

基于混杂Petri网的共直流母线交流传动系统建模与节能控制

李继方^{1,2}, 汤天浩¹, 姚刚¹

(1. 上海海事大学物流工程学院, 上海 200135; 2. 开封大学, 河南 开封 475004)

摘要: 通过引入混杂系统理论, 在分析系统运行过程的基础上, 建立了共直流母线交流传动系统混杂Petri网模型和电机功率模型。在此基础上提出了一种基于配对理论的节能控制算法, 即在电机状态可调控时段, 通过改变随机运行状态, 使耗能状态激发与回馈状态激发模糊配对的电机状态调控算法。采用该方法的直流母线功率仿真结果表明, 该方法能有效地调整控制电机状态, 使处在耗能状态电机最大限度地吸收制动状态电机再生的电能, 减小了直流母线功率波动, 提高了系统性能。

关键词: 共直流母线; 交流传动; 混杂Petri网; 建模; 节能控制

Modeling and energy saving control for common DC bus AC drive system based on hybrid Petri nets

LI Ji-fang^{1,2}, TANG Tian-hao¹, YAO Gang¹

(1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;
2. Kaifeng University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: This paper introduces the hybrid system theory and establishes a common DC bus AC drive system hybrid Petri nets model and a motor power model based on the analysis of the system operation process. On this basis an energy saving control algorithm based on matching theory is proposed, namely the motor state adjusting algorithm which gets fuzzy pair of energy consumption state excitation and feedback state excitation through changing the random operation state in the controllable period of motor state. The results of simulation on DC bus power adopting this method show that it can effectively adjust and control the motor state, make the motor in energy consumption state absorb the electrical energy regenerated by motor in braking mode to a large extent, thus can reduce the DC bus power fluctuation and improve the system performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007056).

Key words: common DC bus; AC drive; hybrid Petri nets; modeling; energy saving control

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0001-06

0 引言

在工业系统中, 许多电气传动系统储存大量待释放的机械能, 如势能、动能负载器件的下降和减速等, 这都会使电机处于制动发电状态。以往研究表明, 这部分制动再生的电能非常大, 例如采油系统中, 抽油机电机有33.67%的时间处于发电状态, 发电电量占总用电量的12.85%^[1]。为了回收和利用这部分巨大的再生电能, 人们提出了共用直流母线节能的方法^[2], 如图1所示。该方法通过共用直流母线, 使处在制动发电状态电机所产生的再生电能被处在耗能状态电机吸收, 既消耗了再生电能, 又

达到了节能目的。但是该方法存在着再生电能不能被耗能状态电机完全吸收条件下, 直流母线电压升高, 设备无法正常运转或损坏等问题。该问题的常规解决方法是在直流母线上接入耗能电阻或回馈装置, 通过其消耗或回馈不能被耗能状态电机完全吸收的再生电能, 保证设备的正常工作。但是电阻耗能的方法节能效果不好^[3]; 回馈电网的方法对电网有污染, 只能用在电网电压波动不大的场合^[4-5]。为此建立共直流母线交流传动系统的模型, 开展系统理论及节能控制算法研究就显得尤为重要。

共直流母线交流传动系统中, 既有连续状态变量, 又有离散状态变量, 是一个典型的混杂系统, 混杂系统理论已成为当前研究中一个新热点^[6]。全庆贻、刘凯等开展了混杂系统理论在电力系统中的应用研究^[7-8]。针对混杂电力系统的建模问题, 胡宗波、马皓、郑雪生等分别建立了DC-DC变换器、

基金项目: 国家自然科学基金(51007056); 上海市教委项目(J50602); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2010GGJS-263); 上海海事大学博士生创新基金(yc2009104)

DC-AC 变换器的混杂系统模型,并分析了系统的可观性、可控性及预测控制等^[9-11]。混杂 Petri 网主要用制造系统的建模与控制,赵洪山等人把混杂 Petri 网建模技术引入混杂电力系统,建立了基于可编程赋时 Petri 网的混杂电力系统模型,并给出了建立模型的方法和步骤^[12]。针对节能调度的研究,陈楷、温丽丽等分别建立了河南电网 AGC 节能控制策略和混合系统的中长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟^[13-14]。而对共直流母线交流传动系统的建模及节能控制算法的研究较少。

