

DOI: 10.7667/PSPC180574

计及频率特性的感应电动机参数变化对负荷特性的影响

海世芳, 孙士云, 范小红, 王 杨, 张雪娟, 郑新宇

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

摘要: 对于网架结构比较薄弱的省网系统或者系统解列后形成的孤岛, 发生故障时会引起比较大的频率波动。感应电动机作为电力系统动态负荷的主要成分, 进行建模时考虑其频率特性尤为重要。基于感应电动机数学模型, 考虑恒机械转矩、恒机械功率和变机械转矩等不同负载特性, 在计及频率特性的情况下, 通过解析法得到感应电动机转子滑差、有功功率和无功功率的表达式。当感应电动机的定子电感、转子电感、励磁电感和转子电阻变化幅度分别为 $\pm 30\%$ 时, 分析负荷特性参数变化对不同频率下的感应电动机吸收有功功率和无功功率的影响。利用 Matlab 建立感应电动机五阶电磁暂态仿真模型, 仿真分析感应电动机参数变化对负荷特性的影响。将理论计算与仿真实验的结果进行对比, 验证了所提方法的正确性。

关键词: 感应电动机; 频率特性; 参数变化; 负荷特性; 仿真模型

Influence of induction motor parameter change considering frequency characteristics on load characteristics

HAI Shifang, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, WANG Yang, ZHANG Xuejuan, ZHENG Xinyu

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: When a network system with a weak network structure or an island formed after a system is decomposed, a relatively large frequency fluctuation may occur. As the main component of the dynamic load of the power system, it is particularly important to consider the frequency characteristics when modeling an induction motor. Based on the mathematical model of induction motor, this paper considers different load characteristics such as constant mechanical torque, constant mechanical power and variable mechanical torque. Taking into account the frequency change, the expressions of rotor slip, active power and reactive power of the induction motor are obtained by analytical method. When the induction motor's stator inductance, rotor inductance, magnetizing inductance and rotor resistance change amplitude are $\pm 30\%$ respectively, the influence of load characteristic parameter changes on the active power and reactive power absorbed by induction motor at different frequencies is analyzed. Using Matlab to establish the fifth-order electromagnetic transient simulation model of induction motor, the influence of induction motor parameter changes on load characteristics is simulated and analyzed. Comparing theoretical calculation results with simulation experiment results, the accuracy and effectiveness of the proposed method are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367009).

Key words: induction motor; frequency characteristics; change of parameters; load characteristics; simulation model

0 引言

电力系统负荷模型对电力系统仿真及电网的安全稳定运行有重要影响^[1-3]。长期以来, 电力负荷建模的研究大都是以负荷的电压特性为主, 并在此方面取得了丰富的成果^[4-6], 但是关于负荷频率特性的

研究一直是电力系统研究领域的薄弱环节^[7]。对于异步联网系统中网架结构比较薄弱的省网系统或系统解列后形成的孤岛, 在一些特殊情况下, 会有一些明显幅度的频率波动, 此时考虑负荷模型的频率特性尤为重要^[8-12]。

感应电动机作为电力系统动态负荷的主要成分, 其负荷特性对电网稳定性具有较大的影响。文献^[13]以简单电力系统为例, 通过仿真分析系统参

数和感应电动机参数的变化对暂态电压稳定极限切除时间的影响。文献[14-15]和文献[16]分别考虑了感应电动机机械转矩变化和电磁转矩变化对暂态电压稳定性的影响。文献[17]指出系统负荷频率特性将会影响电网频率的稳定性，并提出了制定低频减载方案时，负荷频率调节系数应采用实测参数等相应建议。文献[18]则利用摄动法分析感应电动机参数对系统频率稳定性的影响。上述文献均没有对感应电动机参数变化引起的自身负荷特性变化进行分析。文献[19-20]基于感应电动机的机电暂态模型，通过解析法得到感应电动机阻抗、吸收的有功功率、无功功率和转子滑差之间的关系，并改变定子电阻和电抗、转子电阻和电抗以及励磁电抗等参数，观察不同电气量变化对感应电动机功率特性的影响。但是没有考虑频率变化对感应电动机吸收有功功率和无功功率的影响，且以转子滑差直接作为变量，没有给出滑差的具体表达式。

本文基于感应电动机数学模型，考虑恒机械转矩、恒机械功率和变机械转矩等不同负载特性，在计及频率特性的情况下，通过解析法得到感应电动机转子滑差、有功功率和无功功率的表达式。改变感应电动机的定子电感、转子电感、励磁电感和转子电阻等负荷特性参数，观察分析负荷特性参数变化对感应电动机吸收功率的影响。最后结合仿真实验验证了本文解析方法的正确性。

1 感应电动机数学模型

本文采用一阶机械暂态感应电动机模型，忽略励磁回路电阻时等效电路如图 1 所示，此时可以得到有功功率、无功功率与滑差、电压及频率的关系。这种关系有时比较复杂，可作适当的简化：励磁回路电抗 x_μ 远大于定子电抗 $x_{s\sigma}$ (即 $x_\mu \gg x_{s\sigma}$) 时，可将励磁支路移到端口；定子电阻一般很小，可以将其略去^[21]。简化后的等效电路如图 2 所示。

