

三相异步电机的新型能耗制动研究

王秋晓 陈安科*

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:分析了异步电机能耗制动的理论基础。根据异步电机制动原理,对异步电机的能耗制动进行了改进,设计出了新的能耗制动方案;并利用 matlab/simulink 仿真工具,建立了三相异步电动机能耗制动过程的仿真模型;根据定子转子瞬间冲击电流的幅值和瞬间冲击转矩的幅值,以及制动时间的要求,通过电机在不同负载转矩、不同负载转动惯量,以及接不同限流电阻等情况下的实例仿真和对比研究,验证了新型能耗制动的可行性。新型能耗制动系统减小了异步电机能耗制动系统的生产和维护成本,提高了系统稳定性。

关键词:能耗制动;异步电机;Matlab

中图分类号:TM343+.2 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2013.02.002

Researches on New Energy Losses Braking of Three-phase Asynchronous Motor

WANG Qiuxiao CHEN Anke*

(Machinery Engineering College, Chongqing university, Chongqing 400044)

Abstract: The theoretical basis of the energy losses braking of asynchronous motor is analyzed. According to the principle of asynchronous motor braking, the energy losses braking of asynchronous motor is improved, with a new energy losses braking plan designed. Using matlab/simulink tool, a simulation model of the three-phase asynchronous motor energy losses braking process is established. According to the instant impact current amplitude of both stator and rotor, the instant impact torque amplitude and the braking time requirements, the feasibility of a new kind of energy losses braking is verified through the example simulation and contrast studies of the motor when it works in the situations of different load torque, different load inertia and different current-limiting resistance. In the new energy losses braking system, the production and maintenance costs are reduced, with the stability improved.

Key words: energy losses braking; asynchronous motor; Matlab

1 引言

能耗制动具有制动准确可靠、制动转矩平滑、对电网无冲击等优点,在各个领域有着广泛的应用^[1-4]。传统的三相异步电机能耗制动,电动机脱离三相交流电源之后,通过在二相定子绕组接上直流电源,使定子和转子之间的磁隙中产生静止磁场,惯性转动导体切割该磁场,形成感应电流,利用转子感应电流与静止磁场的作用达到制动的目的^[5-7]。制动是电力拖动系统的重要组成部分,随着电力拖动技术的不断发展和进步,在制动系统方面,不但要求设备设计合理化和简单化,还要求尽量减少生产和维护成本。在实际能耗制动中,二相绕组间通入的直流电源由变压器变压后提供,但由于制动过程产生的冲击电流过大,变压器功率不足,导致变压器烧坏。变压器的维护和更换增加了制动系统的生产和维护成本,针对这种情况,采用去掉变压器,增大低成本的限流电阻的方法来代替传统制动方法。本文分析了异步电机的工作原理和能耗制动的理论基础,根据电机制动原理,设计出新的能耗制动方案。并利用 matlab/simulink 仿真工具,建立了三相异步电动机能耗制动过程的仿真模型。最后基于上述模型,在不同负载转矩、不同负载转动惯量、和接不同限流电阻情况下通过实例仿真和对比研究,验证新型能耗制动的可行性。

2 异步电机制动原理和数学模型

2.1 异步电机传统能耗制动原理

异步电动机在运行状态时,断开 KM1,将定子绕组断开三相交流电源,同时闭合 KM2,通过变压器 T 在定子两相绕组内接上直流电源,电机进入能耗制动状态,如图 1 所示^[8]。当定子绕组拉开三相交流电,通入直流电时,定子磁场变为固定不动的恒定磁场。转子由于惯性仍顺时针方向旋转。转子导体切割磁场产生的感应电势和感应电流的方向与电动状态时相反,从而使电动机产生的电磁转矩与电动状态时