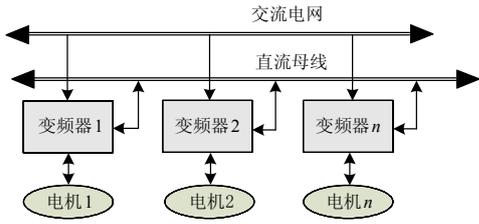


图 1 共直流母线交流传动系统

Fig.1 The common DC bus AC drive systems

分析共直流母线交流传动系统中电机的运行过程,我们发现电机在各个状态的运行时间,不论是相同工况,还是不同工况,为按指数概率分布的随机值,因此文章引入混杂系统理论,建立系统的随机赋时混杂 petri 网模型。针对此模型,提出一种节能控制算法,仿真研究了系统的直流母线功率。仿真结果表明该算法能有效地调整控制电机状态,使处在耗能状态电机最大限度地吸收制动状态下电机产生的再生电能,减小了直流母线功率波动,提高了系统的性能。

1 系统混杂 Petri 网模型

1.1 混杂随机 Petri 网

混杂 Petri 网^[15] (Hybrid Petri Nets, HPN) 是通过在离散型 Petri 网系统中引入连续状态演变出的。HPN 将位置和变迁区分为连续的和离散两种类型,表征系统的连续变量量子过程和离散变量量子过程。

一个混杂 Petri 网系统是一个六元组 H :

$$H = \{Q, T, I, O, D, V\} \quad (1)$$

其中: $Q = Q^d + Q^c$ 为库所的非空有限集合,分为离散库所集 Q^d 和连续库所集 Q^c ; $T = T^d + T^c$ 为变迁的非空有限集合,也分为离散变迁集 T^d 和连续变迁集 T^c ; 且满足关系 $Q \cap T = \phi$, ϕ 为空集。 I 为输入权函数,具有关系 $I: Q^d \times T \rightarrow R^+$, $Q^d \times T \rightarrow N_0$;

O : 输出权函数,具有关系 $O: T \times Q^c \rightarrow R^+$, $T \times Q^d \rightarrow N_0$, 其中 R^+ 表示非负实数集合, N_0 为非负整数集合。 $D: T \rightarrow R^+$, 时间离散变迁的赋时 d_j , 是随指数分布的随机时间。 $V: V(T_j) = (V_j', V_j)$, $V_j' \leq V_j$, V_j' 、 V_j 分别表示最小激发和最大激发速率, 本文取 $V_j' = 0$ 。HPN 的图形表示如图 2 所示。

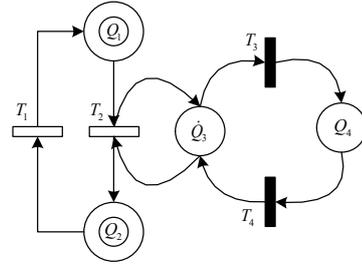


图 2 混杂 Petri 网

Fig.2 Hybrid Petri nets

1.2 系统混杂随机 Petri 网模型

对于共直流母线交流传动系统不论是由多台变频器组成,还是由多个整流装置(可控或不可控整流)、变流器和电机组成,直流母线功率主要受控于系统内部电机的状态和功率。直流母线为耗能电机供电,同时吸收制动电机再生的电能,直流母线为连续库所,记为 Q^c ; 若系统中有 n 台电机, n 台电机的耗能和馈能是 $2n$ 个连续变迁,记为 $T^c = \{T_{21}^c, T_{41}^c, T_{22}^c, T_{42}^c, \dots, T_{2n}^c, T_{4n}^c\}$ 。在不同工况下,电机具有不同的状态数,为使模型具有一般性,取电机有四个状态:(1)等待从直流母线上吸收电能(待耗);(2)从直流母线上吸收功率(耗能);(3)等待回馈能量到直流母线(待馈);(4)回馈能量到直流母线(馈能)。第 i 台电机的四个状态是四个离散库所 $Q_{1i}^d, Q_{2i}^d, Q_{3i}^d, Q_{4i}^d$, 四个库所中只有一个托肯,状态之间的相互转换是四个离散变迁 $T_{1i}^d, T_{2i}^d, T_{3i}^d, T_{4i}^d$, 因此共直流母线交流传动系统的混杂 Petri 网模型如图 3 所示。