根据电机学理论基础，利用 Γ 形等效电路可以得到电动机的有功功率为

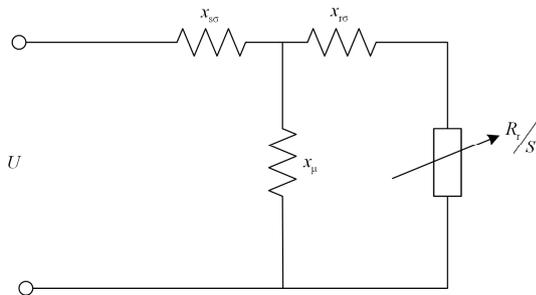


图 1 感应电动机 T 形等效电路

Fig. 1 Induction motor T-equivalent circuit diagram

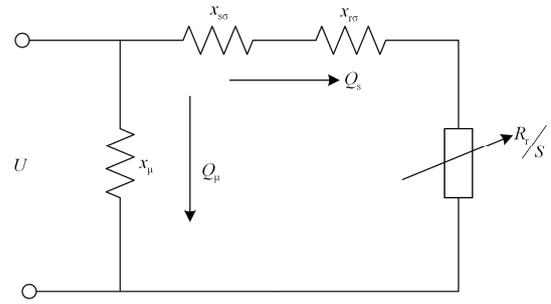


图 2 感应电动机 Γ 形等效电路

Fig. 2 Induction motor Γ -equivalent circuit diagram

$$P_e = I^2 \frac{R_r}{S} = \frac{U^2 R_r S}{R_r^2 + (x_1 S)^2} \quad (1)$$

式中： $x_1 = x_{r\sigma} + x_{s\sigma} = \omega_s (L_{r\sigma} + L_{s\sigma}) = \omega_s L_1$ ， $x_{r\sigma}$ 为转子电抗， $x_{s\sigma}$ 为定子电抗， $L_{r\sigma}$ 为转子电感， $L_{s\sigma}$ 为定子电感， L_1 为定子电感和转子电感之和， $\omega_s = 2\pi f_s$ ，为定子电角速度， f_s 为定子侧频率； $S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ ，为转差率， ω_r 为转子电角速度； R_r 为转子电阻； I 为回路电流； U 为电源电压。

而无功功率则由两个部分组成，分别是经过简化之后的定、转子回路无功功率和励磁回路无功功率，即

$$Q = Q_s + Q_\mu = \frac{U^2 S^2 x_1}{R_r + (x_1 S)^2} + \frac{U^2}{x_\mu} \quad (2)$$

式中： Q_s 为定子和转子回路的漏磁无功功率； Q_μ 为励磁回路无功功率； $x_\mu = 2\pi f_s L_\mu$ ，为励磁电抗， L_μ 为励磁电感。

感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{p P_e}{\omega_s} \quad (3)$$

式中： T_e 为电磁转矩； p 为极对数。

感应电动机稳定运行时，恒有

$$T_e = T_M \quad (4)$$

式中， T_M 为机械转矩。

2 感应电动机负荷特性参数的影响

对于感应电动机而言，其拖动的生产机械的负载转矩特性将直接影响电动机的动态性能。根据转矩特性，可以将负载分为三种：恒机械转矩负载、恒机械功率负载和变机械转矩负载。

机械转矩有不同的表达形式。

① 恒机械转矩负载特性

$$T_M = T_{M0} \quad (5)$$

② 恒机械功率负载特性

$$T_M = \frac{pP_{M0}}{\omega_r} \quad (6)$$

③ 变机械转矩负载特性

$$T_M = T_{M0} + \beta_0(\omega_r - \omega_{r0}) \quad (7)$$

式(5)~式(7)中: T_{M0} 为初始稳定运行时感应电动机的机械转矩; P_{M0} 为恒定机械功率; β_0 为转矩系数。

2.1 恒机械转矩感应电动机

对于恒机械转矩负载特性感应电动机而言, 将机械转矩式(5)和电磁转矩式(3)代入式(4), 若满足条件 $(pU^2R_r)^2 - 4T_{M0}^2R_r^2L_1^2(2\pi f_s)^4 \geq 0$, 可得到转差率解析式为

$$S = \frac{pU^2R_r \pm \sqrt{(pU^2R_r)^2 - 4T_{M0}^2R_r^2L_1^2(2\pi f_s)^4}}{2T_{M0}L_1^2(2\pi f_s)^3} \quad (8)$$

感应电机作为电动机使用时, 其转差率 S 的取值范围为 $0 < S < 1$, 额定运行时常取 $0.01 < S < 0.05$ 。因此需要根据实际电力系统运行情况的取值范围确定其表达式的符号, 舍去表达式中不满足条件的解。将符合实际情况的转差率解析式分别代入式(1)和式(2)中, 得到感应电动机吸收有功功率和无功功率的表达式。

从第1节等效电路图及式(1)和式(2)可以看出, 影响感应电动机吸收有功功率和无功功率的主要负荷特性参数有定子电感 $L_{s\sigma}$, 转子电感 $L_{r\sigma}$, 励磁电感 L_{μ} 和转子电阻 R_r 。以图3所示的含感应电动机的系统为例, 通过 Matlab/Simulink 软件建立电磁暂态仿真模型, 部分参数设置如表1所示(参数分别来源于文献[21-22])。