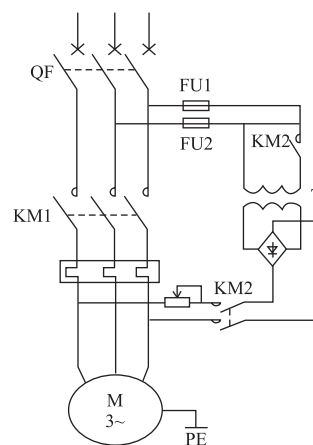


图 1 异步电机传统能耗制动系统

Figure 1 Traditional Energy Losses Braking of the Asynchronous motor system

* E-mail:409276696@qq.com; Tel:13618397134

相反,即 T 为逆时针方向,这时 T 与 n 方向相反,故为制动状态。当转速 $n=0$ 时, $T=0$,电动机不再产生电磁转矩,从而能准确停车。

2.2 异步电机新型能耗制动系统

但是在实际工作中,由于变压器上的电流过大,常常造成变压器损坏。根据异步电机能耗制动原理,将变压器去掉,采用增大制动电阻 R 的阻值和功率的办法,来解决这一问题。改进后的异步电机能耗制动电路图,如图 2 所示。

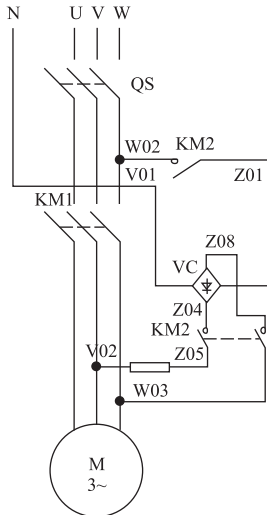


图2 异步电机新型能耗制动系统
Figure 2 New Energy Losses Braking of the Asynchronous motor system

2.3 异步电机能耗制动的数学模型

异步电机进入制动状态,设通入的直流电压为 U。其磁动势向量图如图 3 所示^[9]。

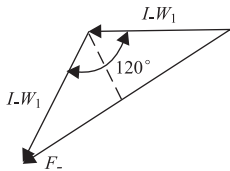


图3 磁动势向量
Figure 3 Vector MMF

三相绕组内通过三相交流电时,任意两相合成磁动势

$$F_{-} = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 W_1 \tag{1}$$

令 $F_{-} = F_{-}$,则与直流磁动势 F_{-} 等效的三相交流电 I_1 为

$$I_1 = \frac{\sqrt{2} F_{-}}{3 W_1} \tag{2}$$

又 $F_{-} = 2 I_{-} W_1 \cos 30^{\circ} = \sqrt{2} I_{-} W_1$,代入式(2),得

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{-} \tag{3}$$

异步电动机能耗制动的电流向量图如图 4 所示^[5]。各电流之间的关系为

$$I_1^2 = I_2'^2 + 2 I_m I_2' \sin \varphi_2 + I_m^2 \tag{4}$$

假设,在同步转速 n_0 下,转子每相电抗与感应电势分别为 X_2 和 E_2 ,则在转速 n 下的每相电抗和感应电势分别为 X_{2n}/n 和 E_{2n}/n 。

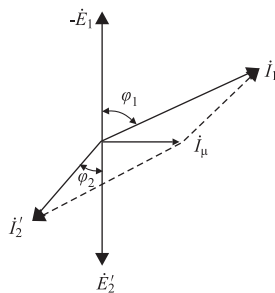


图4 电流向量
Figure 4 Vector current

E_{2n}/n_0 。令 $s = n/n_0$,根据等效 T 型电路图可得

$$E_2' s = I_2' Z_2' \tag{5}$$

由于 $E_1 = E_2'$,则励磁电流为

$$I_m = \frac{E_1}{X_m} = \frac{I_2' Z_2'}{s X_m} \tag{6}$$

其中,

$$Z_2' = \sqrt{R_2'^2 + (s X_2')^2} \tag{7}$$

根据式(5)~(7)可得转子电流表达式:

$$I_2' = \frac{I_1 X_m}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_m + X_2')^2}} \tag{8}$$

由电磁转矩的物理表达式

$$T = \frac{m_1}{\Omega_0} E_2' I_2' \cos \varphi_2' \tag{9}$$

可得

$$T = \frac{m_1}{\Omega_0} \frac{I_2' Z_2'}{s} I_2' \frac{R_2'}{Z_2'} = \frac{m_1}{\Omega_0} I_2'^2 \frac{R_2'}{s} = \frac{m_1 I_1^2 X_m^2 (R_2'/s)}{\Omega_0 [(R_2'/s)^2 + (X_m + X_2')^2]} \tag{10}$$

