益选择算法进行故障解决处理方案的组合选取，所述紧急制动单元通过抱闸处理将故障电机进行紧急制动，所述能量回馈单元采用基于 FOC 和 MPPT 的混

合回馈算法将紧急制动后的能量进行恢复和再利用，所述故障诊断单元的输出端连接策略防护单元的输入端，所述策略防护单元的输出端连接紧急制动单元的输入端，所述紧急制动单元的输出端连接能量回馈单元的输入端。

4. 根据权利要求 1 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述逆变模块包括旋转静止单元和幅相定位单元，所述旋转静止单元通过 $6/2$ 和 $2s/2r$ 将电机各轴的电压分量旋转逆变到两相静止坐标系中的坐标轴分量，所述幅相定位单元采用混合控制算法计算两相静止坐标系中参考值的幅值和相位，并根据相位确定扇区和所需电压空间矢量，所述旋转静止单元的输出端连接幅相定位单元的输入端。
5. 根据权利要求 1 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述反闭环转速算法的工作方法为：首先根据反电动势、电机电感和电阻建立电机的数学模型，然后使用电机的反电动势预测电机的输出特性，并用于电流控制环，接着在电流控制环的基础上增加速度控制环，最后通过速度控制回路实时调整电机的输出转速。
6. 根据权利要求 4 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述混合控制算法的工作方法为：首先将实际电流值与目标电流值进行比较得到电流误差信号并作为 PWM 参考信号，然后将电源电压进行比较和采样以获取参考电压值和实际电压值的差值，再将该差值通过三角波进行调制形成 PWM 载波信号，最后将 PWM 参考信号和 PWM 载波信号进行比较和调节，使电流值始终保持在误差范围内。
7. 根据权利要求 1 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述能耗均衡算法的工作方法为：

首先将获取的每台电机基本参数化为矩阵形式，

$$X^* = U \sum G = U \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_m \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中， X^* 表示参数矩阵式， U 表示干扰矩阵， G 表示组合系数矩阵，

σ 表示主系数， G_m 表示组合效应值， m 表示列数；

将参数数据表面特征通过数据转换函数转化为深度特征，所述数据转换函数为：

$$Y^{\#} = \sqrt{X^*B + HT} \quad (2)$$

式(2)中， $Y^{\#}$ 表示数据深度特征， X^* 表示数据表面特征， B 表示转换参数， H 表示数据维度参数， T 表示误差调整参数；

将获取的数据深度特征经过 180 次的迭代训练以获取基本模型权重参数，并根据实时数据进行预测识别，识别函数表示为：

$$E^V = TH \left(Y^{\#} - X^* \sqrt{GB} \right)^V + Y^{\#} X^* B \quad (3)$$

式(3)中， E^V 表示实时数据与预测数据之间的关联性， V 表示调整周期；为避免训练过程中造成过拟合，对训练流程参数进行限制，限制函数表示为：

$$\hat{B} = \left(X^V X^* \right)^{-3} \sqrt{X^T + HY^{\#}} - \sqrt{X^T HY^{\#}} \quad (4)$$

式(4)中， $\hat{B}$ 表示训练流程参数限制变量， X^V 表示训练周期内对训练流程捕捉信息， X^T 表示训练周期内数据动态信息；

通过对比两个相邻周期内负载和能耗的变化规律，判断训练流程参数权重是否达到最优，对比结果表示为：

$$\left\| \hat{X}^t - \hat{X}^{t-1} \right\|_F^V < \sqrt[4]{\varepsilon} \left\| \hat{X}^{t-1} \right\|_F^H \quad (5)$$

式(5)中， $\hat{X}^t$ 表示训练周期获取的参数信息， $\hat{X}^{t-1}$ 表示相邻周期收集的参数信息， ε 表示两个相邻周期差异系数。

8. 根据权利要求 3 所述的一种串联电机的控制方法，其特征在于：所述权益选择算法的工作方法为：首先将初次故障难度值设置为 0，以便于节点产生新解决措施，然后节点通过计算故障答案来获取添加新解决措施的权利，新解决措施的哈希值满足电机正常运行要求，在检测到信任节点发现异常就通过多次协商达成一致并在短时间内完成，以确认添加新解决措施，接着在收集到足够的新解决措施之后，节点必须在这些新解决措施之间进行选择，最后根据每一次权益选择结果以及权益选择时间

的长短调整后续故障难度值。