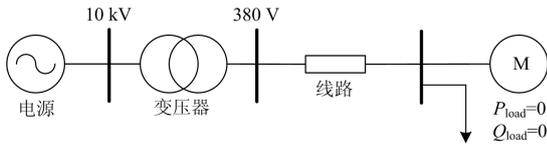


图3 含感应电动机的系统接线图

Fig. 3 System wiring diagram with induction motor

表1 感应电动机运行参数

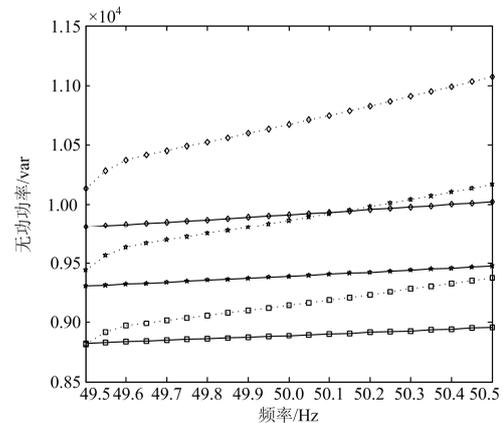
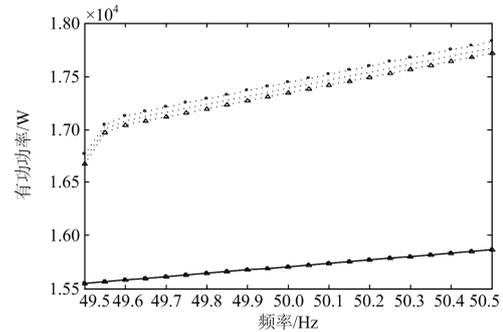
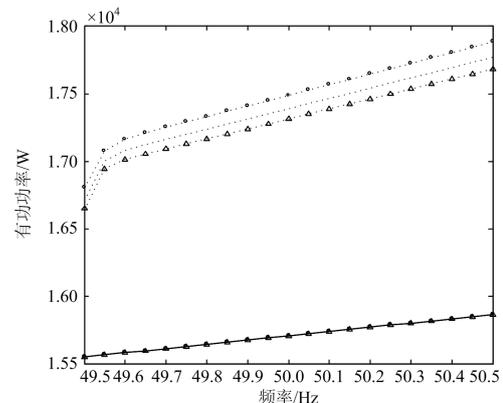
Table 1 Induction motor running parameters

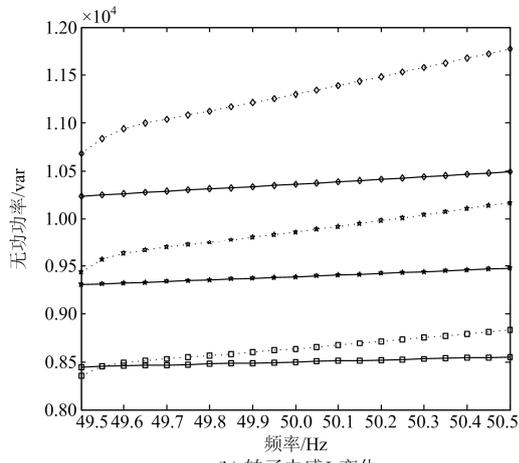
第一组	T_{M0}	$x_{s\sigma}$	$x_{r\sigma}$	x_{μ}	R_r	U
	80 N·m	0.1 p.u.	0.18 p.u.	3.2 p.u.	0.018 p.u.	380 V
第二组	T_{M0}	$L_{s\sigma}$	$L_{r\sigma}$	L_{μ}	R_r	U
	100 N·m	0.002 578 H	0.004 67 H	0.088 H	0.349 Ω	380 V

通过理论计算和仿真实验, 当感应电动机的定子电感、转子电感、励磁电感和转子电阻变化幅度分别为 $\pm 30\%$ 时, 分析负荷特性参数变化对不同频率

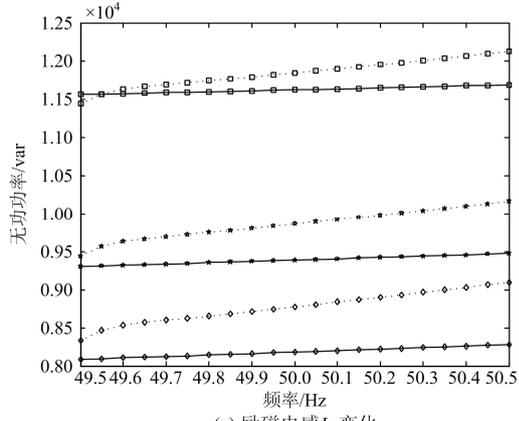
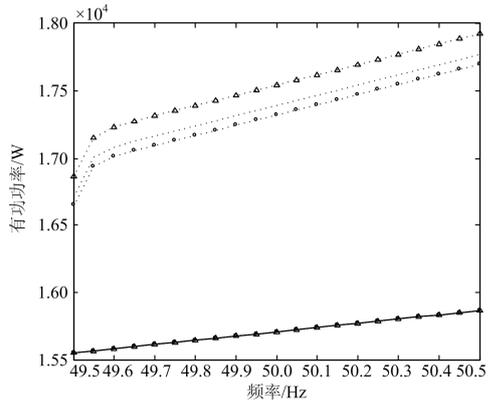
下的感应电动机吸收有功功率和无功功率的影响。本文以第二组参数为例, 理论计算与仿真实验结果对比如图4所示。