系统的动态由状态标识 $m(\tau)$ 来表征,分为离散状态标识 $m^d(\tau)$ 和连续状态标识 $m^c(\tau)$ 。离散状态标识 $m^d(\tau)$ 为:

$$m^d(\tau) = [m_{1i}^d(\tau), m_{2i}^d(\tau), \dots, m_n^d(\tau)] \quad (2)$$

其中

$$m_i^d(\tau) = [m_{1i}^d(\tau), m_{2i}^d(\tau), m_{3i}^d(\tau), m_{4i}^d(\tau)] \quad (3)$$

为第 i 台电机 τ 时刻的状态标识。系统只有一个连续库所 Q^c , 即直流母线,其连续状态标识为:

$$m^c(\tau) = E(\tau) \quad (4)$$

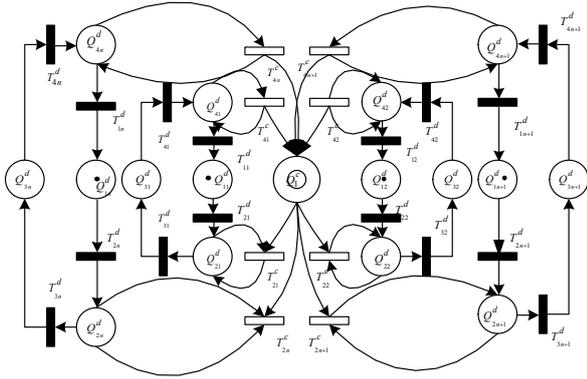


图3 共直流母线交流传动系统混杂 Petri 网模型

Fig.3 Hybrid petri nets model for the common DC bus AC drive systems

系统的动作变化通过变迁完成, 对 $\forall T_j \in T^d$, 其随机赋时为 d_j , n 台电机变迁的赋时向量 \mathbf{d} 为:

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n] \quad (5)$$

其中

$$d_i = [d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}, d_{4i}] \quad (6)$$

为第 i 台电机的随机赋时, 随机变迁 T_{ki} 对应的赋时为 d_{ki} , $k = \{1, 2, 3, 4\}$ 。

对于离散变迁 T^d , 若 $\forall Q_j \in T^d: m_j(\tau) = 1$ 且该时间等于库所赋时时, 变迁 T^d 使能, 托肯被移出, $m_j(\tau) = 0$ 。对于连续变迁 T^c , 若 $\forall Q_j \in T^c: m_j(\tau) = 1$, 该变迁使能; 若 $\forall p_j \in T^c: m_j(\tau) = 0$, 该变迁未使能。

对于 $\forall T_j \in T^c$ 变迁使能时, 瞬时激发速率 $v_j(\tau)$ 也就是此时电机耗电功率或回馈功率。设 τ 时刻 n 台电机的瞬时激发向量 $\mathbf{v}(\tau)$ 表示为:

$$\mathbf{v}(\tau) = [v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, v_n(\tau)] \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{v}_i(\tau) = [v_{2i}(\tau), v_{4i}(\tau)] \quad (8)$$

为第 i 台电机 τ 时刻的瞬时激发速率。本文不定义强使能和弱使能, 变迁未使能时, 瞬时激发速率 $v_{2i}(\tau) = 0$, $v_{4i}(\tau) = 0$; 变迁使能时, $v_{2i}(\tau)$ 为电机瞬时激发耗电功率, $v_{4i}(\tau)$ 为瞬时激发回馈电功率。

单位直流母线的动态变化由其标识 $E(\tau)$ 变化来表征, 如果变迁 $T_j \in T^c$ 在 τ 时刻瞬时激发速率 (电机耗电或回馈功率) 为 $v_j(\tau)$, 则库所 Q_1^c 的标识随时间的变化 (即直流母线功率) 表示为:

$$P(\tau) = \frac{dE(\tau)}{d\tau} = \sum_{T_j \in T^c} C(Q, T_j) v_j(\tau) \quad (9)$$

其中, $C(Q, T_j) = 1$ 是关联矩阵中的一个元素。如果

系统中有 n 台电机, 直流母线的功率为:

$$P(\tau) = \frac{dE(\tau)}{d\tau} = \sum_{i=1}^n (v_{2i}(\tau) + v_{4i}(\tau)) \quad (10)$$

由式 (10) 可见, 共直流母线交流传动系统的混杂 Petri 网模型与其物理背景吻合, 因而混杂 Petri 网的动态变化能够充分体现系统的动态变化。只需计算出电机瞬时耗电功率 $v_{2i}(\tau)$, 瞬时回馈电功率 $v_{4i}(\tau)$, 即可得到直流母线功率的动态变化。