令 $dT/ds=0$,求得

$$\begin{cases} s_m = \frac{R_2'}{X_m + X_2'} \\ T_{mT} = \frac{m_1}{\Omega_0} \frac{I_1^2 X_m^2}{2 (X_m + X_2')} \end{cases} \tag{11}$$

3 仿真实验和结果分析

利用 matlab 建立异步电机能耗制动仿真模型。该模型由三相电源、直流电源、断路器、限流电阻、异步电机等组成,如图 5 所示。

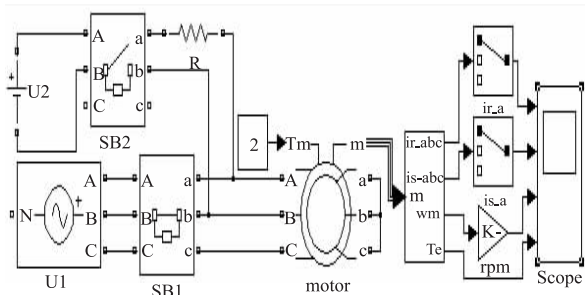


图5 异步电机能耗制动仿真模型
Figure 5 Energy Losses Braking of the Asynchronous motor simulation model

采用断路器控制电机的启动与制动,仿真时间为 4 s,启动 2 s 后,电机达到最大转速。2 s 时,KM1 断开,KM2 闭合,进入制动状态。通过控制电阻 R 阻值的大小,控制制动电流。使用的电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

Table 1 Motor parameters				
电机功率 (W)	电压 (V)	工作频率 (Hz)	定子电感 (H)	转子电感 (H)
750	380	50	0.009	0.009
互感系数 (H)	极对数	转动惯量 (kg·m ²)	转子阻抗 (Ω)	定子阻抗 (Ω)
0.2	2	0.02	1.7	1.7

不采用能耗制动,直接拉开电源让电机自然停车,停车时间约为 20 s。 T_m 设为 0,其仿真图如图 6 所示。

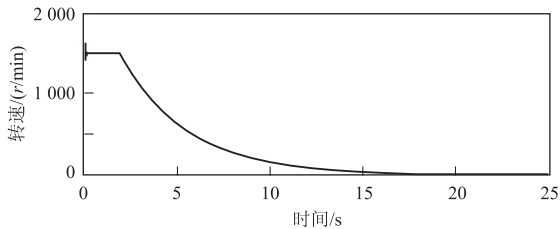


图 6 自然停车
Figure 6 Natural parking

3.1 传统能耗制动仿真

三相电源线电压为 380 V,直流电源通过变压器变压后,提供 127 V 电压,限流电阻为 6 Ω。仿真图直流电压由 U_2 提供, U_1 为三相电源,线电压为 380 V。仿真结果如图 7 所示。

由图可知,传统能耗制动的制动时间约为 0.4 s,制动时的瞬间冲击转矩幅值为 -71 N·m,定子上的制动电流为 10.6 A,定子上的冲击电流幅值为 29 A,转子上的冲击电流幅值为 -24 A。