从图4可以看出, 对于恒机械转矩负载特性的感应电动机而言, 理论分析得到: 定子电感, 转子电感, 励磁电感和转子电阻对感应电动机吸收的有功功率几乎没有影响, 故参数变化前后曲线重合。无功功率不受转子电阻的影响, 所以电阻变化前后的曲线重合; 但是却受电感的影响较大, 并且随着定子电感、转子电感的增大而增大, 随着励磁电感的增大而减小。仿真实验得到, 随着定子电感和转子电感的增大, 感应电动机吸收的有功功率和无功功率均增大; 随着励磁电感的增大, 有功功率和无功功率均减小; 转子电阻对有功功率和无功功率几

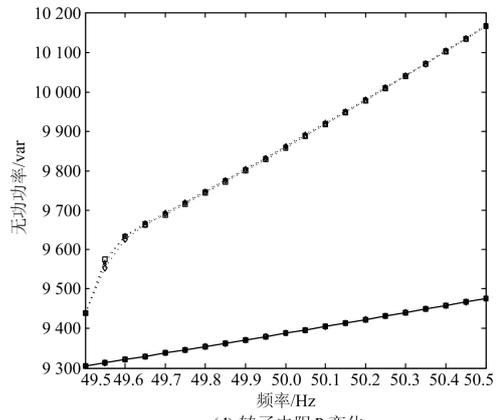
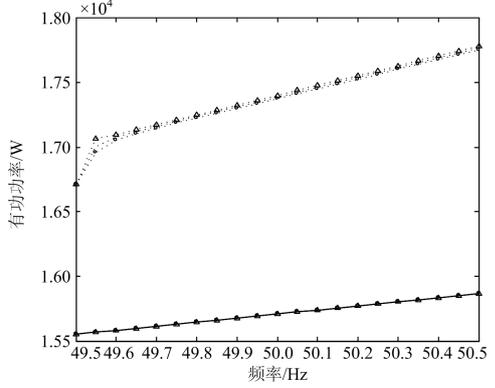
(a) 定子电感 L_s 变化



(b) 转子电感 L_r 变化



(c) 励磁电感 L_μ 变化



(d) 转子电阻 R_r 变化

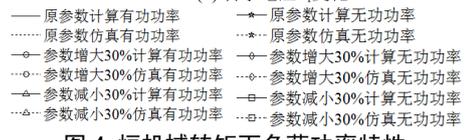


图 4 恒机械转矩下负荷功率特性

Fig. 4 Constant mechanical torque load power characteristics

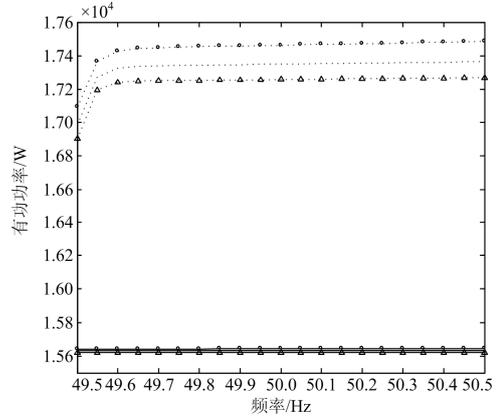
乎没有影响。无论是理论计算还是仿真实验，感应电动机吸收的有功功率和无功功率均随着频率的增大而增大。