2 电机系统功率模型

为便于分析, 把电机、变流器以及电机拖动的机械传动设备视为一个整体, 记为电机系统。

2.1 电机系统回馈功率

电机处在制动回馈状态, 即 T_{4i}^d 变迁使能时, 电机系统的功率流向图如图 4 所示。

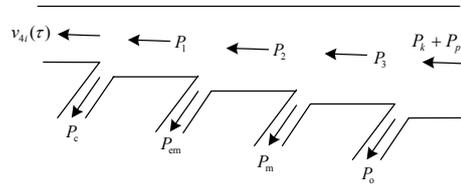


图4 回馈状态电机系统能量流向图

Fig.4 Graph of motor system energy flowing in feedback state

图中: $v_{4i}(\tau)$ 为第 i 个电机系统在 τ 时刻的回馈功率; $P_1(\tau)$ 为电机回馈功率; $P_2(\tau)$ 为输入电机功率; $P_3(\tau)$ 为输入机械功率; $P_0(\tau)$ 为输出机械消耗功率; $P_c(\tau)$ 为变频器损耗功率; P_{em} 为电机损耗功率; P_m 为机械损耗功率; $P_k(\tau) + P_p(\tau)$ 为动能和势能消耗功率。设变频器效率为 η_c , 机械传动效率为 η_m , 则有:

$$P_2(\tau) = \eta_m P_3(\tau) = \eta_m (P_k(\tau) + P_p(\tau) - P_0(\tau)) \quad (11)$$

$$v_{4i}(\tau) = \eta_c P_1(\tau) \quad (12)$$

对 i 个电机系统, 被拖动对象的转动惯量 J_m 为:

$$J_m = \alpha m \quad (13)$$

式中: m 为被拖动对象的质量; α 为系统的传动计算系数。

在 τ 时刻, 电机系统消耗动能的转矩 $T_k(\tau)$ 为:

$$T_k(\tau) = -(J_c + \alpha m) \frac{d\omega_m(\tau)}{d\tau} \quad (14)$$

式中: $\omega_m(\tau)$ 为电机转子的机械角速度; J_c 为电机系统自身转动惯量。那么电机系统动能消耗功率 $P_k(\tau)$ 为:

$$P_k(\tau) = -(J_c + \alpha m) \omega_m(\tau) \frac{d\omega_m(\tau)}{d\tau} \quad (15)$$

在 τ 时刻, 电机系统消耗势能转矩为 $T_p(\tau)$:

$$T_p(\tau) = J_m g \sin \theta = \alpha m g \sin \theta \quad (16)$$

式中, θ 为与水平面的夹角。那么消耗势能功率为 $P_p(\tau)$:

$$P_p(\tau) = \alpha m g \sin \theta \omega_m(\tau) \quad (17)$$

本文采用如图 5 所示电机简化等效电路模型^[16]。

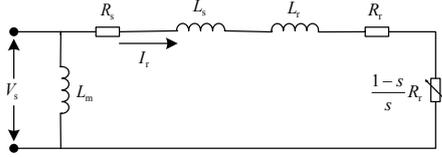


图 5 电机简化等效电路模型

Fig.5 Simplified equivalent circuit model of motor

图中: V_s 为定子侧电压; R_s 是定子侧电阻; L_s 是定子侧电感; L_r 是转子侧电感; R_r 是转子侧电阻; L_m 是定子侧磁化电感; s 是转差率。那么输入电机功率 $P_2(\tau)$ 为:

$$P_2(\tau) = 3I_r^2 \frac{1-s}{s} R_r = \eta_m (P_k(\tau) + P_p(\tau) - P_o) \quad (18)$$

忽略励磁损耗, 可得电机回馈功率 $P_1(\tau)$ 为:

$$P_1(\tau) = \left(\frac{1}{1-s} + \frac{s}{1-s} \frac{R_s}{R_r} \right) P_2(\tau) \quad (19)$$

那么电机系统回馈功率 $v_{2i}(\tau)$ 为:

$$v_{2i}(\tau) = \eta_c P_1(\tau) = \eta_c \left(\frac{1}{1-s} + \frac{s}{1-s} \frac{R_s}{R_r} \right) P_2(\tau) \quad (20)$$

将式 (18) 带入式 (20), 得到:

$$v_{2i}(\tau) = \eta_c \eta_m \left(\frac{1}{1-s} + \frac{s}{1-s} \frac{R_s}{R_r} \right) (P_k(\tau) + P_p(\tau) - P_o) \quad (21)$$