3.2 不同限流电阻下的新型能耗制动仿真

新型能耗制动将变压器环节去掉,采用电网提供的 220

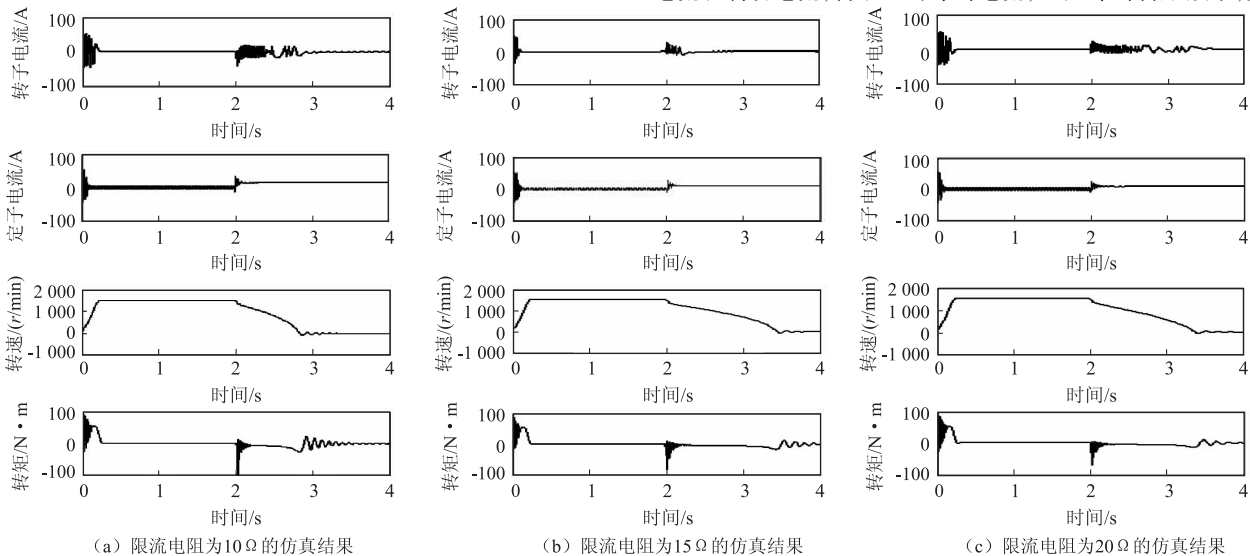


图 8 新型能耗制动瞬态特性曲线
Figure 8 New Energy Losses Braking of the Asynchronous motor system Transient curve

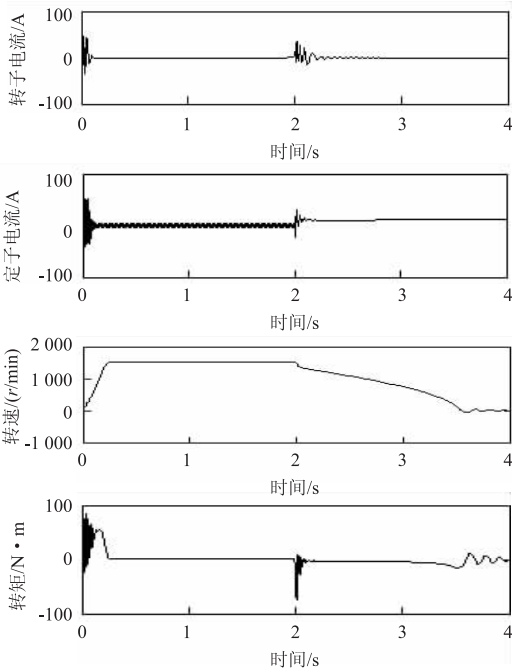


图 7 异步电机传统能耗制动瞬态曲线
Figure 7 Traditional Energy Losses Braking of the Asynchronous motor system Transient curve

V 电压,通过提高限流电阻阻值,减小制动电流,达到与传统制动同样的效果。选用负载转矩 2 N·m,分别采用 10 Ω、15 Ω、20 Ω 的限流电阻进行仿真、比较。仿真结果如图 8 所示。

图 8(a~c)中的制动时间分别为 0.2 s、0.3 s、0.4 s。定子上的制动电流分别为 14.9 A、10.9 A、8.6 A。瞬间的冲击转矩分别为 -95 N·m、-78 N·m、-66 N·m。定子上的瞬间冲击电流幅值分别为 33 A、26 A、22 A,转子上的瞬间冲击电流幅值分别为 -31 A、-26 A、-22 A。

比较仿真结果可知,随着限流电阻的增大,定子上冲击电流和制动电流,转子上的冲击电流,以及冲击转矩减小,异

步电机的制动时间变长。当限流电阻为 $20\ \Omega$, 可获得与传统能耗制动相近似的制动效果。

3.3 不同负载转矩下的新型能耗制动仿真

根据上述结论, 选用 $20\ \Omega$ 限流电阻, 分别在 $1\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、 $1.5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的负载转矩下进行仿真, 比较。仿真结果如图 9 所示。