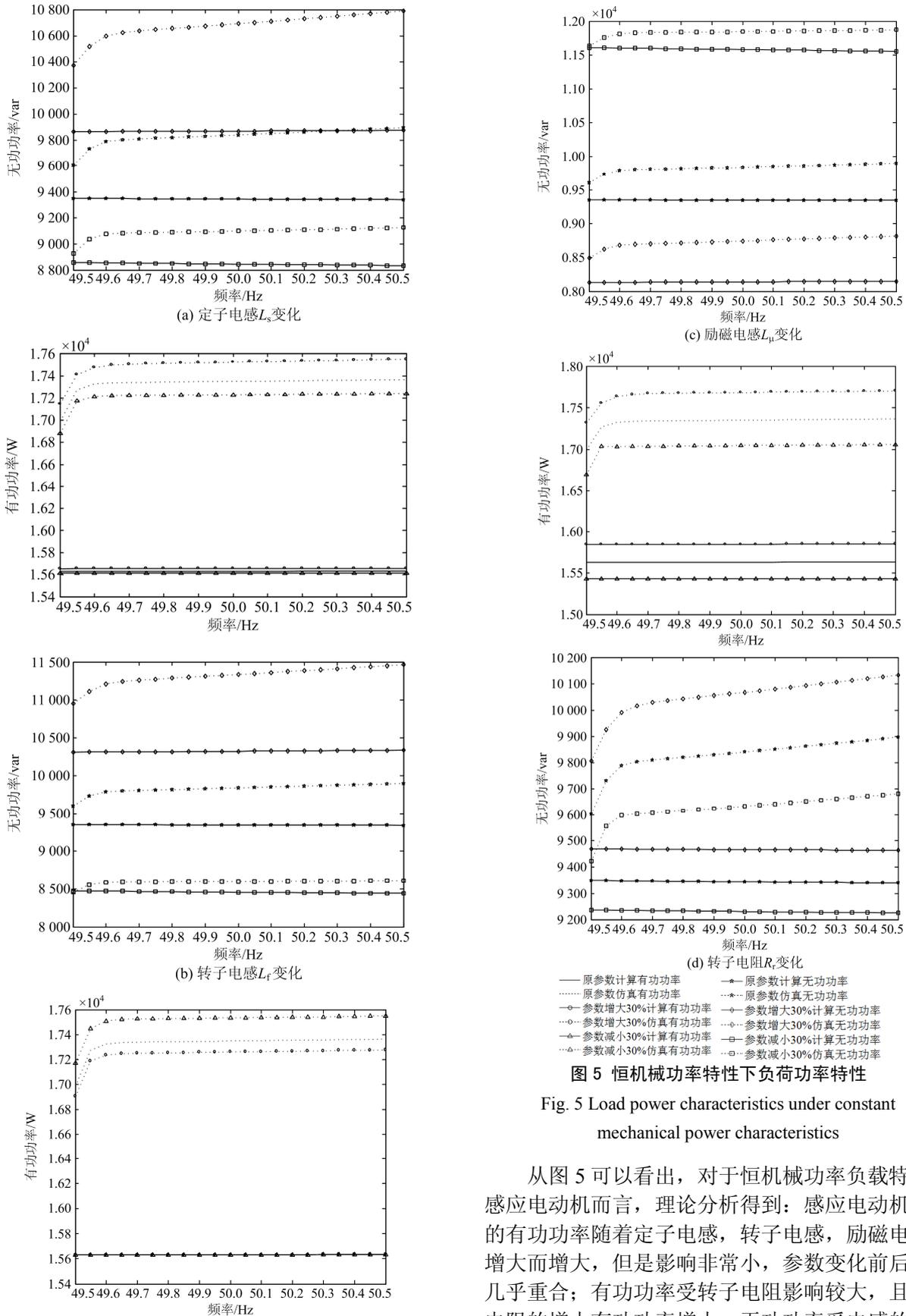
2.2 恒机械功率感应电动机

对于恒机械功率负载特性感应电动机而言，将机械转矩式(6)和电磁转矩式(3)代入式(4)，当满足 $(-U^2 R_r)^2 - 4(U^2 R_r + P_{M0} x_1^2) P_{M0} R_r^2 \geq 0$ 时，转差率解析式为

$$S = \frac{U^2 R_r \pm R_r \sqrt{U^4 - 4P_{M0}^2 (2\pi f_s L_1)^2 - 4P_{M0} U^2 R_r}}{2[P_{M0} (2\pi f_s L_1)^2 + U^2 R_r]} \quad (9)$$

如 2.1 节所述，根据转差率的实际工作范围，确定式(9)中的正负号，并代入式(1)和式(2)，计算恒机械功率感应电动机吸收的有功功率和无功功率，并建立恒机械功率负载特性的感应电动机电磁暂态模型，以表 1 第二组参数为例，且 $P_{M0} = 15000 \text{ W}$ 。当参数发生变化时，理论计算与仿真实验结果对比如图 5 所示。





较大, 并且随着定子电感、转子电感的增大而增大, 随着励磁电感的增大而减小; 无功功率受转子电阻的影响较小, 随着转子电阻的增大而增大。仿真实验得到: 感应电动机吸收的有功功率和无功功率均随着定子电感、转子电感和转子电阻的增大而增大, 随着励磁电感的增大而减小。无论是理论计算还是仿真实验, 感应电动机吸收的有功功率不随频率的变化而变化。但是理论计算中无功功率随频率的增

大而减小, 仿真实验中随频率的增大而增加, 虽然变化趋势相反, 但变化量都很小。

2.3 变机械转矩感应电动机

对于变机械转矩负载特性感应电动机而言, 将机械转矩式(7)和电磁转矩式(3)代入式(4), 得到变机械转矩负载特性的感应电动机转差率的一元三次方程, 此时转差率有 3 个解(S_a 、 S_b 、 S_c):

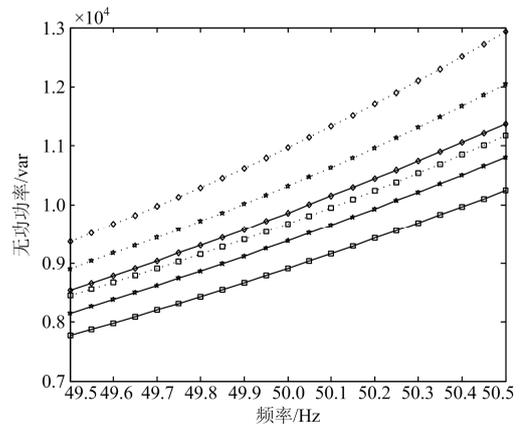
$$S_a = -\frac{b}{3a} + \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (10-a)$$

$$S_b = -\frac{b}{3a} + \left(\frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \left(\frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (10-b)$$