式中: $P_k(\tau)$ 、 $P_p(\tau)$ 是式 (15) 和式 (17)。

2.2 电机系统耗电功率

电机处在电动耗能状态时, 电机系统的能量流程可用如图6所示的功率流向图来表示。

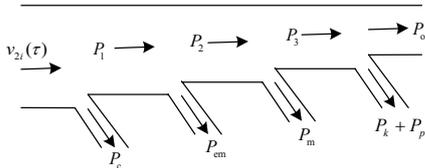


图6 电动状态电机系统能量流向图

Fig.6 Graph of motor system energy flowing in motoring state

图中: $v_{2i}(\tau)$ 为第 i 个电机系统在电动耗能状态时的耗电功率; P_1 为电机输入功率; P_2 为电机输出

功率; P_3 为输出机械功率; P_o 为输出机械消耗功率; P_c 为变频器损耗功率; P_{cm} 为电机损耗功率; P_m 为机械损耗功率; $P_k + P_p$ 为转化为动能和势能的功率。

类似于式 (21) 的推导过程, 可得:

$$v_{2i}(\tau) = \frac{1}{\eta_c} \frac{1}{\eta_m} \left(\frac{1}{1-s} + \frac{s}{1-s} \frac{R_s}{R_r} \right) (P_k(\tau) + P_p(\tau) + P_o) \quad (22)$$

其中:

$$P_k(\tau) = (J_e + \alpha m) \omega_m(\tau) \frac{d\omega_m(\tau)}{d\tau} \quad (23)$$

$$P_p(\tau) = \alpha m g \sin \theta \omega_m(\tau) \quad (24)$$

3 节能控制算法

共直流母线交流系统的性能主要体现在直流母线的功率曲线上, 分析不同工况下系统的工作过程, 可以发现如果同一系统中不同电机的功率相近 (或加权后近似相等), 当耗能状态电机数与馈能状态电机数近似相等, 待耗状态电机数与待馈状态电机数近似相等, 即耗能状态电机与馈能状态电机、待耗状态电机与待馈状态电机配成电机对时, 根据能量守恒可知, 系统中电机耗电总功率一定大于电机回馈总功率, 耗能状态电机能完全吸收制动电机所产生的再生电能, 系统始终耗能不回馈电能, 系统节能效果最好。工况不同, 系统中可调整控制的库所和变迁也不相同, 系统的节能控制可通过延长离散库所 (或变迁) 随机赋时的时间来实现。通过延时库所或变迁的赋时, 调整电机耗能或馈能的激发时间, 改变电机运行状态, 使耗能状态电机与馈能状态电机、待耗状态电机与待馈状态电机相对配对出现, 保证系统始终耗能, 提高系统性能。

设第 i 台电机处在可调控时段, 当前状态电机数为 X , 互为配对状态电机数为 Y , 控制裕度为 ε , 库所或变迁的延时为 $\Delta\tau_i$ 。具体步骤如下:

(1) 如果 $Y - \varepsilon \leq X + 1 \leq Y + \varepsilon$ 成立, 令 $\Delta\tau_i = 0$, 变迁激发;

(2) 如果当前时延大于 $\Delta\tau_i$, 变迁激发;

(3) 如果当前时延小于 $\Delta\tau_i$, 重复步骤 (1)、

(2)。

$\Delta\tau_i$ 的计算方法。设共直流母线交流传动系统中有 n 台电机, 电机在其所有状态的平均周期为 C_{AV} , 每台电机与第一个电机的时间间隔分别是 $\tau_k (k=1, 2, \dots, n-1)$ 。若 t 时刻第 i 台电机处在可调控时段, 以第 $i-1, i+1, \dots, i+j$ 台电机运行状态对第 i 台电机进行调控。设每次调控时间为

$\Delta\tau_l (l=1, \dots, j)$, 则第一次调控后, 电机时间间隔的方差 D_1 为:

$$D_1 = \left((C_{AV} - \tau_{n-1}) - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \sum_{k \neq i-2, k \neq i-1}^{n-1} \left(\tau_{k+1} - \tau_k - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \left((\tau_{i-1} - \tau_{i-2}) + \Delta\tau_i - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \left((\tau_i - \tau_{i-1}) - \Delta\tau_i - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 \quad (25)$$