在不同的负载转矩下, 所得的制动结果是不一样的。对比图 9(a)、(b) 和图 8(c) 制动结果, 随着负载转矩的增加, 制动时间分别 $0.50\ \text{s}$ 、 $0.45\ \text{s}$ 、 $0.40\ \text{s}$, 瞬间的冲击转矩幅值分别为 $-66.92\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、 $-66.29\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、 $-66.04\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。定子上的制动电流分别为 $8.6\ \text{A}$ 、 $8.6\ \text{A}$ 、 $8.6\ \text{A}$ 。定子上的瞬间冲击电流幅值分别为 $22.51\ \text{A}$ 、 $22.39\ \text{A}$ 、 $22.32\ \text{A}$, 转子上的瞬间冲击电流幅值分别为 $23.25\ \text{A}$ 、 $25.96\ \text{A}$ 、 $22.39\ \text{A}$ 。

比较仿真上述结果, 随着负载转矩的增加, 定子上冲击电流和冲击转矩基本保持不变, 定子上的制动电流保持不变, 异步电机的制动时间缩短, 转子上的冲击电流有小幅波动。在上述不同负载转矩下, 异步电机输出的瞬时冲击转矩, 定子上的制动电流和瞬时冲击电流均低于传统能耗制动的数值, 转子上的瞬时冲击电流在传统制动电流数值上下有小幅波动。

3.4 不同负载转动惯量下的新型能耗制动仿真

将电机转轴接于不同负载转动惯量下, 选用 $20\ \Omega$ 限流电阻, 负载转矩为 $0\ \text{N}\cdot\text{m}$, 分别在 $0.02\ \text{kg}/\text{m}^2$ 、 $0.04\ \text{kg}/\text{m}^2$ 、 $0.06\ \text{kg}/\text{m}^2$ 的负载转动惯量下进行仿真、比较。仿真结果如图 10 所示。

对比图 10 中的制动结果, 随着负载转动惯量的增加, 制动时间分别 $1.3\ \text{s}$ 、 $2.4\ \text{s}$ 、 $3.10\ \text{s}$, 瞬间的冲击转矩幅值分别为

$-67.78\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、 $-68.67\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、 $-68.84\ \text{N}\cdot\text{m}$, 定子上的制动电流分别为 $8.6\ \text{A}$ 、 $8.6\ \text{A}$ 、 $8.6\ \text{A}$, 定子上的瞬间冲击电流幅值分别为 $23.27\ \text{A}$ 、 $23.54\ \text{A}$ 、 $23.57\ \text{A}$, 转子上的瞬间冲击电流幅值分别为 $-24.72\ \text{A}$ 、 $-27.56\ \text{A}$ 、 $-25.06\ \text{A}$ 。

通过比较上述仿真结果可知, 随着负载转动惯量的增加, 定子冲击电流和转子冲击电流, 以及冲击转矩基本保持不变, 定子上的制动电流没有变化, 异步电机的制动时间随负载转动惯量的增加而增加, 并且负对制动时间影响较为明显, 当负载转动惯量为电机转动惯量 3 倍时, 制动时间到达 $3.1\ \text{s}$ 。在上述不同负载转动惯量下, 异步电机输出的瞬时冲击转矩, 定子上的制动电流和瞬时冲击电流均低于传统能耗制动的数值, 转子上的瞬时冲击电流略高于传统制动电流数值。

4 结束语

本文分析了异步电机能耗制动的理论基础, 根据电机制动原理, 以减小生产和维护成本为理念, 设计出新的能耗制动方案。运用 matlab/simulink 仿真工具, 建立了异步电机能耗制动仿真模型。首先在不同限流电阻的情况下进行仿真, 得出与传统能耗制动特性曲线相似的最佳电阻阻值。再以此电阻的新型能耗制动系统下, 对不同负载转矩和不同负载转动惯量的情况下进行实例仿真, 通过对比仿真特性曲线, 验证了新型能耗制动的可行性。