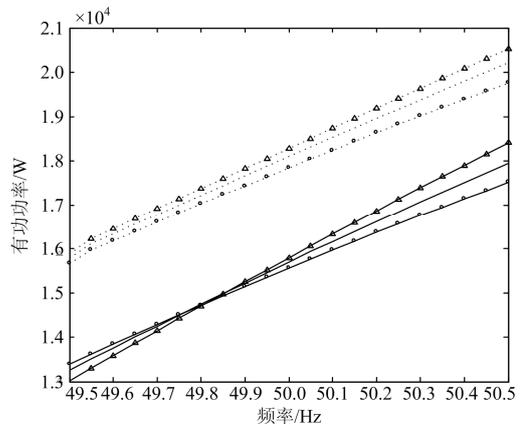
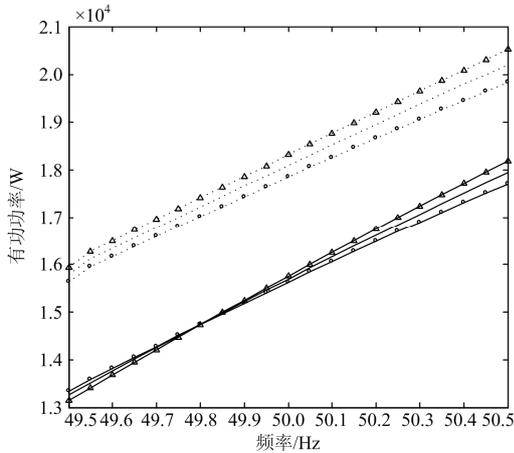
$$S_c = -\frac{b}{3a} + \left(\frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \left(\frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (10-c)$$

如 2.1 节所述, 根据转差率的实际工作范围, 确定式(10)中的表达式, 并代入式(1)和式(2), 计算变机械转矩感应电动机吸收的有功功率和无功功率, 并建立变机械转矩负载特性的感应电动机电磁暂态模型, 以表 1 第二组参数为例, 且 $\beta_0=3$, $\omega_0=301.2516 \text{ rad/s}$ 。当参数变化时, 理论计算与仿真实验结果对比如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 对于变机械转矩负载特性的感应电动机而言, 理论分析得到: 感应电动机吸收的有功功率受定子电感和转子电感的影响较小, 且



(a) 定子电感 L_s 变化



有功功率/W

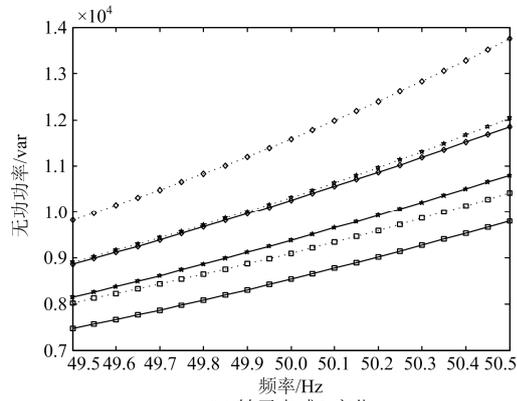
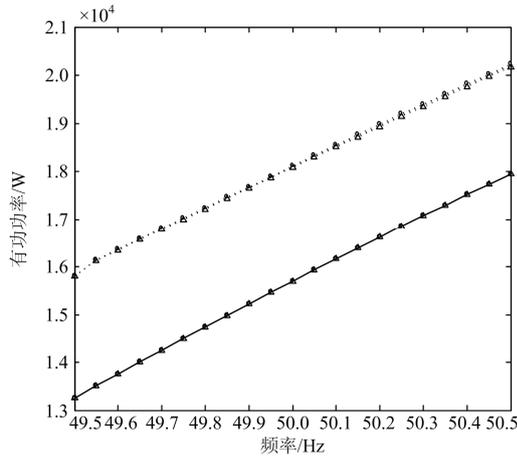
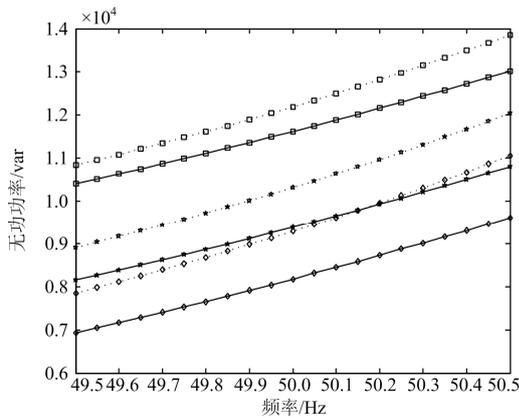
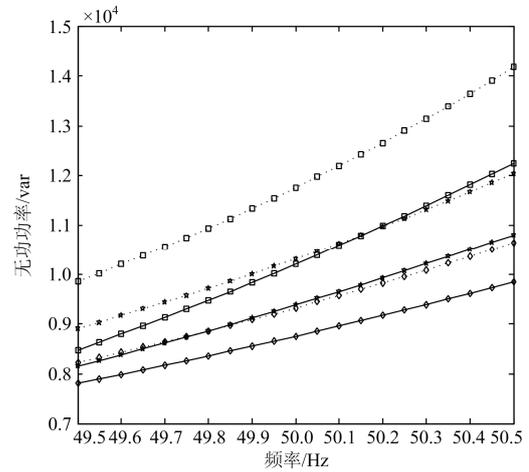
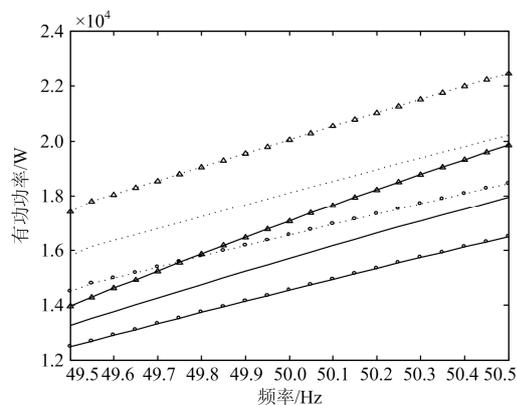
(b) 转子电感 L_r 变化(c) 励磁电感 L_μ 变化(d) 转子电阻 R_r 变化(e) 励磁电感 L_μ 变化