第 j 次调控后 D_j 为:

$$D_j = \left(C_{AV} - \tau_{n-1} - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \sum_{k \neq i-2, \dots, k \neq i+j-1}^{n-2} \left(\tau_{k+1} - \tau_k - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \left(\tau_{i-1} - \tau_{i-2} + \Delta\tau_1 - \frac{D_m}{n} \right)^2 + \left(\tau_{i+j-1} - \tau_{i+j-2} - \Delta\tau_j - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 + \sum_{l=1}^{j-1} \left(\tau_{i+l-1} - \tau_{i+l-2} - \Delta\tau_l + \Delta\tau_{l+1} - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 \quad (26)$$

电机时间间隔的方差变化量 ΔD 为:

$$\Delta D = \sum_{k=i-2}^{i+j-1} \left(\tau_{k+1} - \tau_k - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 - \left(\tau_{i-1} - \tau_{i-2} + \Delta\tau_1 - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 - \left(\tau_{i+j-1} - \tau_{i+j-2} - \Delta\tau_j - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 - \sum_{l=1}^{j-1} \left(\tau_{i+l-1} - \tau_{i+l-2} - \Delta\tau_l + \Delta\tau_{l+1} - \frac{C_{AV}}{n} \right)^2 \quad (27)$$

令 $\partial \Delta D / \partial \Delta\tau_k = 0 (k=1, 2, \dots, j)$, 解得 $\Delta\tau_i$ 为:

$$\Delta\tau_i = \Delta\tau_1 = \frac{\tau_{i+j-1} + \tau_{i-2}}{j+1} - \tau_{i-1} \quad (28)$$

4 仿真研究

在工程实际中, 不同工况下电机工作的状态数目和不同时刻同一状态的持续时间都不相等, 只在一定范围内符合指数分布规律。运用 Matlab 仿真软件, 编写上述模型仿真程序, 对系统进行仿真研究。仿真中设电机有四个工作状态, 其调控时段为待耗向耗能激发和待馈向馈能激发两个时段, 电机状态持续时间 (离散库所随机赋时) 取值服从分布密度函数:

$$p(d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(d_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

其中, μ 、 σ 为均值和方差向量。

取仿真参数: $\eta_m = 60\%$, $\eta_c = 98\%$, $P_o = 0$, $P_k = 0$, 被拖动对象的质量 m 取均值为 1.5×10^4 kg, 方差为 5×10^3 的正态分布, 被拖动对象位移 20 m, 夹角 $\theta = 90^\circ$ 。 $\mu = [3.5, 3, 3.5, 3]$, $\sigma = [0.4, 0.5, 0.4, 0.5]$ 。

考虑到电机数目对系统的影响, 采用有 8 台电

机和 25 台电机的共直流母线系统仿真研究直流母线功率, 如图 7 所示。

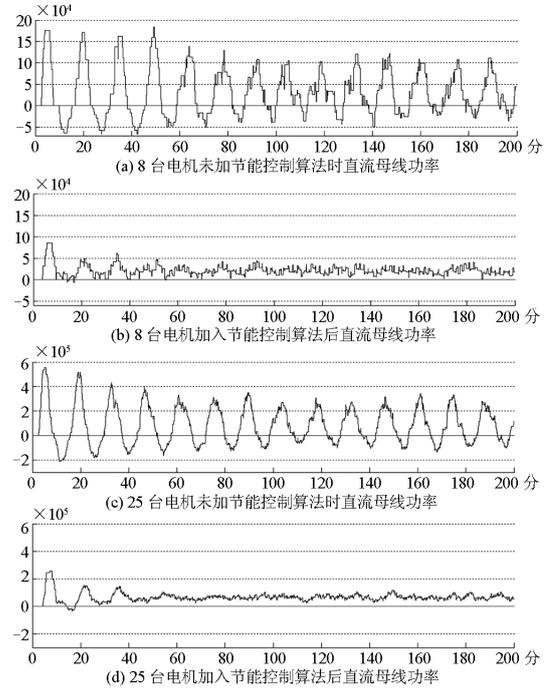


图 7 共直流母线功率曲线

Fig.7 The power of common DC bus

图 7(a)、(c) 为未加入节能控制算法时 8 台和 25 台电机共直流母线功率。系统启动时, 电机系统以正态分布概率, 在一个相对短的时间段内, 集中耗能或回馈电能到直流母线, 因此直流母线功率波动幅度很大, 分别在 $-6 \times 10^4 \sim 17 \times 10^4$ 和 $-2 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5$ 之间。随着系统运行时间的增长, 电机状态的离散性增强, 直流母线功率波动幅度有所减少, 但仍保持较大波动幅度, 8 台电机和 25 台电机直流母线功率分别位于 $-4 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ 和 $-1.6 \times 10^5 \sim 3.2 \times 10^5$ 之间。系统直流母线功率小于零时, 说明此时耗能状态电机不能完全吸收制动状态电机所产生的再生电能, 必须采取措施 (电阻消耗或回馈电网) 处理不能被耗能状态电机完全吸收的再生电能, 否则引起直流母线电压升高, 造成设备无法正常运行或损坏。