新型能耗制动系统大大降低了制动系统的生产和维护成本, 使设备设计更加合理化和简单化, 在工业生产和应用中有很广阔的前景。

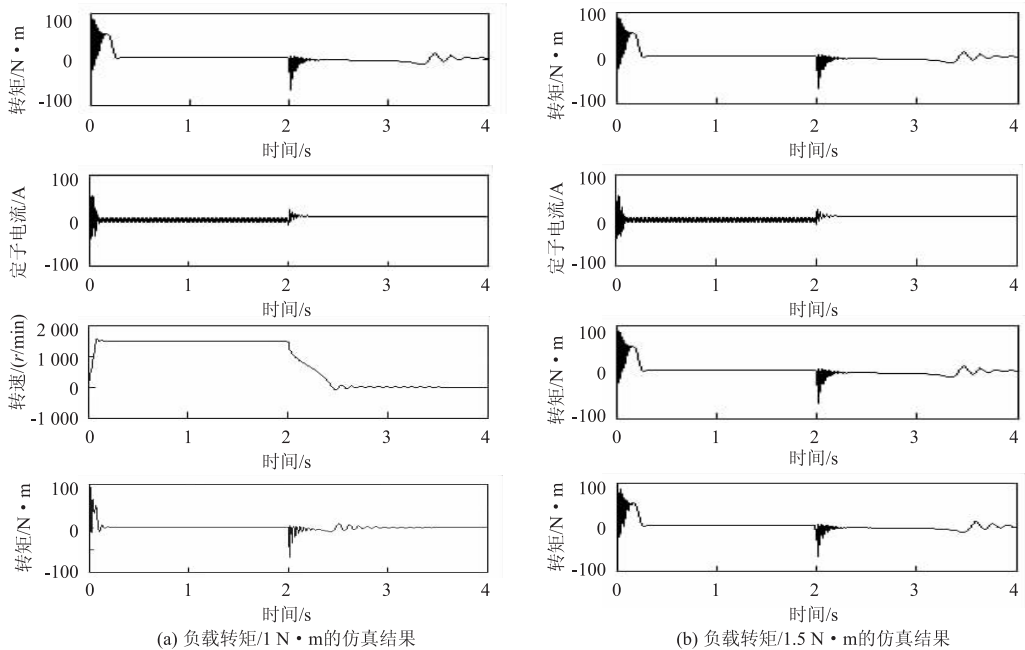


图 9 不同负载转矩下的能耗制动仿真
Figure 9 Simulation of energy losses Braking in the situations of different load torque

(下转第 204 页)

参考文献

[1] STEWART I A. A general algorithm for detecting faults under the comparison diagnosis model. Parallel & Distributed Processing (IP-DPS) [C]. 2010 IEEE International Symposium on Information Theory, 2010:1-9.

[2] YANG Y, YANG X F, TANG H Y. The Diagnosabilities of and Diagnosis Algorithms for Regular Networks under Two Three-Valued Models [J]. FUZZY INFORMATION AND ENGINEERING, 2009, 2 (62):321-330.

[3] MÁNIK M. System Level Diagnostics over the PMC Model[J]. Information Sciences and Technologies Bulletin of the ACM Slovakia, 2010, 2(2):24-29.

[4] ELHADEF M, NAYAK A. A Novel Generalized-Comparison-Based Self-Diagnosis Algorithm for Multiprocessor and Multicomputer Systems Using a Multilayered Neural Network [C]. 2010 13th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, 2010:245-252.

[5] PREPARATA F P, METZE G, CHIEN R T. On the connection assignment problem of diagnosable systems[J]. IEEE Transactions on Electronic Computers, 1967, EC-16:848-854.

[6] MAENG J, MALEK M. A comparison connection assignment for self-diagnosis of multiprocessor systems[C]. Proc. 11th Int'l Symp. Fault-Tolerant Computing, 1981:173-175.

[7] FRIEDMAN A D. A New Measure of Digital System Fault Diagnosis. Digest 1975 International Symposium Fault-Tolerant Computing [C]. IEEE Computer Society Publications, 1975:167-170.

[8] DAHBURA A T, MASSON G M. An $O(n^{2.5})$ Fault Identification Algorithm for Diagnosable Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 1984, 3(6):486-492.

[9] SULLIVAN G. An $O(t^3 + |E|)$ Fault Identification Algorithm for Diagnosable Systems [J]. IEEE Transactions on Computers, 1988, 37 (4):388-397.

[10] SENGUPTA A, DAHBURA A T. On Self-Diagnosable Multi-processor Systems: Diagnosis by the Comparison Approach [J]. IEEE Transactions on Computers, 1992, 41(11):1386-1396.