图 6 变机械转矩特性下负荷功率特性

Fig. 6 Load power characteristics under variable mechanical torque characteristics

大体趋势为随着定子电感和转子电感的增大而减小；受转子电阻的影响较大，且随着转子电阻的增大而减小；受励磁电感的影响非常小，故励磁电感变化前后的曲线几乎重合。无功功率受电感的影响较大，并且随着定子电感、转子电感的增大而增大，随着励磁电感的增大而减小；受转子电阻影响较大，且随着电阻的增大而减小。仿真实验得到：感应电动机吸收的有功功率和无功功率均随着定子电感和转子电感的增大而减小，但有功功率的变化程度较小；有功功率几乎不受励磁电感的影响，但是无功功率却随着励磁电感的增大而减小；转子电阻对有功功率和无功功率影响较大，且均随着电阻的增大而减小。无论是解析算法还是仿真实验，感应电动机吸收的有功功率和无功功率均随频率的增大而增大。

2.4 结果分析

根据图 4—图 6，分析理论计算与仿真实验中定子电感、转子电感、励磁电感和转子电阻变化幅度分别为 $\pm 30\%$ 时，负荷特性参数变化对不同频率下的感应电动机吸收有功功率和无功功率的影响，对比结果如表 2 所示。表中 A, B, C 分别代表恒机械转矩、恒机械功率和变机械转矩负载特性的感应电动机。同时，将表 1 第一组参数归算后进行同样过程的分析，结果列于表 2，与第二组参数变化趋势一致的不再重复给出，不一致的情况用参数 1/参数 2 的形式表示。

表 2 参数变化对不同负载类型感应电动机吸收功率的影响
Table 2 Effect of parameter change on absorption power of different load type induction motors

类型		定子电 感↑	转子电 感↑	励磁电 感↑	转子电 阻↑	频率↑
A	有功	理论计算 —	—	—	—	↑
	无功	仿真实验 ↑	↑	↓	—	↑
	有功	理论计算 ↑	↑	↓	—	↑
	无功	仿真实验 ↑	↑	↓	—	↑
B	有功	理论计算 ↑	↑	—	↑	—
	无功	仿真实验 ↑	↑	↓	↑	↑
	有功	理论计算 ↑	↑	↓	↑	↑
	无功	仿真实验 ↑	↑	↓	↑	↑
C	有功	理论计算 ↓	↓	—	↓	↑
	无功	仿真实验 ↓	↓	—	↓	↑
	有功	理论计算 ↑	↑	↓	↓	↑
	无功	仿真实验 ↑	↑	↓	↓	↑

注：↑表示增大；—表示不变；↓表示减小。

从表 2 看出：主要负荷特性参数及频率发生变化时，两组参数下的恒机械转矩、恒机械功率和变机械转矩感应电动机理论计算与实验仿真变化趋势的正确判断率分别为 70%、90%、100%和 70%、80%、100%。观察理论计算结果与实验仿真变化趋势不一致的情况，恒机械转矩感应电动机吸收的有功功率理论计算结果不变，而仿真实验结果产生了微小变化；理论计算中恒机械功率感应电动机吸收的无功功率随频率变化发生或增加或减小的变化，但是变化范围都非常的小。对等值电路进行处理的过程中，进行了部分简化，误差由此而来。总体来说，解析算法与仿真实验结果一致，验证了本文解析结果的正确性。

3 结论

本文基于感应电动机数学模型，通过解析法得到不同负载特性的感应电动机转子滑差、有功功率和无功功率的解析式，分析负荷特性参数变化对不同频率下的感应电动机吸收有功功率和无功功率的影响。结论如下：

1) 对于恒机械转矩负载特性感应电动机而言，定子电感、转子电感、励磁电感和转子电阻对其吸收的有功功率影响非常小；无功功率受电感影响较大，且随着定子电感和转子电感的增大而增大，随着励磁电感的增大而减小；转子电阻对无功功率几乎没有影响。

2) 对于恒机械功率负载特性的感应电动机而言，定子电感、转子电感、励磁电感对感应电动机吸收的有功功率影响非常小；但是有功功率受转子电阻影响较大，且随着电阻的增大有功功率增大。