图 7(b)、(d) 为加入节能控制算法后 8 台和 25 台电机共直流母线功率。系统刚启动时, 由于电机集中耗能或集中回馈, 直流母线功率仍有小于零现象、需要电阻消耗或回馈电网。随着运行时间增长, 直流母线功率波动幅度明显减小, 8 台电机和 25 台电机的直流母线功率波动幅度逐步收敛在 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 和 $0.4 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^5$ 之间, 与未加入节能控制算法时相比, 功率波动幅度降低了约 3.2

倍；而且直流母线功率一直大于零，说明耗能状态电机能完全吸收制动状态电机所产生的再生电能，系统一直耗能，不再需要电阻消耗或回馈电网，最大限度地节约了电能，保证了设备的可靠运行，验证了算法的有效性。

5 结论

文章在分析共直流母线交流传动节能系统运行特点的基础上，利用混杂系统理论，建立了系统混杂Petri网模型，提出了基于配对理论的节能控制算法。仿真结果显示，该节能控制算法能有效调整电机工作状态，使耗能状态电机完全吸收制动状态电机再生的电能，最大限度地节约了电能；同时减少了直流母线功率波动幅度，提高了系统性能。

参考文献

[1] 赵智, 鲍兵, 赵中山, 等. 基于采油系统的公共直流母线变频器结构分析及应用[J]. 电气应用, 2008,14: 24-26.
ZHAO Zhi, BAO Bing, ZHAO Zhong-shan, et al. Analysis and application for structure of converter common DC bus based on oil recovery system[J]. Electrotechnical Application, 2008, 14: 24-26.

[2] 王万新. 公共直流母线在交流传动中的应用[J]. 电气传动, 2002, 5: 57-58.
WANG Wan-xin. Application of common DC bus in AC drives[J]. Electric Transmission, 2002, 5: 57-58.

[3] 王云飞, 杨耕. 通用变频器-感应电机系统的电机耗能型制动控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 87-92.
WANG Yun-fei, YANG Geng. Power loss braking method for general inverter-fed induction motor drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 12-18.

[4] 刘永峰, 谢吉华. 变频器回馈制动研究[J]. 变频器世界, 2008, 8: 52-54.
LIU Yong-feng, XIE Ji-hua. Research on feed-break in frequency converter[J]. The World of Inverters, 2008, 8: 52-54.

[5] Botan C, Horga V, Ostafi F, et al. General aspects of the electrical drive systems optimal control[C]. //2007 European Conference on Power Electronics and Applications, 2007: 1-10.

[6] Goebel Rafal, Sanfelice Ricardo G, Teel R. Hybrid dynamical systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009: 28-93.

[7] 刘凯, 彭志炜, 黄忠. 基于混和逻辑动态模型的混杂电力系统及其电压稳定性分析方法研究[J]. 继电器, 2008, 36(10): 15-18.
LIU Kai, PENG Zhi-wei, HUANG Zhong. Research on

hybrid power system and its voltage stability based on mixed logic dynamic model[J]. Relay, 2008, 36(10): 15-18.

[8] 全庆贻, 颜钢锋. 混杂系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003,15(2): 14-19.
TONG Qing-yi, YAN Gang-feng. Hybrid system and its application in power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(2): 14-19.

[9] 郑雪生, 李春文, 戎袁杰. DC/AC变换器的混杂系统建模及预测控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 87-92.
ZHENG Xue-sheng, LI Chun-wen, RONG Yuan-jie. Hybrid dynamic modeling and model predictive control for DC/AC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 87-92.

[10] 胡宗波, 张波, 邓卫华, 等. PWM DC/DC 变换器混杂动态系统的能控性和能观性[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 76-82.
HU Zong-bo, ZHANG Bo, DENG Wei-hua, et al. Controllability and observability of PWM DC/DC converters as hybrid dynamic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 76-82.