[11] YANG X F, TANG Y Y. Efficient Fault Identification of Diagnosable Systems under the Comparison Model [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(12):1612-1618.

[12] YANG C L, MASSON G M, LEONETTI R A. On Fault Isolation and Identification in t/t_1 -Diagnosable Systems [J]. IEEE Transactions on Computers, 1986, 35(7):639-643.

(上接第 172 页)

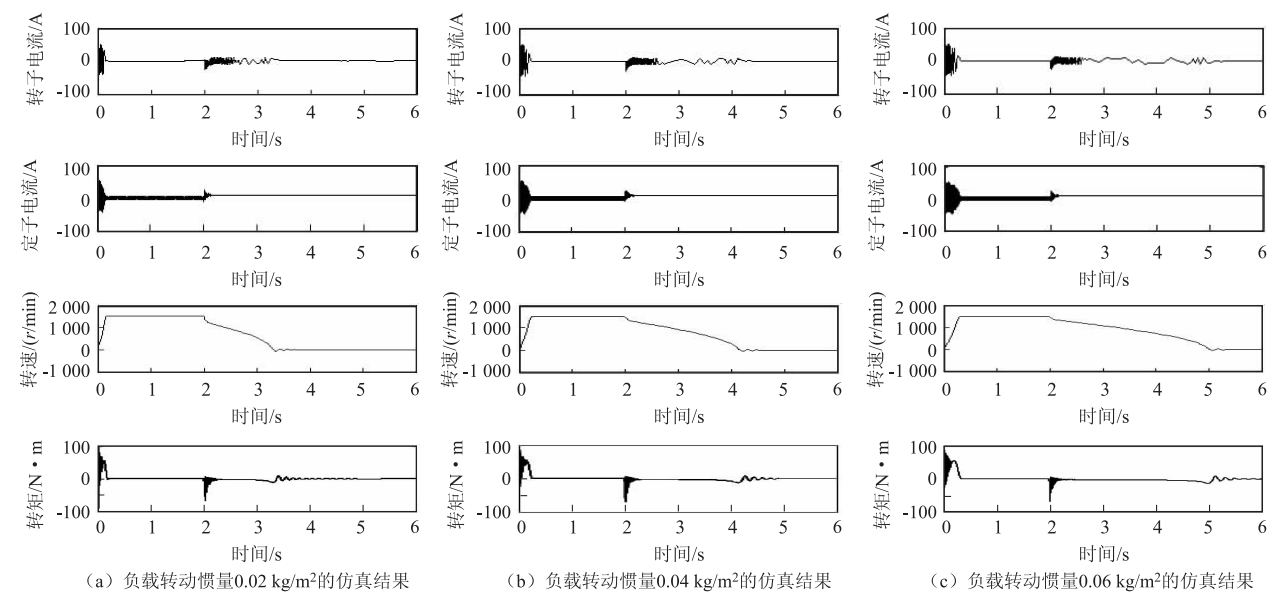


图 10 不同负载转动惯量下的能耗制动仿真

Figure 10 Simulation of energy losses Braking in the situations of different load inertia

参考文献

[1] 陈和权. 变频器能耗制动电阻的选型与安装[J]. 煤炭工程, 2010, (7):94-95.

[2] 任洪莹, 冯惠, 任俊杰, 等. 船舶电力推进电动机能耗制动电阻值研究[J]. 航海技术, 2010, (4):54-56.

[3] 王云飞, 杨耕. 通用变频器—感应电机系统的电机能耗型制动控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, (1):12-18.

[4] GOBBI R, SADIH J, TECK S T. Industrial problems in design, selection and installation of an adjustable speed drives (ASD) for asynchronous motor, National Power and Energy Conference [C]. National Power and Energy Conference. Malaysia, 2003:139-143.

[5] 王振民. 三相异步电动机的制动[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.

[6] 康晓明. 电机与拖动[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

[7] KRAUSE P C. Analysis of Electric Machine-ry [M]. New York: McGraw-HillBook Company, 1986.

[8] 方大千. 电动机控制装置制作与调试[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.

[9] 葛伟亮, 汪渤. 电磁控制元件[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1994.