无功功率受电感的影响较大，并且随着定子电感、转子电感的增大而增大，随着励磁电感的增大而减小；无功功率受转子电阻的影响较小，随着转子电阻的增大而增大。

3) 对于变机械转矩负载特性感应电动机而言，感应电动机吸收的有功功率受定子电感和转子电感的影响较小，且随着定子电感和转子电感的增大而减小；受转子电阻的影响较大，且随着转子电阻的增大而减小；几乎不受励磁电感的影响。无功功率受电感的影响较大，并且随着定子电感、转子电感的增大而增大，随着励磁电感的增大而减小；受转子电阻影响较大，且随着电阻的增大而减小。

参考文献

- [1] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 负荷建模的基本原则和方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 1-5.
TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. Study on essential principle and methods for load modeling[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 1-5.
- [2] 贺仁睦, 韩冬, 杨琳. 负荷模型对电网安全性的影响研究[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 1-5.
HE Renmu, HAN Dong, YANG Lin. Study on effect of load models on power system security[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 1-5.
- [3] HE J, LIU L, DING F, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [4] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 82-88.
REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 82-88.
- [5] 唐学军, 韩佶, 苗世洪, 等. 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 116-123.
TANG Xuejun, HAN Ji, MIAO Shihong, et al. Coordinated control model of multi-type load based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 116-123.
- [6] 薛安成, 刘瑞煌, 李铭凯, 等. 基于支路电压方程的在线电压稳定指标[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 95-103.
XUE Ancheng, LI Ruihuang, LI Mingkai, et al. A new on-line voltage stability index based on voltage equation of the branch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 95-103.
- [7] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.

- ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [8] 张孝, 鞠平, 陈谦, 等. 考虑频率特性的负荷模型研究及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 353-358.
- ZHANG Xiao, JU Ping, CHEN Qian, et al. Study and application of load models considering frequency characteristics[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 353-358.
- [9] XU X, MATHUR R M, JIANG J, et al. Modeling effects of system frequency variations in induction motor dynamics using singular perturbations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 2(2): 764-770.
- [10] 陈谦, 汤涌, 鞠平, 等. 计及配电网阻抗和无功补偿的完整综合负荷模型的参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 44-50.
- CHEN Qian, TANG Yong, JU Ping, et al. Parameter identification of the synthesis load model considering distribution impedance and compensation capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 44-50.
- [11] 贺仁睦, 叶静, 徐欢, 等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 165-170.
- HE Renmu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement-based load modeling considering frequency characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 165-170.
- [12] 许丹, 丁强, 黄国栋, 等. 考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 59-64.
- XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, et al. Cogeneration unit dynamic scheduling model considering peak-load regulation ability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 59-64.
- [13] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6.
- SUN Huadong, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6.
- [14] 李佳, 刘天琪, 李兴源, 等. 感应电动机模型和机械转矩参数对暂态电压稳定评估的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 19-24.
- LI Jia, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Influence on assessment of transient voltage stability by induction motor model and mechanical torque parameters[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 19-24.
- [15] 何笠, 李兴源, 徐梅梅. 考虑动态负荷机械转矩参数的节点暂态电压评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 11-14.
- HE Li, LI Xingyuan, XU Meimei. Assessment of transient voltage stability of load bus considering mechanical torque of dynamic load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 11-14.
- [16] 宋帅, 张英敏, 李兴源. 考虑感应电动机故障中电磁转矩变化的节点暂态电压评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 103-108.
- SONG Shuai, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Assessment method of transient voltage stability of load bus considering the changing of induction motor electromagnetic torque in fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 103-108.
- [17] 赵强, 张丽, 王琦, 等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 69-73.
- ZHAO Qiang, ZHANG Li, WANG Qi, et al. Impact of load frequency characteristics on frequency stability of power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 69-73.
- [18] 贺仁睦, 叶静, 林盾, 等. 负荷模型及参数对系统动态过程中频率的影响[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 27-30.
- HE Renmu, YE Jing, LIN Dun, et al. Impacts of load model parameters on system frequency during the system transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 27-30.
- [19] 赵健, 郑超, 王爱录, 等. 感应电动机功率特性及其对电压稳定的影响机制[J]. 智能电网, 2014, 2(10): 13-18.
- ZHAO Jian, ZHENG Chao, WANG Ailu, et al. Power characteristic of induction motor and the influence mechanism to voltage stability[J]. Smart Grid, 2014, 2(10): 13-18.
- [20] 郑超, 赵健, 王贺楠, 等. 马达全维功率特性及其对电压稳定的影响机理[C] // 中国电机工程学会电力系统专业委员会 2014 年学术年会, 8 月 21-22, 2014, 北京, 2014: 203-208.
- ZHENG Chao, ZHAO Jian, WANG Henan, et al. Study on the full-dimension power characteristic for motor and the influence mechanism to voltage stability[C] // Academic Annual Meeting of the Power System Professional Committee of China Electrical Engineering Society in 2014, August 21-22, 2014, Beijing, China: 203-208.
- [21] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [22] 王晶, 翁国庆. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-08-03

作者简介:

海世芳(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定运行; E-mail: 1300640289@qq.com

孙士云(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 422416503@qq.com

(编辑 周金梅)