[11] 马皓, 祁峰, 张霓. 基于混杂系统的 DC-DC 变换器建模与控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 92-96.
MA Hao, QI Feng, ZHANG Ni. Modeling and control for DC-DC converters based on hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 92-96.

[12] 赵洪山, 米增强, 牛东晓, 等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(1): 20-25.
ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NIU Dong-xiao, et al. Power system modelling using hybrid system theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 20-25.

[13] 陈楷, 孙建华, 王卉. 节能调度模式下的河南电网 AGC 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 58-61.
CHEN Kai, SUN Jian-hua, WANG Hui. The AGC strategy of Henan power grid for energy-saving dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 58-61.

[14] 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中、长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 24-29.
WEN Li-li, LIU Jun-yong. Monte carlo simulation of medium and long-term generation plan in hybrid power system based on environmental/economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 24-29.

[15] 廖伟志, 古天龙. 基于一种新型混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 366-372.

(下转第 11 页 continued on page 11)

型扰动下不误动作,性能优良,适用性较强。

参考文献

- [1] 殷贵梁,孙美玲,肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30 (1): 1-6.
YIN Gui-liang, SUN Mei-ling, XIAO Li-ping. Review of island detection methods of distributed generation[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30 (1): 1-6.
- [2] 张纯江,郭忠南,孟慧英. 主动电流扰动法在并网发电系统孤岛检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (7): 176-180.
ZHANG Chun-jiang, GUO Zhong-nan, MENG Hui-ying. Active current disturbing method for islanding detection of grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (7): 176-180.
- [3] IEEE Std. 1547-2003 IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2003.
- [4] 曹海燕,田悦新. 并网逆变器孤岛控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (9): 72-74.
CAO Hai-yan, Tian Yue-xin. Islanding control for grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (9): 72-74.
- [5] 顾和荣,赵清林,伞国成,等. 三相逆变器有源孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12): 44-47.
GU He-rong, ZHAO Qing-lin, SAN Guo-cheng, et al. Active islanding detection for three phase grid connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (12): 44-47.
- [6] 高金辉,李迎迎,苏军英. 一种新颖的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (19): 122-125.
GAO Jin-hui, LI Ying-ying, SU Jun-ying. The research on a novel islanding detection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (19): 122-125.
- [7] Zeineldin H H, Kirtley J L. Islanding operation of inverter based distributed generation with static load models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008: 1-6.
- [8] Ye Z, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1171-1176.
- [9] Katiraei F, Iravani M R, Lehn P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 248-257.
- [10] Peferrn M A, Usta O, Fielding G. Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3): 948-954.
- [11] Mozina C J. Interconnection protection of IPP generators at commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (3): 681-689.
- [12] 丁磊,潘贞存,苏永智,等. 并网分散电源的解列与孤岛运行[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (7): 25-28.
DING Lei, PAN Zhen-cun, SU Yong-zhi, et al. Splitting and islanding of networked dispersed generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (7): 25-28.
- [13] 陈为民,陈国呈,崔开勇,等. 分布式并网发电系统在孤岛时的运行控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 88-91.
CHEN Wei-min, CHEN Guo-cheng, CUI Kai-yong, et al. Running control of grid-connected dispersed generation systems in islanding situation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (9): 88-91.
- [14] 曾议,吴政球,刘杨华,等. 分布式发电系统孤岛检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (3): 106-110.
ZENG Yi, WU Zheng-qiu, LIU Yang-hua, et al. Islanding detection method for distributed generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21 (3): 106-110.
- [15] IEEE Std 929-1000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic systems[S].

收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-05-31

作者简介:

贺眉眉(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向是分布式发电,电压稳定及控制,电能质量; E-mail: 626680811@qq.com

李华强(1965-),男,教授,主要研究方向为电压稳定,电力系统无功优化控制;

甘立勇(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量,谐波分析。

(上接第6页 continued from page 6)

LIAO Wei-zhi, GU Tian-long. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 366-372.

- [16] Bose B K. Modern power electronics and AC drives[M]. USA: Prentice Hall PTK, 2002.

作者简介:

李继方(1971-),男,博士研究生,副教授,研究方向为电力传动与智能控制; E-mail: ljf538@163.com

汤天浩(1955-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力传动与智能控制。

收稿日期: 2010-11-08; 修回日期: 2010-12-23